

**ЗАО «ИНСТИТУТ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ»**

**ПЕТРОВ ЯРОСЛАВ АНДРЕЕВИЧ**

**МЕТОДОЛОГИЯ АДАПТИВНО-ИНТЕГРИРОВАННОГО  
ТАКТИЧЕСКОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОБСТАНОВКИ В  
ЗАДАЧАХ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОГО АНАЛИЗА**

1.6.20 — Геоинформатика, картография

Диссертация  
на соискание учёной степени  
доктора технических наук

Научный консультант:  
*д.т.н., профессор*  
*Истомин Е.П.*

## Оглавление

<i>ВВЕДЕНИЕ</i> .....	10
<i>ГЛАВА 1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ ПОДХОДОВ К ГЕОИНФОРМАЦИОННОМУ ОБЕСПЕЧЕНИЮ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОГО АНАЛИЗА ОБСТАНОВКИ</i> .....	33
1.1. Геоинформатика в задачах анализа динамических обстановок.....	33
1.1.1. Базовые понятия геоинформатики.....	33
1.1.2. Обстановка как объект геоинформационного моделирования .....	34
1.1.3. Функциональная архитектура геоинформационных систем.....	36
1.1.4. Ограничения традиционных ГИС в задачах анализа динамических обстановок .....	38
1.2. Анализ существующих пространственно-временных моделей данных .....	40
1.2.1. Подходы к представлению времени в геоинформационных системах.....	40
1.2.2. Обзор моделей пространственно-временных данных .....	41
1.2.3. Представление динамических объектов в существующих моделях .....	43
1.2.4. Проблема представления неопределённости и прогнозных состояний.....	45
1.3. Источники геопространственных данных и проблемы их интеграции	48
1.3.1. Типология источников геопространственных данных .....	48
1.3.2. Беспилотные авиационные системы как источники геопространственной информации .....	50
1.3.3. Характеристики распределённых и автономных источников.....	52
1.3.4. Проблемы гетерогенности и отсутствия прослеживаемости при интеграции.....	56
1.4. Анализ существующих подходов к прогнозированию в геоинформатике .....	59
1.4.1. Методы прогнозирования пространственных процессов.....	59
1.4.2. Прогнозирование как внешняя функция по отношению к ГИС ...	61
1.4.3. Отсутствие обратной связи: прогноз не верифицируется системой .....	64
1.4.4. Отсутствие адаптации моделей по результатам прогнозирования	66
1.5. Геоинформационные системы двойного назначения .....	68
1.5.1. Требования к геоинформационному обеспечению ситуационных центров.....	68
1.5.2. Обзор существующих геоинформационных систем и платформ ..	73
1.5.3. Критический анализ: соответствие требованиям тактического прогнозирования обстановки .....	78
1.6. Выводы по главе 1 .....	82

<i>ГЛАВА 2. МЕТОДОЛОГИЯ АДАПТИВНО-ИНТЕГРИРОВАННОГО ТАКТИЧЕСКОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОБСТАНОВКИ</i> .....	86
2.1. Концепция и принципы метода АИМТПО .....	86
2.1.1. Методологическая проблема пространственно-временного прогнозирования в геоинформатике .....	86
2.1.2. Принцип замкнутого пространственно-временного контура .....	87
2.1.3. Прогноз как элемент геоинформационной модели .....	92
2.1.4. Адаптивное уточнение модели .....	95
2.1.5. Распределённые и автономные источники геопространственных данных в методе АИМТПО .....	97
2.1.6. Выводы по подразделу 2.1 .....	98
2.2. Геоинформационная модель динамической обстановки .....	100
2.2.1. Концепция геоинформационной модели обстановки в методе АИМТПО .....	100
2.2.2. Онтологическая структура: объекты, состояния, события, процессы .....	101
2.2.3. Представление фактических и прогнозных состояний в единой модели .....	105
2.2.4. Темпоральная организация модели: многомоментность и версияльность .....	110
2.2.5. Неопределённость как атрибут элементов модели .....	115
2.2.6. Геоинформационная модель как цифровой двойник обстановки .....	120
2.3. Пространственно-временная интеграция разнородных геопространственных данных .....	121
2.3.1. Интеграция как компонент пространственно-временного контура .....	121
2.3.2. Гетерогенность распределённых источников .....	123
2.3.3. Темпоральное согласование .....	126
2.3.4. Пространственное согласование .....	128
2.3.5. Семантическое согласование .....	130
2.3.6. Разрешение конфликтов и оценка согласованности .....	132
2.3.7. Прослеживаемость интегрированных данных .....	138
2.4. Геоинформационное прогнозирование и сценарный анализ обстановки .....	140
2.4.1. Прогнозирование как функция геоинформационной системы ...	140
2.4.2. Классы прогностических моделей в методе АИМТПО .....	143
2.4.3. Пространственно-временная экстраполяция и её ограничения ...	146
2.4.4. Модельное прогнозирование динамики объектов .....	148
2.4.5. Сценарный анализ: множественность прогнозных состояний ...	150
2.4.6. Оценка неопределённости прогнозов .....	153
2.4.7. Горизонты прогнозирования и деградация достоверности .....	155
2.5. Адаптация геоинформационных моделей в замкнутом контуре .....	156
2.5.1. Верификация прогнозов .....	157

2.5.2. Структура расхождений и диагностика.....	158
2.5.3. Уровни адаптации.....	160
2.5.4. Пространственная дифференциация адаптации.....	162
2.5.5. Темпоральная организация адаптивного цикла.....	164
2.5.6. Адаптивное управление источниками данных.....	165
2.5.7. Устойчивость и сходимость адаптивного процесса.....	167
2.6. Выводы по главе 2.....	170
2.6.1. Синтез методологических компонентов АИМТПО.....	170
2.6.2. Научная новизна результатов главы.....	172
2.6.3. Положения, выносимые на защиту (по главе 2).....	174
<b>ГЛАВА 3. РАСПРЕДЕЛЁННАЯ ГЕОИНФОРМАЦИОННАЯ АРХИТЕКТУРА СИТУАЦИОННОГО ЦЕНТРА .....</b>	
<b>175</b>	
3.1. Архитектура распределённого геоинформационного контура ситуационного центра.....	176
3.1.1. Концептуальные основания распределённой архитектуры .....	176
3.1.2. Иерархия пространственно-временных контуров обработки .....	177
3.1.4. Сбалансированное объединение и разделение функций.....	181
3.1.5. Масштабируемость и отказоустойчивость архитектуры.....	183
3.2. Бортовой контур пространственно-временной подготовки геопространственных данных .....	184
3.2.1. Семантическое сжатие на стороне источника .....	185
3.2.2. Оценка доверия источника на стороне источника .....	186
3.2.3. Контурный обмен с ситуационным центром.....	188
3.3. Наземный контур интеграции геопространственных ресурсов и уточнения обстановки.....	190
3.3.1. Региональное согласование данных .....	191
3.3.2. Агрегация и формирование общей картины обстановки .....	194
3.3.3. Аналитический и прогностический слой .....	196
3.4. Геоинформационные сервисы поддержки принятия решений.....	198
3.4.1. Типология геоинформационных сервисов.....	199
3.4.2. Эталонная геоинформационная база как единая точка интеграции .....	201
3.4.3. Межведомственное взаимодействие через ИССГР.....	203
3.4.4. Сервисы операторской поддержки .....	206
3.5. Контур адаптивной обратной связи в распределённой геоинформационной системе .....	208
3.5.1. Формальная структура контура.....	208
3.5.2. Темпоральная организация адаптации .....	211
3.5.3. Ограничения и устойчивость.....	214
3.5.4. Контур непрерывного обучения.....	216
3.6. Выводы по главе 3.....	218
3.6.1. Архитектурный синтез решений главы 3.....	218

3.6.2. Соответствие положениям, выносимым на защиту .....	220
<i>ГЛАВА 4. МЕТОДИКА МНОГОФАКТОРНОЙ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ВЕРИФИКАЦИЯ.....</i>	<i>222</i>
4.1. Метрики качества геопространственных данных в динамических условиях.....	222
4.1.1. Особенности оценки качества в распределённых геоинформационных системах.....	222
4.1.2. Метрики качества бортового контура .....	226
4.1.3. Метрики качества наземного контура .....	229
4.1.4. Влияние адаптивного управления источниками на качество данных .....	235
4.2. Метрики качества прогнозирования.....	237
4.2.1. Метрики точности прогнозов .....	238
4.2.2. Метрики неопределённости прогноза .....	240
4.2.3. Метрики горизонта прогнозирования .....	241
4.2.4. Метрики верификации замкнутого контура .....	242
4.3. Оценка эффективности геоинформационных сервисов поддержки принятия решений .....	244
4.3.1. Критерии эффективности информационного обеспечения ситуационных центров.....	244
4.3.2. Метрики оперативности.....	246
4.3.3. Метрики полноты информационного обеспечения .....	249
4.3.4. Метрики релевантности и достоверности .....	252
4.3.5. Оценка эффективности визуализации динамической обстановки .....	254
4.3.6. Интерфейсы с внешними геоинформационными системами .....	257
4.4. Многофакторная оценка эффективности метода АИМТПО.....	259
4.4.1. Методика многофакторной оценки .....	259
4.4.2. Аналитическое обоснование .....	263
4.4.3. Сравнительный анализ с базовыми подходами.....	265
4.4.4. Результаты оценки эффективности.....	268
4.4.5. Границы применимости метода .....	271
4.5. Экспериментальная верификация архитектурных решений на имитационной среде.....	274
4.5.1. Постановка экспериментального исследования и его границы... ..	274
4.5.2. Имитационная среда и состав группировки .....	275
4.5.3. Сравнение архитектурных вариантов организации обработки ... ..	278
4.5.4. Результаты верификации подсистем .....	280
4.5.5. Сценарий обнаружения и подтверждения объекта как пример прохождения данных через метод АИМТПО.....	282
4.5.6. Точность локализации и пространственное покрытие .....	284
4.5.7. Границы обобщения и переход к полевой верификации.....	286

4.6. Выводы по главе 4 .....	288
4.6.1. Обобщение результатов оценки эффективности.....	288
4.6.2. Научная новизна результатов оценки.....	289
4.6.3. Положения, выносимые на защиту (по главе 4).....	292
4.6.4. Достижение цели и решение задач исследования.....	294
<i>ЗАКЛЮЧЕНИЕ</i> .....	296
<i>СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ</i> .....	310
<i>ПРИЛОЖЕНИЕ А. Копии актов о внедрении результатов</i> .....	340
<i>диссертационной работы</i> .....	340
А.1 Акт о внедрении результатов диссертационной работы в производственную деятельность ООО «НеоБИТ».....	341
А.2 Акт о внедрении результатов диссертационной работы в производственную деятельность ЗАО «Институт телекоммуникаций»...	343
А.4 Акт о внедрении результатов диссертационной работы в научно- исследовательскую работу ФГБОУ ВО «РГГМУ» по интеллектуальному управлению группами беспилотных авиационных систем .....	347
А.5 Акт о внедрении результатов диссертационной работы в научно- исследовательскую работу ФГБОУ ВО «РГГМУ» по беспроводному численному моделированию состояния атмосферы .....	350
А.6 Акт о внедрении результатов диссертационной работы в учебный процесс ФГБОУ ВО «РГГМУ» .....	353
<i>ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Архитектурные схемы геоинформационной системы ситуационного центра</i> .....	356

## СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ

### *Сокращения на русском языке*

<b>АИМТПО</b>	адаптивно-интегрированный метод тактического прогнозирования обстановки
<b>БАС</b>	беспилотная авиационная система
<b>БД</b>	база данных
<b>ВНК</b>	верификационно-наблюдательная картина
<b>ГИС</b>	геоинформационная система
<b>ГНСС</b>	глобальная навигационная спутниковая система
<b>ИИ</b>	искусственный интеллект
<b>ИССГР</b>	Интегрированная сетевая система геоинформационных ресурсов
<b>МО</b>	модель обстановки
<b>НИР</b>	научно-исследовательская работа
<b>ОС</b>	операционная система
<b>ПО</b>	программное обеспечение
<b>СКО</b>	среднеквадратическое отклонение
<b>СППР</b>	система поддержки принятия решений
<b>СУБД</b>	система управления базами данных
<b>СЦ</b>	ситуационный центр
<b>ТЗ</b>	техническое задание
<b>ЦДД</b>	цифровой двойник динамической обстановки

### *Сокращения и стандарты на латинском языке*

<b>АНР</b>	Analytic Hierarchy Process — метод анализа иерархий
------------	---

<b>CA</b>	Constant Acceleration — модель постоянного ускорения
<b>CI</b>	Covariance Intersection — метод пересечения ковариаций
<b>CT</b>	Coordinated Turn — модель координированного разворота
<b>CV</b>	Constant Velocity — модель постоянной скорости
<b>GeoJSON</b>	Geographic JavaScript Object Notation — формат обмена геопространственными данными
<b>GNSS</b>	Global Navigation Satellite System — глобальная навигационная спутниковая система
<b>GPS</b>	Global Positioning System — глобальная система позиционирования
<b>IMM</b>	Interacting Multiple Model — многомодельный взаимодействующий фильтр
<b>ISO</b>	International Organization for Standardization — Международная организация по стандартизации
<b>NATO</b>	North Atlantic Treaty Organization — Организация Североатлантического договора
<b>OGC</b>	Open Geospatial Consortium — Открытый геопространственный консорциум
<b>PROV</b>	Provenance — модель происхождения данных консорциума W3C
<b>RMSE</b>	Root Mean Square Error — среднеквадратическая ошибка
<b>STANAG</b>	Standardization Agreement — стандартизационное соглашение НАТО
<b>UTC</b>	Universal Time Coordinated — всемирное координированное время
<b>WCS</b>	Web Coverage Service — веб-сервис покрытий

<b>WFS</b>	Web Feature Service — веб-сервис пространственных объектов
<b>WGS</b>	World Geodetic System — мировая геодезическая система
<b>WMS</b>	Web Map Service — веб-сервис картографических изображений
<b>WMTS</b>	Web Map Tile Service — веб-сервис тайловых карт

# ВВЕДЕНИЕ

## Актуальность темы исследования

Задачи мониторинга территорий, реагирования на чрезвычайные ситуации, контроля транспортных и хозяйственных процессов, поддержки принятия решений в сферах гражданского управления и обороны решаются на базе распределённых геоинформационных систем и ситуационных центров. Состав наблюдаемых обстановок усложняется. Число источников геопространственных данных растёт; среди них — мобильные сенсорные платформы (беспилотные авиационные системы, наземные роботизированные носители, морские автономные аппараты) [131, 198] и ведомственные и коммерческие системы с несовпадающими форматами, точностными характеристиками, шкалами времени и классификаторами объектов. Динамика наблюдаемых процессов сокращает интервал, в течение которого сформированная картина обстановки сохраняет актуальность для принятия решений. Геоинформационное обеспечение переходит из режима периодического обновления в режим непрерывного формирования модели обстановки с одновременным прогнозированием её эволюции.

Существующий методологический аппарат геоинформатики не обеспечивает полного решения этой задачи. Пространственно-временные модели данных — snapshot-модели, версионные и событийные представления, пространственно-временные кубы — разработаны для фиксации прошлых и текущих состояний [195, 213]; онтологического места для прогнозных состояний в них нет, неопределённость задаётся на уровне набора данных в целом, без дифференциации по отдельным объектам. Методы прогнозирования пространственных процессов (геостатистические, основанные на машинном обучении, агентные) [33, 120] реализуются как внешние по отношению к ГИС функции: их результаты импортируются в систему для визуализации, но не возвращаются в её ядро для последующей верификации и адаптации модели. Архитектуры распределённых

геоинформационных систем поддерживают преобразования форматов и систем координат, однако прослеживаемость происхождения данных в них фиксируется на уровне метаданных набора, и расхождения между прогнозом и фактом нельзя атрибутировать конкретному источнику или процедуре. Методы интеграции разнородных геопространственных данных формально согласовывают пространственные и временные координаты без отдельного учёта составляющих неопределённости — сенсорной, навигационной, коммуникационной, семантической. Системы поддержки принятия решений в ситуационных центрах фрагментарно покрывают отдельные функции аналитики; интеграция аналитики с прогнозированием и верификацией в едином замкнутом контуре в действующих платформах не реализована.

Технологический контекст одновременно благоприятен для пересмотра методологии. Беспилотные системы стали массовым источником геопространственных данных и одновременно элементом распределённой обработки. Инфраструктуры пространственных данных, стандартизация интерфейсов через консорциум OGC (WFS, WMS, WMTS, WCS) [180], формат GeoJSON как общая транспортная схема обмена пространственными объектами [189] обеспечивают техническую основу межведомственного взаимодействия. Возможности распределённой обработки расширяются за счёт развития бортовых вычислителей, периферийных узлов и облачных сервисов. Технологические компоненты для построения замкнутого пространственно-временного контура существуют; концептуальной основы, объединяющей их в систему с архитектурно обеспеченной обратной связью, сквозной прослеживаемостью и адаптивным распределением функций, в действующей методологии геоинформатики нет.

Этим определяется актуальность разработки геоинформационного метода, обеспечивающего замкнутое решение задач пространственно-временного анализа в условиях распределённых источников и динамической обстановки.

## Степень разработанности темы

Тема диссертации лежит в области пересечения нескольких научных направлений геоинформатики. По каждому из них существует значительный задел; в совокупности эти направления не образуют замкнутой методологической рамки, отвечающей задачам адаптивного пространственно-временного анализа в распределённой среде.

Пространственно-временные модели данных в геоинформатике. Развита подходы snapshot-моделирования, версионного представления, событийных моделей, пространственно-временного куба [183, 184, 211]. Теоретические основания заложены в работах по темпоральным ГИС и формальным моделям пространственно-временной информации [156, 195, 210]. Ограничения этих моделей проявляются в ориентации на представление прошлого и настоящего, в отсутствии онтологического места для прогнозных состояний, в плоской семантике достоверности — оценка неопределённости фиксируется как свойство набора, а не отдельного элемента, и не дифференцируется по горизонту прогноза.

Методы прогнозирования пространственных процессов. Разработаны геостатистические методы (кригинг и его модификации, пространственная авторегрессия) [33, 34], физико-математическое моделирование процессов с известным механизмом [49, 55], методы машинного обучения для выявления зависимостей из данных [23, 214], агентное моделирование, сценарный анализ для слабоформализуемых ситуаций [73, 182]. Каждый класс методов закрывает определённый тип задач прогнозирования. Общим ограничением остаётся внешний по отношению к геоинформационному ядру характер прогнозирования: связь прогноза с породившей его моделью при передаче между системами теряется; обратная связь от результатов сопоставления с фактом к параметрам модели архитектурно не предусмотрена.

Архитектуры распределённых геоинформационных систем. Развитие шло от классических клиент-серверных архитектур к веб-сервисным

реализациям, инфраструктурам пространственных данных, облачным платформам [109, 132, 165]. Стандарты OGC задали интерфейсы межсистемного обмена и базовые форматы [175, 181]. Ограничения существующих архитектур связаны с недостаточной поддержкой распределённой обработки в реальном времени, с фрагментарностью прослеживаемости данных на уровне отдельных элементов, с фиксированным распределением функций между уровнями обработки, не адаптируемым к переменному составу источников и переменному качеству каналов связи.

Методы интеграции разнородных пространственных данных. Накоплен аппарат трансформаций систем координат, форматных преобразований, базовых процедур слияния [64, 197]. Темпоральное согласование выполняется через интерполяцию к референсному моменту; пространственное — через приведение к общему разрешению; семантическое — через таблицы соответствий. Вносимая каждой процедурой неопределённость отдельно не оценивается; стратегии разрешения конфликтов между источниками — приоритет, усреднение, голосование — выбираются эвристически [9, 157]. Формальный аппарат согласования с учётом эпистемологического статуса данных и динамической калибровки надёжности источников в рассмотренных подходах не разработан.

Системы поддержки принятия решений в ситуационных центрах. Развиты сервисы визуализации и аналитического сопровождения [40, 79]; стандарты ISO 19157 определяют категории качества пространственных данных [149, 153]. Сервисный слой остаётся фрагментарным, интеграция аналитики с прогнозированием — недостаточной. Операциональная формализация передачи неопределённости в интерфейсах поддержки решений в действующих платформах отсутствует.

Совокупность ограничений выявленных направлений образует методологический разрыв между задачами оценки текущей обстановки, для которых геоинформатика располагает развитым аппаратом, и задачами

адаптивного прогнозирования с прослеживаемой верификацией, для которых существующий аппарат недостаточен. Разрыв охватывает четыре связанных уровня — модели данных, источники, методы прогнозирования, архитектурные решения; изолированно ни один из них не преодолевается.

### **Объект и предмет исследования**

**Объект исследования** — распределённые геоинформационные системы ситуационных центров межведомственного назначения, реализующие задачи пространственно-временного анализа динамической обстановки в условиях множественных источников геопространственных данных.

**Предмет исследования** — методы, модели и архитектурные решения адаптивно-интегрированного формирования геоинформационной модели обстановки в распределённой среде с замкнутым контуром «наблюдение — интеграция — прогнозирование — верификация — адаптация» при учёте разнородности источников, эпистемологического статуса знания и пространственно-временной структуры наблюдаемых процессов.

### **Цель и задачи исследования**

**Цель работы** — разработка методологии адаптивно-интегрированного тактического прогнозирования обстановки в задачах пространственно-временного анализа и реализующего её геоинформационного метода (метод АИМТПО), обеспечивающих замкнутый контур формирования и верификации модели обстановки в распределённых геоинформационных системах ситуационных центров межведомственного назначения.

Достижение цели предполагает решение следующих задач.

1. Проанализировать существующие подходы к геоинформационному обеспечению задач пространственно-временного анализа в условиях распределённых источников и динамической обстановки; выявить

методологические разрывы на концептуальном, методологическом и архитектурном уровнях; обосновать необходимость разработки нового геоинформационного метода.

2. Разработать методологические основания геоинформационного метода адаптивно-интегрированного тактического прогнозирования обстановки (метод АИМТПО, расшифровка приведена в §2.1.1): принцип замкнутого пространственно-временного контура, геоинформационную модель динамической обстановки с включением прогнозных состояний и эпистемологической маркировкой знания, формальный аппарат пространственно-временной интеграции разнородных данных, классификацию прогностических моделей, механизмы адаптации в замкнутом контуре.

3. Разработать архитектурные решения распределённой геоинформационной системы, реализующей метод АИМТПО, с обоснованием иерархии пространственно-временных контуров обработки, адаптерной архитектуры нормализации источников, межведомственного взаимодействия через инфраструктуру пространственных данных по стандартам консорциума OGC и контура адаптивной обратной связи.

4. Разработать методику многофакторной оценки эффективности метода АИМТПО с трёхуровневой иерархией метрик «компонентный — системный — интегральный» и формальным обоснованием весовых коэффициентов сочетанием независимых методов экспертной и математической оценки.

5. Провести экспериментальную верификацию архитектурных решений и сквозной работоспособности замкнутого контура метода АИМТПО на имитационной среде распределённого мониторинга.

6. Обобщить результаты решения задач 2–5 в методологию адаптивно-интегрированного тактического прогнозирования обстановки в задачах пространственно-временного анализа: сформулировать принципы

методологии и переориентации геоинформатики в задачах обеспечения распределённых ситуационных центров межведомственного назначения.

Соответствие задач разделам диссертации: задача 1 — Глава 1; задача 2 — Глава 2; задача 3 — Глава 3; задача 4 — §4.1–§4.4 Главы 4; задача 5 — §4.5 Главы 4; задача 6 — обобщение по результатам Глав 2–4, изложенное в Заключении.

### **Научная новизна**

Научная новизна работы состоит в следующем.

1. Впервые проведена систематизация ограничений существующих геоинформационных подходов к обеспечению задач пространственно-временного анализа в условиях распределённых источников и динамической обстановки по концептуальному, методологическому и архитектурному уровням, отличающаяся от существующих обзорных работ комплексным охватом четырёх типов неопределённости в геопространственных данных, построением сравнительной типологии классов геоинформационных платформ и количественным обоснованием разрывов через параметры пространственного, темпорального и семантического рассогласования.

2. Впервые обоснован комплексный методологический разрыв существующих геоинформационных моделей в части представления прогнозных состояний и формализации эпистемологической маркировки знания, отличающийся от существующих анализов разрывов одновременным охватом четырёх связанных уровней — модели данных, источники, методы прогнозирования, архитектурные решения — с фиксацией их взаимосвязанности: ни один из уровней не преодолевается изолированно.

3. Впервые предложен геоинформационный метод адаптивно-интегрированного тактического прогнозирования обстановки (метод АИМТПО), формализующий замкнутый пространственно-временной контур «наблюдение — интеграция — прогнозирование — верификация —

адаптация» с эксплицитной формализацией всех преобразований, отличающийся от существующих геоинформационных методов целостностью контура, включением прогнозных состояний в модель как полноправных элементов с эпистемологической маркировкой и обеспечением прослеживаемой адаптации в едином операциональном контуре.

4. Впервые разработана геоинформационная модель динамической обстановки с шестикатегорийной таксономией достоверности (достоверные, вероятные, сомнительные, противоречивые, маловероятные, ложные сведения), экспоненциальной моделью темпоральной актуальности с класс-зависимым коэффициентом затухания и характерным периодом убывания достоверности, операторской шкалой полноты данных  $\gamma \in \{0, 1, \dots, 11\}$ , агрегирующей одиннадцать бинарных признаков описания объекта в двенадцать значений и сводимой в четыре категории полноты и онтологической схемой «объекты — состояния — события — процессы», отличающаяся от существующих ГИС-моделей полноправным включением прогнозных состояний наряду с фактическими и операциональной формализацией неопределённости как атрибута каждого элемента модели, а не свойства набора данных в целом.

5. Впервые предложена распределённая четырёхуровневая архитектура геоинформационной системы ситуационного центра межведомственного назначения (бортовой уровень, уровень предварительной агрегации, наземный уровень, центр консолидации и обучения), отличающаяся от существующих архитектурных решений двойным количественным обоснованием иерархии — по вычислительной нагрузке и пропускной способности канала связи; адаптерным принципом нормализации источников; двухэкземплярным развёртыванием эталонной геоинформационной базы с автономным функционированием бортового контура при потере связи; посреднической схемой межведомственного обмена через геоинформационную инфраструктуру общего доступа — интегрированную сетевую систему

геопространственных ресурсов (ИССГР) — по стандартам консорциума OGC и формату GeoJSON Feature Collection, снижающей число поддерживаемых интерфейсов с  $N \times M$  до  $N + M$ ; сквозной прослеживаемостью операций согласования через распределённую обработку.

6. Впервые разработана методика многофакторной оценки эффективности метода АИМТПО с трёхуровневой иерархией метрик «компонентный — системный — интегральный», отличающаяся от существующих подходов к оценке эффективности геоинформационных систем формальным обоснованием весовых коэффициентов сочетанием трёх независимых методов — анализа иерархий (АИР), swing weighting и анализа чувствительности по индексам Соболя — и комбинированной свёрткой, одновременно учитывающей среднее качество компонентов и качество наиболее слабого компонента.

7. Впервые получено экспериментальное подтверждение работоспособности архитектурных решений и сквозного контура метода АИМТПО на имитационной среде распределённого мониторинга с тремя мобильными платформами, отличающееся от существующих апробаций операциональной демонстрацией кросс-источниковой верификации, эмпирическим подтверждением преимущества распределённой архитектуры по нагрузке на канал связи при сопоставимой точности и согласованностью наблюдаемых эффектов с теоретическими предсказаниями метода (двукратное снижение среднеквадратической ошибки локализации при интеграции наблюдений двух источников согласовано с информационной формой оптимальной интеграции при анизотропных ковариациях ракурсно разнесённых наблюдений).

8. Впервые разработан формальный аппарат метода АИМТПО как сквозной результат, объединяющий компоненты метода в единой операциональной логике: критерий устойчивости адаптивного процесса через рекуррентное накопление достоверности с доказуемой монотонностью при

согласованных наблюдениях и ограниченностью сверху; аппарат байесовской интеграции с информационным фильтром и ковариационным пересечением (Covariance Intersection) при неизвестной корреляции; динамическая калибровка надёжности источников; три формальных критерия конфликтов между наблюдениями — расстояние Махаланобиса, дивергенция Бхаттачарьи, темпоральная несогласованность. От существующих формальных подходов к геоинформационной интеграции аппарат отличается согласованностью компонентов в едином замкнутом контуре: критерии конфликтов используют те же ковариационные структуры, что и процедуры слияния; диагностика расхождений опирается на тот же аппарат нормализованных инноваций, что и критерий устойчивости; калибровка надёжности замыкается на адаптацию через прослеживаемые метаданные.

### **Положения, выносимые на защиту**

На защиту выносятся следующие положения.

**Положение 1.** Геоинформационный метод адаптивно-интегрированного тактического прогнозирования обстановки (метод АИМТПО), реализующий замкнутый пространственно-временной контур «наблюдение — интеграция — прогнозирование — верификация — адаптация», отличающийся от существующих геоинформационных методов целостностью контура, включением прогнозных состояний в модель обстановки и сквозной прослеживаемостью происхождения данных и преобразований как условием адаптации.

**Положение 2.** Геоинформационная модель обстановки, включающая прогнозные состояния как равноправный элемент онтологии и эпистемологическую маркировку знания на основе шестикатегорийной таксономии достоверности и темпоральной модели актуальности.

**Положение 3.** Архитектура распределённой геоинформационной системы ситуационного центра межведомственного назначения, реализующая

метод АИМТПО на архитектурном уровне, отличающаяся двойным количественным основанием иерархии пространственно-временных контуров обработки — по вычислительной нагрузке и пропускной способности канала связи, двухэкземплярным развёртыванием эталонной геоинформационной базы с автономным функционированием бортового контура при потере связи с наземным уровнем, посреднической схемой межведомственного информационного обмена через геоинформационную инфраструктуру общего доступа со снижением числа поддерживаемых интерфейсов с  $N \times M$  до  $N + M$ , контуром непрерывного обучения с обратимостью адаптационных воздействий на каждом этапе развёртывания и сквозной прослеживаемостью операций согласования и адаптационных воздействий через распределённую обработку.

**Положение 4.** Методика многофакторной оценки эффективности метода АИМТПО в задачах пространственно-временного анализа, отличающаяся учётом специфики распределённых источников через метрики семантического сжатия бортового контура и согласованности интеграции наземного контура, метриками эффекта адаптации в замкнутом контуре через сопоставление с базовыми подходами при последовательном исключении компонентов метода, оценкой деградации точности прогнозирования на различных горизонтах и калибровки прогностической неопределённости, оценкой корректности представления неопределённости в сервисах поддержки принятия решений и метриками интероперабельности с внешними геоинформационными системами.

**Положение 5.** Методология адаптивно-интегрированного тактического прогнозирования обстановки в задачах пространственно-временного анализа, базирующаяся на принципах замкнутости пространственно-временного контура обработки, эпистемологической дифференциации состояний модели, прослеживаемости операций как условия адаптации, согласованности методологического, архитектурного и оценочного уровней и темповой адекватности обработки классам обстановок. Методология формулирует

переориентации геоинформатики применительно к задачам обеспечения распределённых ситуационных центров межведомственного назначения: от внешней схемы прогнозирования — к встроенному прогностическому контуру с пространственно-временной верификацией; от постфактумной оценки качества данных — к адаптивному управлению источниками в реальном времени; от метаданных набора — к атрибуции неопределённости каждого элемента геоинформационной модели; от регулярного режима публикации данных — к темпово-зависимой обработке с явным согласованием классов обстановок и архитектурных режимов; от метода как разовой процедуры — к методологическому циклу, в котором результаты прогнозирования возвращаются в систему как материал адаптации. Методология объединяет метод АИМТПО (Положение 1), геоинформационную модель обстановки (Положение 2), распределённую геоинформационную архитектуру (Положение 3) и методику многофакторной оценки эффективности (Положение 4) в замкнутый пространственно-временной контур «наблюдение — интеграция — прогнозирование — верификация — адаптация», опираясь на выявленные в Главе 1 ограничения существующих методологий пространственно-временного анализа в распределённых геоинформационных системах.

### **Методология и методы исследования**

Методологическую базу исследования составляют положения геоинформатики как научной дисциплины — принципы пространственно-временного анализа, теория геоинформационных систем, формальные модели пространственно-временной информации [4, 22, 67]; теория моделирования динамических систем [88]; теория адаптивного управления [20, 116]; теория информации; методология моделирования и прогнозирования пространственно-временных процессов [108]. К методологической базе примыкают системный подход к анализу сложных распределённых систем

[19, 92] и принципы эпистемологической дифференциации знания, вводимые для целей формальной маркировки достоверности [173].

В работе применены методы системного анализа для декомпозиции метода АИМТПО на компоненты и обоснования их связей; методы пространственно-временного анализа геопространственных данных; методы математической статистики, включая расстояние Махаланобиса, расстояние Бхаттачарьи, критерий согласия хи-квадрат и статистику нормализованных инноваций [60]; методы байесовского оценивания, включая формулу слияния независимых наблюдений, информационный фильтр и ковариационное пересечение (Covariance Intersection) [117, 158]; методы теории фильтрации — фильтр Калмана и его модификации, многомодельная фильтрация (IMM), метод частиц (Particle Filter) — на концептуальном уровне формирования прогностических классов [123, 159]; методы экспертной оценки — метод анализа иерархий (АНР) и метод swing weighting [134, 190]; методы анализа чувствительности на основе индексов Соболя [101, 194]; методы имитационного моделирования для экспериментальной верификации архитектурных решений [160, 185]; методы геостатистического и сценарного анализа применительно к прогностическим компонентам метода [120, 182].

Информационную базу исследования составляют открытые источники по проблематике геоинформатики, картографии, пространственно-временного анализа и прогнозирования пространственных процессов; результаты экспериментального моделирования, выполненного на имитационной среде распределённого мониторинга с тремя мобильными платформами; экспертные оценки специалистов в области геоинформатики и распределённых систем, использованные при обосновании весовых коэффициентов методики многофакторной оценки эффективности.

## **Теоретическая и практическая значимость работы**

### **Теоретическая значимость работы.**

1. Развитие геоинформатики в части формализации замкнутого пространственно-временного контура с прослеживаемой адаптацией: введение прогнозного состояния как равноправного элемента онтологии модели обстановки, эпистемологическая маркировка знания через шестикатегорийную таксономию достоверности.

2. Формальный аппарат интеграции и адаптации, применимый к широкому классу задач пространственно-временного анализа в геоинформатике — анализу изменений во времени, движения, событий, процессов, обнаружению пространственно-временных аномалий, прогнозированию пространственно-временных закономерностей, сценарному анализу, верификации модели обстановки, геопространственной свёртке и агрегации данных.

3. Расширение системы метрик качества геоинформационного обеспечения трёхуровневой иерархией «компонентный — системный — интегральный» с интегральным показателем эффективности  $E$  и обоснованием весовых коэффициентов сочетанием трёх независимых методов.

4. Формализация прослеживаемости данных как методологического условия адаптации в замкнутом контуре и архитектурного условия атрибуции расхождений в распределённой обработке.

### **Практическая значимость работы.**

1. Результаты применимы к задачам мониторинга, реагирования, контроля территории, картографирования и поддержки принятия решений в распределённых геоинформационных системах межведомственного назначения с использованием мобильных сенсорных платформ как источников геопространственных данных.

2. Архитектурные решения совместимы со стандартами консорциума OGC и форматом GeoJSON Feature Collection, что обеспечивает интеграцию в действующие инфраструктуры пространственных данных и взаимодействие с

геоинформационными системами различных производителей и архитектурных поколений.

3. Методика многофакторной оценки эффективности применима для сравнения и приоритизации архитектурных решений в распределённых геоинформационных системах при разработке и модернизации ситуационных центров.

4. Посредническая схема межведомственного обмена через инфраструктуру пространственных данных снижает число поддерживаемых интерфейсов с  $N \times M$  до  $N + M$  и применима в средах с гетерогенным составом ведомственных потребителей.

5. Двухэкземплярное развёртывание эталонной геоинформационной базы с автономным функционированием бортового контура при потере связи применимо в системах с нестабильной связностью каналов передачи.

6. Адаптерный принцип нормализации источников применим при интеграции действующих геоинформационных платформ в распределённую инфраструктуру без перепроектирования внутренних форматов и протоколов.

### **Соответствие паспорту специальности 1.6.20**

Содержание диссертации соответствует профилю специальности 1.6.20 «Геоинформатика, картография» по семи пунктам.

Пункт 1 — общие вопросы и теоретические концепции геоинформатики и картографии — раскрывается в Главе 2, где формируется методологическое ядро метода АИМТПО, опирающееся на пять принципов методологии: замкнутости пространственно-временного контура обработки, эпистемологической дифференциации состояний модели, прослеживаемости операций как условия адаптации, согласованности методологического, архитектурного и оценочного уровней, темповой адекватности обработки классам обстановок.

Пункт 2 — информационное моделирование географического пространства — реализован в Главе 2 через геоинформационную модель динамической обстановки с онтологической схемой «объекты — состояния — события — процессы», шестикатегорийной таксономией достоверности и темпоральной моделью актуальности.

Пункт 6 — технические средства и технологии сбора, хранения и обработки пространственно-временных данных, геосенсорные сети — представлен в Главе 3 бортовым контуром обработки данных от мобильных сенсорных платформ и в Главе 2 формальным аппаратом пространственно-временной интеграции разнородных наблюдений (§2.3).

Пункт 7 — картографические и геоинформационные методы анализа пространственных данных, моделирования пространственных явлений, объектов, процессов, отношений и систем — закрывается работой в целом: метод АИМТПО развивает геоинформационный аппарат анализа динамической обстановки с включением прогнозных состояний (Глава 2), его архитектурная и операциональная реализация представлена в Главе 3, методика многофакторной оценки — в Главе 4.

Пункт 11 — геоинформационные системы (ГИС), математическое, информационное, лингвистическое и программное обеспечение ГИС и их приложений — поддержан в Главе 3 распределённой четырёхуровневой архитектурой геоинформационной системы ситуационного центра с реализацией межведомственного взаимодействия по стандартам консорциума OGC, в Главе 2 — онтологической схемой геоинформационной модели обстановки и шестикатегорийной таксономией достоверности как элементами лингвистического обеспечения, и в Главе 4 — методикой многофакторной оценки эффективности геоинформационных решений и экспериментальной верификацией архитектурных решений на имитационной среде.

Пункт 16 — организация пространственных данных и знаний с использованием распределённых и облачных технологий, геосервисы —

раскрывается в Главе 3 через распределённую обработку с разнесением функций по бортовому, наземному уровням и центру консолидации, а также через посредническую схему межведомственного информационного обмена через геоинформационную инфраструктуру общего доступа.

Пункт 19 — большие данные в задачах геоинформационного моделирования, разнородные пространственно-временные данные, вопросы их интеграции и совместного использования — обеспечен в Главе 2 формальным аппаратом пространственно-временной интеграции разнородных данных с динамической калибровкой надёжности источников и в Главе 3 адаптерной архитектурой нормализации источников.

### **Степень достоверности результатов**

Достоверность теоретических результатов работы обеспечивается опорой на устоявшийся формальный аппарат геоинформатики, теории фильтрации, теории информации и теории адаптивного управления [117, 159]; согласованностью предложенного аппарата с известными результатами в области пространственного оценивания и интеграции наблюдений; формальными доказательствами свойств метода — монотонной сходимости рекуррентного соотношения накопления достоверности при согласованных наблюдениях, ограниченности соотношения сверху, оптимальности интеграции независимых источников при информационном взвешивании.

Достоверность экспериментальных результатов поддерживается экспериментальной верификацией архитектурных решений на имитационной среде в воспроизводимых для повторного эксперимента условиях, использованием стандартных программных средств моделирования и согласованностью экспериментальных результатов с теоретическими предсказаниями метода. Двукратное снижение среднеквадратической ошибки локализации при интеграции наблюдений двух источников согласовано с информационной формой оптимальной интеграции при анизотропных

ковариациях ракурсно разнесённых наблюдений; повышение показателя достоверности объекта при кросс-источниковой верификации согласовано с формулой байесовского слияния независимых наблюдений.

Методологическая достоверность обеспечивается соответствием предложенных архитектурных решений действующим стандартам консорциума OGC, формату GeoJSON, стандартам систем координат WGS-84 и временной шкалы UTC [146, 154, 180, 189]. Эмпирическая достоверность поддерживается фиксацией границ обобщения: компонентная верификация выполнена на имитационной среде с тремя наземными платформами; полная верификация интегрального показателя эффективности на целевом сценарии воздушной мультидоменной группировки относится к последующему этапу исследования и зафиксирована как таковая.

### **Личный вклад автора**

Все научные результаты, выносимые на защиту, получены автором лично. Автору принадлежат постановка проблемы геоинформационного обеспечения пространственно-временного анализа в распределённой среде, формулирование цели и задач исследования, разработка методологии адаптивно-интегрированного тактического прогнозирования обстановки и реализующего её метода АИМТПО. Автором построена геоинформационная модель динамической обстановки с эпистемологической маркировкой знания, разработана архитектура распределённой геоинформационной системы ситуационного центра, создана методика многофакторной оценки эффективности и проведена экспериментальная верификация на имитационной среде распределённого мониторинга.

Формальный аппарат метода разработан автором: критерий устойчивости адаптивного процесса, аппарат пространственно-временной интеграции разнородных данных, критерии обнаружения конфликтов между наблюдениями и механизмы адаптации в замкнутом контуре. Постановка

экспериментов, разработка имитационной среды, обработка и интерпретация результатов выполнены самостоятельно.

Значительная часть работ по теме диссертации опубликована в соавторстве. В этих работах автору принадлежит ведущая роль в получении основных результатов — концепции замкнутого пространственно-временного контура, метода АИМТПО, архитектурных решений распределённой геоинформационной системы и методики многофакторной оценки эффективности. Результаты соавторов относятся к смежным прикладным задачам и на защиту не выносятся.

### **Апробация результатов и публикации**

По теме диссертации опубликовано 105 научных работ, из них 18 статей в журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Российской Федерации, 42 публикации в изданиях, индексируемых международными базами Scopus и Web of Science; получено 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ и баз данных. Основные результаты работы отражены в монографиях «Геоинформационное управление развитием природно-технических систем» (2022), «Geospatial aspects of managing the development of complex systems» (2023), а также в учебных пособиях «Основы геоинформатики: практикум в QGIS» (2025), «Информационные технологии и системы» (2020) и других.

Количество и качество публикаций соответствуют требованиям пункта 13 Положения о присуждении учёных степеней, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени доктора технических наук. Основные научные результаты диссертации в полном объёме отражены в опубликованных работах. Апробация результатов исследования проведена на научных конференциях:

— I Белорусский географический конгресс, посвящённый 90-летию факультета географии и геоинформатики Белорусского государственного

университета и 70-летию Белорусского географического общества (г. Минск, 08–13 апреля 2024 г., Белорусский государственный университет, факультет географии и геоинформатики, Белорусское географическое общество) — доклад «Создание оперативных цифровых 3D-карт оценки риска на основе гидрометеорологических факторов в акватории порта»;

— Национальная (с международным участием) научно-практическая конференция «Цифровые системы и модели: теория и практика проектирования, разработки и применения» (г. Казань, 10–11 апреля 2024 г., Казанский государственный энергетический университет) — доклад «Возможность создания системы определения опасного волнения на основе технологий искусственного интеллекта на малых выборках»;

— ИНФОГЕО 2025 «Единое геоинформационное пространство для обеспечения устойчивого развития регионов: от сбора данных к интеграции» (г. Санкт-Петербург, 28 ноября 2025 г.) — доклад «Архитектурная модель АИМТПО-БИУС для задач тактического прогнозирования в многодоменной среде» (специальная закрытая секция);

— «Ситуационные центры: фокус кросс-отраслевых интересов – 2025» (г. Москва, 25–26 ноября 2025 г.) — доклад «Технология интеллектуального управления и ситуационного моделирования групповых действий БВС в архитектуре современных ситуационных центров»;

— Всероссийский ГидроЭкологический форум HydroEcoF-2026 (г. Санкт-Петербург, 27 апреля 2026 г.) — доклад «Применение геоинформационного моделирования для визуализации гидродинамических моделей».

Результаты диссертационного исследования внедрены по шести актам: в ООО «НеоБИТ» и ЗАО «Институт телекоммуникаций» (г. Санкт-Петербург) — в виде производственного внедрения при разработке распределённых геоинформационных решений и в методическом обеспечении испытательной лаборатории; в Санкт-Петербургском филиале АО «Конструкторское бюро

навигационных систем» — в составе научно-исследовательской работы по развитию системы ГЛОНАСС; в ФГБОУ ВО «Российский государственный гидрометеорологический университет» — в двух научно-исследовательских работах (по интеллектуальному управлению группами беспилотных авиационных систем и по бесшовному численному моделированию состояния атмосферы) и в учебном процессе подготовки магистров и кадров высшей квалификации по геоинформационным дисциплинам. Внедрены геоинформационный метод АИМТПО, геоинформационная модель обстановки с прогнозными состояниями и эпистемологической маркировкой знания, архитектурные решения распределённой геоинформационной системы ситуационного центра и методика многофакторной оценки эффективности — в составе, согласованном с профилем каждой принимающей организации. Копии актов о внедрении приведены в приложении А.

### **Структура и объём диссертации**

Структура диссертации соответствует требованиям, предъявляемым к докторским работам по специальности 1.6.20. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы и двух приложений (приложение А — копии актов о внедрении результатов диссертационной работы; приложение Б — архитектурные решения распределённой геоинформационной системы ситуационного центра).

Общий объём диссертации составляет 359 страниц, включая 27 рисунков и 53 таблицы. Список литературы содержит 214 наименований. Работа дополнена 2 приложениями.

Глава 1 «Теоретические основы и анализ существующих подходов к геоинформационному обеспечению пространственно-временного анализа обстановки» посвящена анализу теоретических основ геоинформатики применительно к задачам анализа динамических обстановок, существующих

пространственно-временных моделей данных, источников геопространственных данных от распределённых сенсорных платформ, методов прогнозирования в геоинформатике и классов геоинформационных систем двойного назначения. По результатам анализа выявлены ограничения существующих подходов на концептуальном, методологическом и архитектурном уровнях, обоснован методологический разрыв между задачами оценки текущей обстановки и задачами адаптивного прогнозирования с прослеживаемой верификацией, сформулированы направления исследования.

Глава 2 «Методология адаптивно-интегрированного тактического прогнозирования обстановки» содержит методологическое ядро работы: обоснование геоинформационного метода АИМТПО (расшифровка приведена в §2.1.1), принцип замкнутого пространственно-временного контура, геоинформационную модель динамической обстановки с включением прогнозных состояний и эпистемологической маркировкой знания, формальный аппарат пространственно-временной интеграции разнородных данных, классификацию прогностических моделей с геоинформационным критерием выбора и механизмы адаптации в замкнутом контуре с формальным критерием устойчивости адаптивного процесса.

Глава 3 «Распределённая геоинформационная архитектура ситуационного центра» раскрывает архитектурные решения распределённой геоинформационной системы, реализующей метод АИМТПО на архитектурном уровне. Обоснована иерархия пространственно-временных контуров обработки с двойным количественным основанием — по вычислительной нагрузке и пропускной способности канала связи. Разработана адаптерная архитектура нормализации источников и двухэкземплярная схема развёртывания эталонной геоинформационной базы; межведомственное взаимодействие реализовано через инфраструктуру пространственных данных по стандартам консорциума OGC. Контур адаптивной обратной связи развёрнут с обратимостью адаптационных воздействий.

Глава 4 «Методика многофакторной оценки эффективности и экспериментальная верификация» посвящена разработке методики многофакторной оценки эффективности метода АИМТПО и экспериментальной верификации архитектурных решений. Введена трёхуровневая иерархия метрик «компонентный — системный — интегральный»; весовые коэффициенты обоснованы сочетанием трёх независимых методов — метода анализа иерархий, метода swing weighting и анализа чувствительности по индексам Соболя; проведена экспериментальная верификация на имитационной среде распределённого мониторинга с тремя мобильными платформами; зафиксирована согласованность экспериментальных результатов с теоретическими предсказаниями метода.

В заключении обобщены научные результаты работы, приведены положения, выносимые на защиту, охарактеризовано достижение цели и решение задач исследования, изложены теоретическая и практическая значимость работы, определены перспективные направления дальнейших исследований.

# **ГЛАВА 1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ ПОДХОДОВ К ГЕОИНФОРМАЦИОННОМУ ОБЕСПЕЧЕНИЮ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОГО АНАЛИЗА ОБСТАНОВКИ**

## **1.1. Геоинформатика в задачах анализа динамических обстановок**

### **1.1.1. Базовые понятия геоинформатики**

Геоинформатика оформилась во второй половине XX века на пересечении географии, картографии и информатики. Её предметом являются закономерности и методы сбора, хранения, обработки, анализа и визуализации пространственно-координированной информации [22, 67, 141]. Картография ориентирована на графическое представление пространственных сведений [5]; геоинформатика работает с ними как с объектом вычислительной обработки, что расширяет область решаемых задач.

Основная категория дисциплины — геопространственные данные, то есть сведения об объектах и явлениях, привязанные к системе координат и характеризующиеся единством трёх компонентов: пространственного положения, атрибутивных характеристик и топологических отношений [32, 65]. Это триединство отличает геоинформационную обработку от иных видов информационной обработки и определяет требования к моделям данных, структурам хранения и аналитическим операциям. Пространственный объект как базовая единица представления реальности описывается геометрией (точка, линия, полигон [31] или их композиция), атрибутами и идентификатором.

Геоинформационная система — программно-аппаратный комплекс, обеспечивающий полный цикл работы с геопространственными данными: от ввода до анализа и представления потребителю [3, 84, 109]. ГИС объединяет функции базы данных, аналитического инструментария и средств

визуализации. Совокупность операций над геопространственными данными — оверлейных, буферных, сетевых, поверхностных, геостатистических — образует аппарат геоинформационного анализа, ориентированного на выявление пространственных закономерностей и решение пространственных задач.

В традиционной трактовке геоинформатики временная координата рассматривается преимущественно как атрибут, фиксирующий момент регистрации данных или период их актуальности. Концепция темпоральных ГИС, формирующаяся в последние десятилетия, вводит время как самостоятельное измерение модели наряду с пространственными координатами [184, 195, 210]. Её практическая реализация остаётся фрагментарной, и это существенно для задач анализа динамических обстановок.

### **1.1.2. Обстановка как объект геоинформационного моделирования**

Понятие обстановки используется в различных предметных областях для обозначения совокупности условий, объектов и факторов, характеризующих состояние определённой территории или ситуации в определённый момент времени [8, 68]. В военном деле обстановка включает расположение и состояние своих сил и сил противника, характеристики местности, метеорологические условия, иные факторы, влияющие на ведение боевых действий. В гражданском контексте — при управлении территориями, реагировании на чрезвычайные ситуации, обеспечении безопасности — обстановка охватывает размещение объектов инфраструктуры, распределение ресурсов, зоны рисков, перемещения людей и техники.

Общим для различных трактовок является пространственно-временной характер обстановки: она привязана к определённой территории, изменяется во времени и требует для своего описания указания как пространственных [74], так и временных координат. Это делает обстановку естественным объектом геоинформационного моделирования, при котором совокупность

объектов и условий представляется средствами ГИС для последующего анализа и поддержки принятия решений.

С позиций геоинформатики обстановка может быть формализована как совокупность пространственных объектов с их атрибутами и отношениями, отнесённая к определённому моменту или интервалу времени. Формально:

$$S(t) = \{O(t), A(t), R(t), C\},$$

где  $O(t)$  — множество пространственных объектов, существующих в момент времени  $t$ ;  $A(t)$  — атрибуты объектов и их значения в момент  $t$ ;  $R(t)$  — отношения между объектами в момент  $t$ ;  $C$  — контекстные условия, характеризующие среду (считаются неизменными или медленно меняющимися в рамках рассматриваемого интервала).

Формула фиксирует состояние в произвольно выбранный момент  $t$ ; рассматриваемая как функция  $t$ , она задаёт лишь последовательность независимых срезов и не описывает закономерностей перехода между ними. Данное определение охватывает статический срез обстановки и соответствует традиционному пониманию состояния как моментального снимка реальности.

Динамическая обстановка отличается изменчивостью во времени: объекты перемещаются, меняют свои характеристики, появляются и исчезают; отношения между ними трансформируются; условия среды эволюционируют. Скорость изменений варьируется от медленных, измеряемых месяцами и годами, до быстрых, происходящих за секунды и минуты. Геоинформационное обеспечение в этих условиях должно представлять текущее состояние, отслеживать изменения, накапливать историю и поддерживать прогнозирование развития.

Таблица 1.1-1 — Характеристики обстановок по степени динамичности

Характеристика	Статическая обстановка	Медленно изменяющаяся	Динамическая обстановка
<b>Характерное время изменений</b>	Годы, десятилетия	Месяцы, недели	Часы, минуты, секунды
<b>Типичные объекты</b>	Рельеф, капитальные сооружения	Землепользование, инфраструктура	Транспортные средства, люди, события

Требования к обновлению	к	Периодическое (годы)	Регулярное (недели, месяцы)	Непрерывное или квазинепрерывное
Потребность в прогнозировании	в	Минимальная	Умеренная	Критическая
Традиционные средства ГИС		Достаточны	Частично достаточны	Недостаточны

Специфика динамических обстановок как объекта геоинформационного моделирования состоит в представлении и текущего состояния, и закономерностей изменений. Статическая обстановка полностью описывается единственным состоянием  $S$ . Динамическая обстановка требует представления последовательности состояний  $\{S(t_1), S(t_2), \dots, S(t_n)\}$  или, в общем случае, функции состояния  $S(t)$  на некотором интервале времени. Для практических задач анализа и поддержки принятия решений необходимы и описания прошлых и текущего состояний, и обоснованные ожидания относительно будущих состояний — прогнозы.

### 1.1.3. Функциональная архитектура геоинформационных систем

Функциональная архитектура ГИС традиционно описывается как совокупность подсистем, реализующих цикл работы с геопространственными данными: ввод, хранение, обработку и анализ, визуализацию. Подсистема ввода принимает данные из разнородных источников (цифровых карт, материалов дистанционного зондирования, геодезических и навигационных измерений) и приводит их к единому представлению. Подсистема хранения опирается на базы геоданных с пространственным индексированием, поддержкой транзакций и версионирования. Подсистема обработки и анализа выполняет пространственные запросы, геометрические вычисления и моделирование. Подсистема визуализации формирует картографические, схемные и трёхмерные представления результатов. Детальное описание этих подсистем выходит за рамки настоящего исследования и достаточно полно дано в специальной литературе [76, 84, 110, 111].

Методологически важно то, что рассматриваемая архитектура организована линейно: информационный поток направлен от источников

через обработку к потребителю. Обратные связи ограничены сохранением промежуточных результатов в базе данных и инициированием новых запросов из интерфейса визуализации. Систематическая обратная связь от результатов использования информации — выявленных ошибок и несоответствий, корректирующих оценок — к моделям и процедурам обработки архитектурой не предусмотрена в качестве штатного элемента.

Для задач анализа динамических обстановок архитектура дополняется подсистемами темпорального управления (работа с временными координатами, хранение истории состояний), мониторинга (отслеживание изменений и выявление значимых событий) и оперативного отображения (актуализация визуализации в квазиреальном времени). Подобные расширения надстраиваются над традиционным ядром и не меняют его линейной логики.

Прогностические функции в архитектуре большинства ГИС отсутствуют либо реализованы фрагментарно. Прогнозирование, когда оно выполняется, возлагается на внешние специализированные системы — гидрологические, метеорологические, транспортные модели, — результаты которых импортируются в ГИС исключительно для визуализации. Такая организация отрывает прогнозирование от геоинформационного ядра и не оставляет места для механизма сопоставления прогнозов с фактическим развитием обстановки.

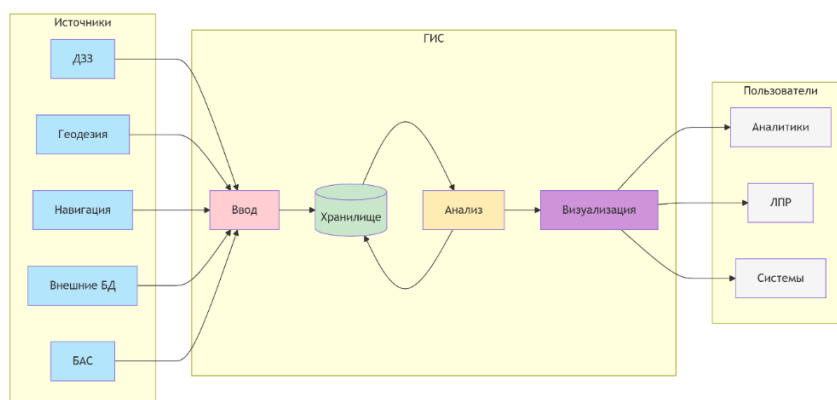


Рисунок 1.1-1 — Традиционная функциональная архитектура геоинформационной системы

#### **1.1.4. Ограничения традиционных ГИС в задачах анализа динамических обстановок**

Традиционные геоинформационные системы разрабатывались для задач инвентаризации, картографирования и пространственного анализа относительно стабильных объектов; их архитектура оптимизирована для данных, изменяющихся медленно по сравнению с периодичностью использования. При применении к задачам анализа динамических обстановок обнаруживается ряд существенных ограничений.

Темпоральное представление: время в традиционных ГИС — атрибут актуальности данных, а не полноценное измерение модели. Большинство ГИС ориентированы на единственное актуальное состояние с возможностью периодического обновления; механизмы хранения истории, темпоральных запросов и анализа изменений развиты недостаточно или реализованы как надстройки, что затрудняет анализ динамики обстановки.

Представление неопределённости: геопространственные данные в традиционных ГИС рассматриваются как достоверные — пространственный объект имеет точные координаты, атрибуты — определённые значения. Неопределённость, если и оценивается, относится к набору данных в целом, а не к отдельным объектам. Для динамических обстановок, где неопределённость принципиально неустранима и варьируется по объектам, такой подход не применим.

Представление прогнозов: в модели данных традиционных ГИС нет места для прогнозных состояний наряду с фактическими данными. Прогнозы, если формируются, не имеют стандартного способа представления; отсутствует механизм связывания прогноза с его информационной основой и последующего сопоставления с фактическим развитием обстановки.

Интеграция разнородных источников: традиционные механизмы ориентированы на приведение данных к единому формату и системе координат с последующим объединением, недостаточно учитывая различия в

достоверности источников, темпоральную асинхронность и необходимость прослеживания происхождения для диагностики.

Таблица 1.1-2 — Ограничения традиционных ГИС для задач анализа динамических обстановок

Аспект	Возможности традиционных ГИС	Требования динамических обстановок	Разрыв
<b>Время</b>	Атрибут актуальности	Полноправное измерение модели	Существенный
<b>Неопределенность</b>	На уровне метаданных набора	Атрибут каждого элемента	Существенный
<b>Прогнозы</b>	Не представлены в модели	Равноправный элемент модели	Критический
<b>Интеграция</b>	Приведение форматов и координат	Прослеживаемость, синхронизация	Существенный
<b>Обратная связь</b>	Отсутствует или минимальна	Систематическое использование	Критический
<b>Адаптация</b>	Ручная периодическая	Непрерывная автоматизированная	Критический

Отсутствие систематической обратной связи по результатам использования информации — выявленным ошибкам, несоответствиям, некорректным оценкам — ведёт к статичности моделей и параметров обработки: они задаются при разработке и остаются неизменными до следующей модернизации. Даже при наличии прогностических компонентов их сопоставление с фактическим развитием обстановки и использование расхождений для адаптации архитектурой не предусмотрены. Для динамических обстановок, условия которых изменяются, такая статичность ведёт к деградации адекватности моделей.

Совокупность выявленных ограничений указывает на необходимость пересмотра концептуальных оснований геоинформационного обеспечения для задач анализа динамических обстановок. Требуется не расширение функциональности традиционных ГИС дополнительными модулями, а разработка методологически нового подхода, в котором прогнозирование, верификация и адаптация интегрированы в ядро геоинформационного

процесса. Обоснование и разработка такого подхода составляют задачу последующих разделов работы.

## **1.2. Анализ существующих пространственно-временных моделей данных**

### **1.2.1. Подходы к представлению времени в геоинформационных системах**

Представление времени в геоинформационных системах определяет возможности работы с динамическими данными и анализа изменений пространственных объектов. Развитие темпоральных средств ГИС существенно отставало от инструментов пространственного анализа по историческим причинам (ориентация первых ГИС на картографические задачи инвентаризации) и в силу концептуальной сложности совместного моделирования пространства и времени [195, 210]. В современных ГИС сложились четыре подхода к представлению времени, различающихся трактовкой временного измерения: атрибутивный (время как один из атрибутов объекта — временная метка регистрации, период актуальности или дата изменения; темпоральные запросы сводятся к фильтрации, динамический анализ выносится во внешние средства), версионный (история объекта как последовательность версий, фиксируемых в моменты изменений; реконструкция обстановки на любой момент в пределах накопленной истории, но состояние между версиями неопределённо), событийный (центром модели становится изменение — событие с типом, моментом, участниками и параметрами; естественно для дискретных изменений и причинно-следственного анализа, затруднительно для непрерывной динамики) [139, 144, 184], пространственно-временные кубы (время как третье измерение, в котором траектория объекта образует линию в  $(x, y, t)$ -пространстве; наглядно для анализа движения, но ресурсоёмко) [183, 211]. Сводное сопоставление приведено в Таблице 1.2-1.

Таблица 1.2-1 — Подходы к представлению времени в геоинформационных системах

Подход	Концептуальная основа	Представление истории	Преимущества	Ограничения
<b>Атрибутивный</b>	Время как атрибут объекта	Единственное актуальное значение	Простота реализации	Отсутствие истории, ограниченные запросы
<b>Версионный</b>	Объект как последовательность версий	Дискретные состояния в моменты изменений	Доступ к прошлым состояниям	Дискретность, рост объема данных
<b>Событийный</b>	Изменения как дискретные события	Последовательность событий	Естественность для дискретной динамики	Сложность для непрерывных процессов
<b>Пространственно-временной куб</b>	Время как третье измерение	Непрерывная траектория	Наглядность, аналитические возможности	Ресурсоемкость, сложность реализации

Независимо от выбранного подхода, представление времени в существующих ГИС ориентировано на прошлое и настоящее: время трактуется как координата привязки зарегистрированных данных, будущее как момент отнесения прогноза не имеет в темпоральной модели собственного места. Прогнозные данные, когда они используются, представляются теми же структурами, что и фактические, без различия эпистемологического статуса и без связи с породившими их моделями. Концепция действительного и транзакционного времени, развитая в теории темпоральных баз данных, различает время, когда факт имел место в реальности, и время, когда информация о нём была зафиксирована; это различие существенно для аудита данных и анализа эволюции знаний об обстановке, но не распространяется на прогнозы — применительно к прогнозу «действительное время» отнесено к будущему, что не укладывается в традиционную темпоральную модель.

### 1.2.2. Обзор моделей пространственно-временных данных

Развитие пространственно-временного моделирования в геоинформатике сформировало несколько концептуальных подходов, каждый

предлагает свою трактовку соотношения пространственных и временных аспектов данных (Рисунок 1.2-1).

Модель последовательности снимков (snapshot model) представляет данные как упорядоченную последовательность пространственных состояний. Снимки структурно независимы: идентификация объектов между ними требует отдельных процедур сопоставления. Модель адекватна периодическим съёмкам; непрерывная динамика в ней не представима, а при медленных изменениях она расточительна по объёму [195].

Модель базового состояния с изменениями (base state with amendments) фиксирует полное состояние обстановки для некоторого опорного момента; последующие состояния кодируются через дельта-изменения относительно базового или предыдущего. При медленных изменениях хранимый объём данных резко сокращается. Цена — доступ к произвольному моменту времени требует последовательного прохода по всей цепочке изменений.

Объектно-ориентированные пространственно-временные модели [35, 36] рассматривают пространственные объекты как сущности с жизненным циклом: объект создаётся, существует, изменяется, прекращает существование; его история представляется как совокупность состояний, связанных отношениями преемственности. Подход естественен для дискретных идентифицируемых объектов, но менее применим к непрерывным полям и явлениям без чётких границ [39, 144].

Событийные модели делают первичными элементами изменения — появление, исчезновение, изменение, взаимодействие; состояния объектов выводятся из последовательности событий. Модели хороши для причинно-следственного анализа и реконструкции истории, но требуют полноты регистрации событий [184, 211].

Полевые пространственно-временные модели представляют непрерывные явления — температуру, концентрацию, высоту — как функции от пространственных координат и времени; реализация требует дискретизации через растры или нерегулярные сетки с интерполяцией. Полевые модели

адекватны природным процессам, но менее подходят для дискретных объектов.

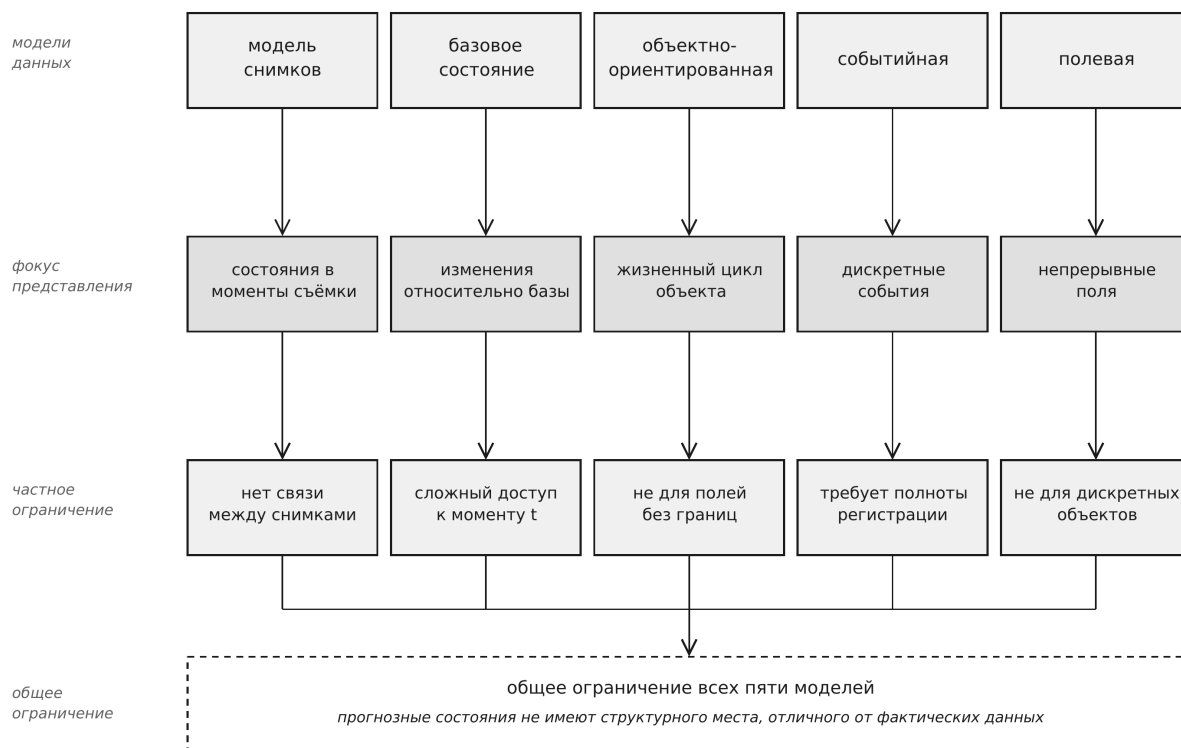


Рисунок 1.2-1 — Модели пространственно-временных данных и их ограничения

Общее ограничение рассмотренных моделей — ориентация на прошлое и настоящее: ни одна не предусматривает явного механизма представления прогнозных состояний как элементов, отличных по статусу от фактических. Прогнозы, формируемые внешними системами, могут быть импортированы и сохранены, но утрачивают связь с породившими их моделями и структурно не различаются от данных наблюдений. Стандарты геопро пространственных данных (серия ISO 19100) определяют модели для пространственных объектов, геометрии, топологии, атрибутов; темпоральные аспекты представлены менее развито (ISO 19108), прогнозные данные и неопределённость в стандартах не специфицированы как элементы модели данных.

### 1.2.3. Представление динамических объектов в существующих моделях

Динамические объекты — изменяющие положение, характеристики или отношения во времени — составляют существенную часть содержания

динамических обстановок (Таблица 1.2-2): транспортные средства, перемещающиеся группы, развивающиеся природные явления, эволюционирующие зоны воздействия.

Представление движущихся объектов требует фиксации траектории как последовательности положений во времени. Дискретное хранение координат в моменты регистрации с интерполяцией между ними адекватно при равномерном прямолинейном движении, но приводит к существенным ошибкам при маневрировании. Концепция движущегося объекта как сущности с непрерывной траекторией структурно противоречит дискретному характеру данных наблюдений.

Идентификация объектов во времени представляет фундаментальную проблему. Для объектов с устойчивыми идентификаторами (регистрационные номера, трекары) сопоставление наблюдений не вызывает затруднений; для объектов без идентификаторов — фиксируемых средствами дистанционного зондирования или радиолокации — идентификация опирается на сопоставление характеристик и экстраполяцию положения, а её ошибки приводят к разрыву траекторий, ложному слиянию или разделению объектов [119, 209].

Изменяющиеся атрибуты перестают быть скалярными значениями и становятся функциями времени, что воспроизводит проблему дискретизации на атрибутивном уровне. Объём данных при хранении полной атрибутивной истории растёт пропорционально числу объектов, атрибутов и длительности наблюдения.

Объекты с изменяющейся геометрией — расширяющиеся зоны, эволюционирующие границы, деформирующиеся области — требуют хранения последовательности геометрий с механизмами их сопоставления и интерполяции; морфологический анализ изменений формы представляет самостоятельную методологическую проблему.

Таблица 1.2-2 — Проблемы представления динамических объектов

Тип динамики	Характеристика	Проблемы представления	Типичные решения в существующих ГИС
Перемещение	Изменение положения точечного объекта	Дискретизация траектории, интерполяция	Хранение последовательности координат с временными метками
Идентификация	Сопоставление наблюдений одного объекта	Разрывы траекторий, ошибки сопоставления	Внешние алгоритмы трекинга, ручная верификация
Изменение атрибутов	Эволюция характеристик объекта	Рост объёма данных, дискретизация	Версионирование, хранение истории значений
Изменение геометрии	Трансформация формы и размера	Сложность представления, сопоставления	Последовательность геометрий, специализированные структуры
Появление и исчезновение	Начало и конец существования	Определение моментов, граничные условия	Атрибуты жизненного цикла, событийные модели

Рассмотренные модели имеют существенное общее ограничение: отсутствует прогностическая составляющая — траектория объекта заканчивается последним зарегистрированным положением, её продолжение в будущее не является частью модели; история атрибутов не дополняется ожидаемыми будущими значениями. Темпоральные аспекты топологических и метрических отношений также представлены минимально: запросы о состоянии отношений в заданный момент требуют реконструкции состояния обстановки.

#### **1.2.4. Проблема представления неопределённости и прогнозных состояний**

Геоинформационные модели данных традиционно оперируют определёнными значениями: координаты задаются точными числами [24], атрибуты имеют фиксированные значения, топологические отношения однозначны. Это упрощение реальности, в которой каждое измерение сопряжено с погрешностью, классификация — с неоднозначностью, границы — с размытостью. Для задач анализа динамических обстановок такое

упрощение неадекватно. Источники неопределённости в геопространственных данных многообразны (инструментальная, методическая, неопределённость полноты, семантическая, темпоральная) [9, 73]; подробная типология раскрывается в §2.2.5.

Существующие подходы к представлению неопределённости в ГИС разделяются на три категории. Метаданные качества на уровне набора данных характеризуют общую точность, полноту, согласованность набора в соответствии со стандартами ISO 19157 [149], но не обеспечивают дифференцированной оценки неопределённости для отдельных объектов и значений. Вероятностные представления описывают неопределённость через распределения вероятностей — эллипсы ошибок для координат, интервалы доверия для атрибутов; они информативны, но существенно усложняют модель данных и обработку. Нечёткие представления используют аппарат нечётких множеств для описания размытых понятий и градуальной принадлежности; естественны для семантической неопределённости, но менее распространены в практических ГИС. Параллельно в практике информационно-разведывательных и оперативных систем применяются категориальные шкалы достоверности — например, шкала NATO STANAG 2511 с шестью уровнями надёжности источника от А (полная) до F (не подлежащая оценке) [173]. Существующие шкалы оценивают достоверность источника в момент получения сведения, не дифференцируют достоверность по элементам модели обстановки, не связаны с темпоральной актуальностью и не предусматривают пересмотра по результатам верификации; вопрос формализации категориальной таксономии достоверности, применимой к отдельным элементам модели обстановки и связанной с замкнутым контуром адаптации, остаётся открытым.

Та же ограниченность — недифференцированная оценка на уровне набора данных без привязки к отдельным элементам — характерна для формализации темпоральной актуальности. В темпоральных базах данных и в стандартах качества пространственной информации (ISO 19157, ISO 19108)

устаревание данных моделируется обычно через единый интервал актуальности или экспоненциальное затухание с фиксированным коэффициентом для всего набора. Класс-зависимость устаревания — положение быстро движущегося объекта теряет актуальность за секунды, координаты здания — за годы — в существующих моделях явно не формализована. В представлении полноты описания отдельного объекта стандарты ISO 19157 ограничиваются категориями полноты на уровне набора данных (доля отсутствующих элементов); градуированная оценка полноты каждого объекта модели обстановки остаётся за рамками типовых ГИС-моделей.

Фундаментальной проблемой является отсутствие в существующих моделях данных места для прогнозных состояний как элементов, отличных по статусу от фактических. Прогноз — обоснованное ожидание относительно будущего состояния — имеет иную природу, чем наблюдение: он характеризуется значениями параметров вместе с информационным основанием (какие данные использовались), модельным основанием (какие закономерности применялись), условиями (при каких допущениях сформирован), неопределённостью прогностической, а не измерительной природы. Попытки представить прогнозы в структурах, предназначенных для фактических данных, утрачивают различие между эмпирически подтверждённым знанием и гипотезой, теряют связь прогноза с породившей его моделью, исключают систематическое сопоставление прогноза с последующим фактическим развитием обстановки и использование результатов сопоставления для адаптации моделей.

Специфика неопределённости для прогнозов — её зависимость от горизонта прогнозирования: в отличие от инструментальной неопределённости, прогностическая неопределённость нарастает с увеличением временного интервала до прогнозируемого момента — краткосрочный прогноз может быть достаточно определённым, долгосрочный содержит лишь вероятностные оценки. Существующие пространственно-

временные модели данных структурно ориентированы на прошлое и настоящее, прогнозные состояния не имеют собственного концептуального места. Интеграция прогнозных состояний в геоинформационную модель требует расширения онтологии данных — явного различия эпистемологического статуса элементов, представления неопределённости как обязательного атрибута, механизмов связи прогноза с его основаниями, структур для фиксации результатов верификации — что выходит за рамки модификации существующих моделей и требует пересмотра концептуальных оснований.

### **1.3. Источники геопространственных данных и проблемы их интеграции**

#### **1.3.1. Типология источников геопространственных данных**

Геоинформационное обеспечение анализа обстановки опирается на данные, поступающие от множества источников (Таблица 1.3-1). Источники различаются физическими принципами регистрации, пространственно-временным охватом, характеристиками точности и оперативности. Ни один тип не покрывает всего спектра информационных потребностей — именно поэтому они используются совместно, и именно поэтому возникает задача интеграции.

Классификация строится по нескольким основаниям (Таблица 1.3-1). По физическому принципу регистрации выделяются оптико-электронные системы видимого [1, 62, 66, 69] и ближнего инфракрасного диапазонов, тепловизионные, радиолокационные, лидарные и акустические средства наблюдения; тип регистрируемого сигнала определяет тематическое содержание данных [61, 70, 75]. По типу носителя источники делятся на космические, авиационные, наземные и морские с различными соотношениями охвата, разрешения и периодичности. По режиму функционирования различают системы непрерывного мониторинга, периодические и активируемые по запросу; режим определяет темпоральные

свойства данных — сплошность или дискретность временных рядов, регулярность или случайность моментов наблюдения.

Таблица 1.3-1 — Характеристики основных типов источников геопространственных данных

Тип источника	Пространственный охват	Типичное разрешение	Периодичность	Оперативность
<b>Космические оптические</b>	Глобальный, региональный	0.3–30 м	Сутки–недели	Часы–сутки
<b>Космические радарные</b>	Глобальный, региональный	1–25 м	Сутки–недели	Часы–сутки
<b>Пилотируемая авиация</b>	Региональный, локальный	0.05–0.5 м	По заданию	Часы
<b>БАС</b>	Локальный	0.01–0.1 м	По заданию, непрерывно	Минуты–часы
<b>Стационарные наземные</b>	Точечный	Неприменимо	Непрерывно	Реальное время
<b>Мобильные наземные</b>	Маршрутный	0.01–0.05 м	По заданию	Минуты–часы

По степени управляемости источники располагаются на шкале от полностью управляемых, параметры которых задаются оператором в реальном времени, до полностью автономных, работающих по заложенным программам. Промежуточное положение занимают регламентные и частично автономные системы.

Для анализа динамических обстановок важны не абсолютные характеристики источников, а их отношение к динамике наблюдаемых процессов. Источник с суточной периодичностью пригоден для мониторинга медленных изменений и бесполезен при отслеживании быстрых перемещений. Высокое разрешение при узком охвате не даёт целостной картины территории. Оптимальное информационное обеспечение достигается комбинацией источников с взаимодополняющими характеристиками, и именно в такой комбинации возникает задача интеграции разнородных данных.

### **1.3.2. Беспилотные авиационные системы как источники геопространственной информации**

Беспилотные авиационные системы (БАС) занимают особое место среди источников геопространственных данных (Таблица 1.3-2), сочетая свойства, нехарактерные для традиционных платформ [130, 174, 187]. В отличие от космических систем, БАС обеспечивают высокое пространственное разрешение и оперативную модификацию параметров съемки. В отличие от пилотируемой авиации, они допускают применение в условиях, неприемлемых для экипажа, и экономически доступны для массового использования. В отличие от стационарных датчиков, БАС обеспечивают пространственную мобильность и способность к перенацеливанию.

С позиций геоинформатики принципиальным отличием БАС является реализация парадигмы адаптивного наблюдения. Если космические системы и пилотируемая авиация порождают данные с заранее определенными характеристиками, то БАС позволяют динамически варьировать пространственное разрешение, частоту съемки, ориентацию сенсоров и охват территории в зависимости от текущей обстановки и информационных потребностей. Траектория сбора данных может модифицироваться в процессе выполнения миссии в ответ на результаты анализа поступающей информации.

Многообразие беспилотных платформ охватывает широкий диапазон характеристик (Таблица 1.3-2). Микро- и мини-БАС с массой до нескольких килограммов обеспечивают детальную съемку локальных участков с продолжительностью полета до нескольких десятков минут. Легкие и средние БАС с массой до сотен килограммов способны охватывать значительные территории при многочасовых полетах. Тяжелые БАС приближаются по возможностям к пилотируемой авиации, обеспечивая стратегический охват. Конструктивно различаются мультироторные аппараты, обеспечивающие точное позиционирование и зависание, и аппараты самолетного типа с высокой скоростью и дальностью [16, 131, 199].

Сенсорное оснащение современных БАС включает оптико-электронные камеры высокого разрешения, тепловизионные модули, мультиспектральные и гиперспектральные сенсоры, лидарные сканеры, малогабаритные радары. Мультисенсорные комплексы позволяют получать комплементарную информацию об объектах, однако порождают задачу интеграции данных различной физической природы с различными геометрическими моделями и характеристиками точности.

Переход от одиночных БАС к групповому и роевому применению качественно расширяет возможности сбора данных. Группа БАС обеспечивает параллельное покрытие обширных территорий или одновременное наблюдение объекта с различных ракурсов. Роевые системы с децентрализованной координацией способны адаптивно распределять ресурсы наблюдения по территории. Вместе с тем групповое применение многократно усложняет задачу интеграции данных: потоки от множества источников поступают асинхронно, с различными характеристиками, требуя согласования и объединения.

Таблица 1.3-2 — Характеристики БАС как источников геопространственных данных

Характеристика	Преимущества	Ограничения и проблемы
<b>Пространственное разрешение</b>	Сверхвысокое (до сантиметров)	Ограниченный охват за один вылет
<b>Оперативность</b>	Минуты от запроса до данных	Зависимость от метеоусловий
<b>Гибкость траектории</b>	Адаптация к обстановке в реальном времени	Непредсказуемость характеристик покрытия
<b>Многосенсорность</b>	Комплексная информация	Сложность интеграции разнородных данных
<b>Групповое применение</b>	Параллельный сбор, избыточность	Асинхронность, проблемы координации
<b>Автономность</b>	Независимость от оператора	Непредсказуемость информационного потока

Специфические проблемы использования данных БАС связаны с характеристиками платформы и условиями съемки. Нестабильность носителя — угловые колебания, вибрации, порывы ветра — порождает геометрические искажения, нехарактерные для стабильных платформ. Ограниченная точность

бортовых навигационных систем приводит к накоплению ошибок позиционирования в длительных миссиях. Переменные условия освещения и атмосферы вносят радиометрическую неоднородность в данные. Эти факторы усложняют геопривязку и интеграцию данных БАС с данными других источников.

Для задач анализа динамических обстановок БАС представляют особую ценность как источники оперативной детальной информации, способные концентрироваться на участках повышенного интереса. Вместе с тем их эффективное использование требует решения проблем интеграции с данными других источников, обеспечения прослеживаемости происхождения, оценки неопределённости с учётом специфики платформы.

### **1.3.3. Характеристики распределённых и автономных источников**

Современные системы геоинформационного обеспечения опираются на распределённые совокупности источников [2], работающих в разных режимах и по разным регламентам. Распределённость и автономность порождают специфические свойства информационного потока, существенные именно для задач анализа динамических обстановок.

Распределённость проявляется сразу в нескольких планах. Пространственный план — это размещение источников в различных точках наблюдаемой территории. Организационный план касается принадлежности источников различным ведомствам и системам, действующим по собственным регламентам. Технологический план — разнообразие типов источников с различными физическими принципами регистрации. Автономность описывает степень независимости от централизованного управления: от полностью управляемых через регламентные до автономных, которые принимают решения о параметрах наблюдений на основе бортовых алгоритмов и локально доступной информации.

Вместе распределённость и автономность порождают характерные свойства потока данных (Рисунок 1.3-1). Асинхронность означает, что

наблюдения от разных источников поступают в несогласованные моменты времени; в динамических обстановках это значит, что в любой момент доступные данные относятся к разным моментам прошлого — от только что полученных до существенно устаревших. Неравномерность покрытия выражается в том, что геометрия размещения стационарных датчиков, орбиты спутников и маршруты подвижных носителей определяют частоту и детальность наблюдения участков вне связи с их информационной значимостью.

Важно, что поток от распределённых источников описывается не единой «ошибкой измерения», а сложной структурой неопределённости из качественно различных составляющих. Их отдельный учёт необходим для корректного комплексирования наблюдений и для обоснованной оценки достоверности результата. Далее выделяются четыре типа неопределённости, каждый со своими параметрами и собственными средствами описания.

*Сенсорная неопределённость* обусловлена физическими ограничениями средств регистрации: собственными шумами приёмных трактов, конечным пространственным и радиометрическим разрешением, ложными срабатываниями и пропусками обнаружений. Формально она описывается ковариационными матрицами ошибок измерений, вероятностями правильного обнаружения и ложной тревоги, функциями распределения шума. Её особенность — локальность во времени: она характеризует отдельный акт наблюдения и в первом приближении не накапливается.

*Навигационная неопределённость* отражает погрешности определения пространственного положения и угловой ориентации носителя, на основе которых строится геопривязка сенсорных данных. Сюда входят погрешности средств позиционирования и бортовых навигационных систем, дрейф инерциальных компонент при деградации внешней коррекции, а также погрешности взаимной калибровки сенсоров и навигационных средств — несоосность осей и линейные выносы точек регистрации относительно центра

навигационного решения. Описание ведётся ковариационными матрицами навигационного решения, функциями зависимости погрешности от дальности до объекта, моделями накопления дрейфа. В отличие от сенсорной, навигационная неопределённость имеет кумулятивный характер и способна формировать систематические смещения слоёв данных, ошибочно принимаемые за реальные перемещения объектов.

*Коммуникационная неопределённость* вносится каналами передачи данных от источников к интеграционному контуру. Её составляющие — переменные задержки доставки, невозможность гарантированной передачи в условиях помех, потери и переупорядочение пакетов. Всё это превращает момент поступления наблюдения в случайную величину и порождает неопределённость «возраста» данных, то есть их актуальности в момент обработки. Формальное описание включает распределения задержек, вероятности потерь, оценки рассогласования между моментом регистрации и моментом поступления. Этот тип неопределённости специфичен именно для распределённых систем: в централизованных схемах сбора он отсутствует или пренебрежимо мал.

*Семантическая неопределённость* возникает на уровне интерпретации данных и классификации объектов. Её источники — расхождения ведомственных классификаторов, неоднозначность отнесения одного физического объекта к разным категориям разными сенсорами, неполнота атрибутивных сведений. Описывается она матрицами ошибок классификации, апостериорными распределениями принадлежности к классам, мерами согласованности классификационных решений разных источников. Из четырёх типов семантическая в наименьшей степени поддаётся метрической формализации и требует средств представления знаний.

Четыре типа неопределённости не сводятся друг к другу и не описываются единым скалярным показателем качества данных, у каждого своя динамика: сенсорная меняется с условиями регистрации, навигационная

накапливается или корректируется в зависимости от режима навигационных средств, коммуникационная — с состоянием каналов связи, семантическая зависит от согласованности классификационных схем. Оценка достоверности не задаётся статическим параметром источника — её приходится определять динамически для каждого наблюдения с отдельным учётом составляющих. У автономных источников к этому добавляется непредсказуемость самого информационного потока: решения о параметрах наблюдений принимаются бортовыми алгоритмами, и планирование аналитических процедур исходит из вероятностного характера информационного обеспечения.

Асинхронность, неравномерность покрытия, четырёхкомпонентная структура неопределённости, непредсказуемость автономных источников — совокупность этих свойств определяет сложность задачи формирования целостного представления обстановки. Подходы к интеграции, рассчитанные на объединение заранее известных наборов данных с фиксированными характеристиками, этой задаче не отвечают.

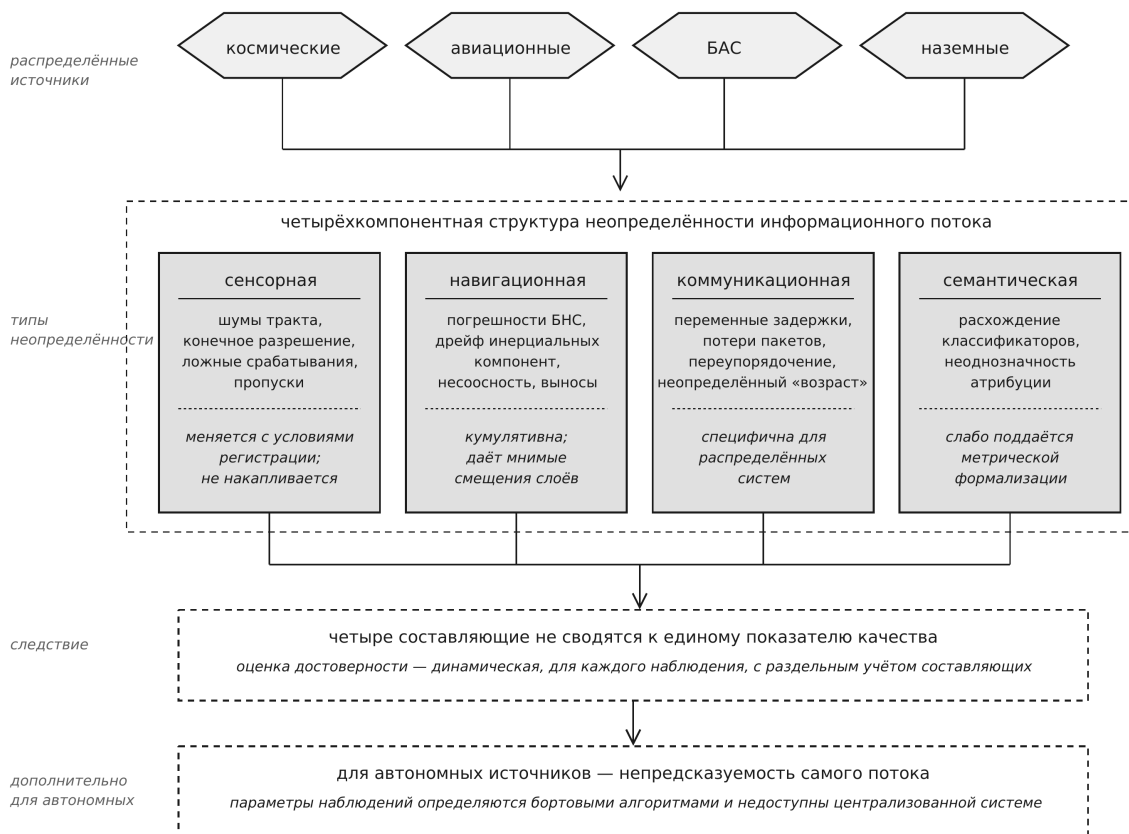


Рисунок 1.3-1 — Характеристики распределённых источников и порождаемые проблемы интеграции

### 1.3.4. Проблемы гетерогенности и отсутствия прослеживаемости при интеграции

Интеграция данных от множества разнородных источников — необходимое условие формирования целостного представления обстановки. Если в §1.3.3 описывалась структура неопределённости на уровне отдельного источника, то здесь рассматриваются проблемы, возникающие в процессе объединения данных от нескольких источников. Гетерогенность проявляется в нескольких качественно различных формах рассогласований — геодезических, временных, сетевых, — характерные величины которых могут быть оценены количественно: при объединении данных, привязанных к различным геодезическим системам отсчёта, без выполнения корректных трансформаций координат смещение между слоями достигает 10–150 метров; рассогласование источников времени составляет от единиц миллисекунд до единиц секунд при динамике объектов в десятки метров в секунду; задержки многошаговой ретрансляции в распределённых сетях составляют десятки–сотни миллисекунд, из-за чего «возраст» поступающих наблюдений оказывается переменным и априори неизвестным. Сводные характеристики типичных рассогласований приведены в Таблице 1.3-3.

Таблица 1.3-3 — Типичные величины пространственно-временных рассогласований при интеграции данных от распределённых источников

Фактор рассогласования	Источник	Типичная величина	Последствие для интеграции
Различие систем отсчёта координат	Использование различных геодезических систем и локальных систем средств позиционирования	10–150 м без трансформации	Принципиальная невозможность комплексирования без приведения к единой системе
Погрешность определения местоположения носителя	Ограниченная точность бортовых навигационных систем, условия наблюдения навигационных сигналов	От единиц сантиметров (в высокоточных режимах) до единиц метров	Определяет достижимую точность геопривязки сенсорных данных

Фактор рассогласования	Источник	Типичная величина	Последствие для интеграции
Погрешность взаимной калибровки сенсоров	Несоосность сенсоров и навигационных средств, линейные выносы точек регистрации	0,1–5 м (растёт с дальностью до наблюдаемого объекта)	Систематическое смещение геопривязанных продуктов
Дрейф средств автономного позиционирования	Накопление ошибок при отсутствии внешней навигационной коррекции	0,1–2 % пройденного расстояния	Прогрессирующее рассогласование данных в длительных миссиях
Различие источников времени	Аппаратные, программные и локальные источники синхронизации	От 1 мс до 1 с	Ошибка ассоциации наблюдений во времени
Задержки доставки по каналам связи	Многошаговая ретрансляция в распределённых сетях передачи данных	10–350 мс	Неопределённый «возраст» наблюдений на момент обработки

Приведённые величины показывают, что проблема интеграции не сводится к вычислительной сложности: даже при неограниченных вычислительных ресурсах объединение данных без отдельного учёта этих составляющих приводит к результату с систематическими ошибками, превышающими характерные размеры анализируемых объектов.

Темпоральное согласование — первая из специальных проблем: в динамической обстановке объекты перемещаются, изменяют характеристики, появляются и исчезают, и обычное решение через выбор референсного момента и интерполяцию основывается на допущениях о характере изменений, для объектов с непредсказуемой динамикой порождающих существенную неопределённость, обычно не оцениваемую. Пространственное согласование упирается в различия разрешения, точности и геометрических моделей: обзорные данные с разрешением в десятки метров несоизмеримы с данными детальной съёмки сантиметрового разрешения; различия в точности геопривязки приводят к систематическим смещениям между слоями, которые

могут ошибочно интерпретироваться как реальные перемещения объектов. Семантическое согласование требует установления соответствий между концептуальными схемами, что не всегда может быть выполнено однозначно. Разрешение конфликтов проявляется при противоречивости данных от различных источников об одних и тех же объектах; стратегии — приоритет источника, усреднение, голосование — выбираются эвристически, без формального обоснования. Сводный обзор проблем интеграции приведён в Таблице 1.3-4.

Таблица 1.3-4 — Проблемы интеграции геопространственных данных от гетерогенных источников

Проблема	Проявление	Типичные решения	Ограничения решений
<b>Темпоральное согласование</b>	Данные относятся к различным моментам	Интерполяция к референсному моменту	Не оценивается неопределённость
<b>Пространственное согласование</b>	Различное разрешение и точность	Приведение к общему разрешению	Потеря информации или мнимая детализация
<b>Семантическое согласование</b>	Различные классификации и терминологии	Таблицы соответствий, трансформация	Неоднозначность соответствий
<b>Разрешение конфликтов</b>	Противоречивые данные об одном объекте	Приоритеты, усреднение, голосование	Отсутствие обоснования выбора
<b>Оценка неопределённости</b>	Интегрированные данные лишены оценок качества	Оценки на уровне набора	Нет дифференциации по элементам
<b>Прослеживаемость</b>	Утрата связи с исходными источниками	Метаданные о источниках	Недостаточная детальность

Проблема прослеживаемости происхождения данных приобретает критическое значение именно при интеграции от гетерогенных распределённых источников. Пока речь идёт об обработке одного источника, связь результата с исходными измерениями сохраняется неявно через последовательность преобразований; в многоисточниковой интеграции эта связь разрывается: каждый элемент результата формируется наблюдениями нескольких источников с различными преобразованиями и эвристическим разрешением конфликтов [114, 125, 126]. В существующих подходах связь фиксируется лишь на уровне метаданных набора [170, 207]; для отдельных

объектов и значений атрибутов невозможно определить, из какого источника получена информация и какие преобразования применялись. Отсутствие прослеживаемости блокирует диагностику: при ошибке в результате интеграции нельзя установить её источник, систематические смещения накапливаются без атрибуции. Для прогнозирования и адаптации моделей это принципиальное ограничение — без прослеживаемости нельзя определить, какой компонент ответственен за расхождение между прогнозом и фактом.

С прослеживаемостью связана проблема неопределённости интегрированных данных: каждая операция интеграции вносит свой вклад — темпоральная интерполяция через допущения о характере изменений, пространственное преобразование через погрешности трансформаций, семантическая унификация через неоднозначность соответствий, разрешение конфликтов через эвристичность стратегий. Четырёхкомпонентная структура неопределённости §1.3.3 при интеграции усложняется; существующие подходы совокупной оценки не дают.

Природа перечисленных проблем — методологическая. Технические улучшения отдельных процедур их не снимают; требуется пересмотр концептуальных оснований интеграции: сохранение информации о происхождении каждого элемента, оценка неопределённости с отдельным учётом составляющих, атрибуция проблем к конкретным источникам и процедурам. Именно эти требования формируют основание метода АИМТПО (расшифровка приведена в §2.1.1), в котором сквозная прослеживаемость является условием адаптации в замкнутом контуре.

## **1.4. Анализ существующих подходов к прогнозированию в геоинформатике**

### **1.4.1. Методы прогнозирования пространственных процессов**

Прогнозирование пространственных процессов разрабатывается на стыке геоинформатики, математического моделирования и предметных дисциплин — гидрологии, метеорологии, транспортного анализа, социально-

экономического моделирования. Для настоящего исследования значимо не многообразие методов, а характер их связи с геоинформационным ядром, в котором формируется пространственно-временная модель обстановки.

Арсенал методов формируется двумя полюсами и пограничной группой. Один полюс — методы, опирающиеся на формальное описание закономерностей: экстраполяционные продолжают выявленные тенденции (линейные, полиномиальные, авторегрессионные) и применимы, пока сохраняется режим процесса; физико-математическое моделирование опирается на уравнения механизмов (гидродинамические, атмосферные, транспортные) и сохраняет объяснительную силу вне области исторических наблюдений ценой точности начальных условий и значительных вычислительных затрат [43, 48]; геостатистические методы (кригинг и его модификации, пространственная авторегрессия, пространственно-временные статистические модели) дают интерполяцию и экстраполяцию полей с оценкой неопределённости [34, 120]. Другой полюс — методы, выявляющие зависимости из самих данных или воспроизводящие процесс через симуляцию: машинное обучение (рекуррентные и свёрточные архитектуры, ансамблевые модели, глубокое обучение) улавливает сложные нелинейные зависимости, но требует больших обучающих выборок и плохо интерпретируется [23, 86]; агентное моделирование воспроизводит процесс через взаимодействие автономных сущностей с эмерджентным поведением на макроуровне. Особое положение занимает сценарный анализ — он формализует альтернативы развития там, где построение количественной модели невозможно, и работает с экспертными предположениями [182]. Сводная классификация методов приведена в Таблице 1.4-1.

Таблица 1.4-1 — Классификация методов прогнозирования пространственных процессов

Класс методов	Концептуальная основа	Требования к данным	Область применимости	Ключевые ограничения
Экстраполяционные	Продолжение тенденций	Временные ряды наблюдений	Стационарные процессы	Неприменимы при смене режима
Физико-математические	Уравнения механизмов	Параметры среды, начальные условия	Процессы с известными механизмами	Вычислительная сложность, требования к данным
Геостатистические	Пространственная автокорреляция	Пространственная выборка	Непрерывные поля	Стационарность, изотропность
Машинное обучение	Выявление зависимостей из данных	Большие обучающие выборки	Сложные нелинейные зависимости	Интерпретируемость, переобучение
Агентное моделирование	Поведение автономных агентов	Правила поведения агентов	Системы с взаимодействующими объектами	Верификация правил, вычислительная сложность
Сценарные	Экспертные предположения	Экспертные оценки	Слабоформализованные ситуации	Субъективность, невозпроизводимость

Перечисленные классы различаются концептуальными основаниями, требованиями к данным и областями применимости. Для геоинформационного обеспечения анализа динамических обстановок важнее общая для них черта: они разрабатываются и реализуются преимущественно в рамках предметных дисциплин, а не геоинформатики как таковой. Геоинформационная система служит по отношению к ним средой подготовки исходных данных и отображения результатов, но не средой, в которой прогноз формируется, верифицируется и уточняется. Дальнейший анализ направлен не на сравнение методов по точности или применимости, а на исследование архитектурных последствий их размещения вне геоинформационного ядра.

#### 1.4.2. Прогнозирование как внешняя функция по отношению к ГИС

Архитектура взаимодействия ГИС и средств прогнозирования в большинстве практических реализаций построена по схеме разделения функций. ГИС хранит, обрабатывает и визуализирует геопространственные

данные; прогнозирование выполняется внешними специализированными системами — гидрологическими моделями, метеорологическими комплексами, транспортными симуляторами, — которые получают данные из ГИС и возвращают результаты для отображения.

Разделение исторически обусловлено специализацией программных средств. Геоинформационные системы развивались как универсальные инструменты работы с пространственными данными, не привязанные к конкретной предметной области (Таблица 1.4-2). Прогностические модели создавались специалистами в предметных областях с использованием специализированных вычислительных средств. Интеграция сводилась к обмену файлами или вызовам через программные интерфейсы, а концептуальное разделение сохранялось.

Информационный поток при таком взаимодействии линеен. Данные о текущем состоянии экспортируются из ГИС, передаются в прогностическую модель, её результаты импортируются обратно в ГИС для визуализации. Каждая передача сопряжена с преобразованием форматов, систем координат, структур данных. На этих преобразованиях теряется или существенно редуцируется метаинформация — связь результата прогноза с исходными данными, параметрами модели, условиями применимости.

Архитектуру взаимодействия удобно записать формально. Пусть  $G$  — геоинформационная система,  $P$  — прогностическая система,  $D$  — данные о текущем состоянии,  $F$  — результат прогнозирования. Цикл описывается последовательностью операций:

$$D \leftarrow \text{export} \text{ --- } G, \quad F \leftarrow \text{predict} \text{ --- } P(D), \quad G \leftarrow \text{import} \text{ --- } F$$

Связь между  $D$  и  $F$  внутри  $G$  при этом не сохраняется: импортированный прогноз оказывается ещё одним слоем данных, не связанным явным отношением с породившими его наблюдениями и моделью.

Таблица 1.4-2 — Характеристики прогнозирования как внешней функции

Аспект	Проявление	Следствия
Архитектурное разделение	ГИС и прогностическая система — независимые компоненты	Сложность интеграции, дублирование данных
Линейный информационный поток	Экспорт → прогноз → импорт	Потеря метаинформации при передаче
Различие моделей данных	Несовместимые структуры представления	Преобразование с потерей семантики
Утрата происхождения	Прогноз отделяется от породившей модели	Невозможность атрибуции результата
Эпизодическое взаимодействие	Прогнозирование — отдельная операция	Невозможность непрерывного цикла
Различие временных масштабов	Прогноз формируется дискретно, обстановка меняется непрерывно	Рассогласование актуальности

Из внешнего характера прогнозирования вытекает концептуальное ограничение: прогноз в ГИС не имеет специального статуса. После импорта прогнозные данные представляются теми же структурами, что и фактические наблюдения. Эпистемологическое различие между эмпирически установленным фактом и модельной гипотезой утрачивается на уровне модели данных. Пользователь может различать прогноз и факт по метаданным или атрибутам, но архитектура системы это различие не поддерживает.

Практическое ограничение — невозможность автоматизированного связывания прогноза с его основаниями: если прогноз оказался неточным, система не позволяет определить, чем это вызвано — ошибками исходных данных, неадекватностью модели или изменением условий. Опыт прогнозирования не транслируется в совершенствование моделей, поскольку систематическое сопоставление прогнозов с фактическим развитием обстановки не предусмотрено. Для задач анализа динамических обстановок, требующих непрерывного прогнозирования с учётом поступающих данных, внешнее размещение прогностической функции создаёт принципиальные ограничения: цикл «наблюдение — прогноз — обновление прогноза» не замыкается автоматически, оперативность ограничивается организационными

и техническими барьерами информационного обмена, а не вычислительными возможностями.

Более тесная интеграция предпринимается в специализированных системах. Гидрологические информационные системы могут включать встроенные модели прогнозирования паводков, транспортные ГИС — модели прогнозирования потоков. Такая интеграция реализуется для конкретной предметной области и не обобщается до уровня архитектурного принципа геоинформационной системы.

### **1.4.3. Отсутствие обратной связи: прогноз не верифицируется системой**

Верификация прогноза — сопоставление прогнозного состояния с фактически реализовавшимся — необходима для оценки качества прогностических моделей и их совершенствования. Метеорологические службы оценивают оправдываемость прогнозов погоды, гидрологические — точность прогнозов уровней воды, транспортные — соответствие прогнозируемых и реальных характеристик потоков; однако эта верификация выполняется вне ГИС, специализированными средствами, и её результаты не транслируются в совершенствование геоинформационного обеспечения. В типичной архитектуре ГИС прогноз, будучи импортирован, существует как статичный слой данных. По мере поступления новых наблюдений база данных пополняется фактической информацией о состояниях, ранее бывших прогнозными; связь между прогнозом и соответствующим фактом система автоматически не устанавливает (Рисунок 1.4-1).

В модели данных отсутствует отношение верификации  $V(F, D')$  между прогнозом  $F$  и фактическим состоянием  $D'$ , где  $D'$  обозначает реализовавшееся состояние, наблюденное на момент, к которому был отнесён прогноз. Элементы для такого отношения — прогнозные и фактические состояния — в базе данных могут присутствовать, однако их сопоставление и формирование оценки архитектурно не предусмотрены. Если сопоставление выполняется, то вручную, эпизодически, вне контура штатного функционирования системы.

Отсутствие автоматической верификации ведёт к накоплению прогнозов без оценки их качества. Система генерирует или импортирует прогнозы, которые используются для поддержки решений, но информация об их ретроспективной точности не накапливается и недоступна. Пользователь, получающий очередной прогноз, не имеет сведений о точности аналогичных прогнозов в прошлом. Доверие к прогнозу опирается на общие представления о надёжности метода, а не на эмпирически подтверждённую статистику для конкретных условий.

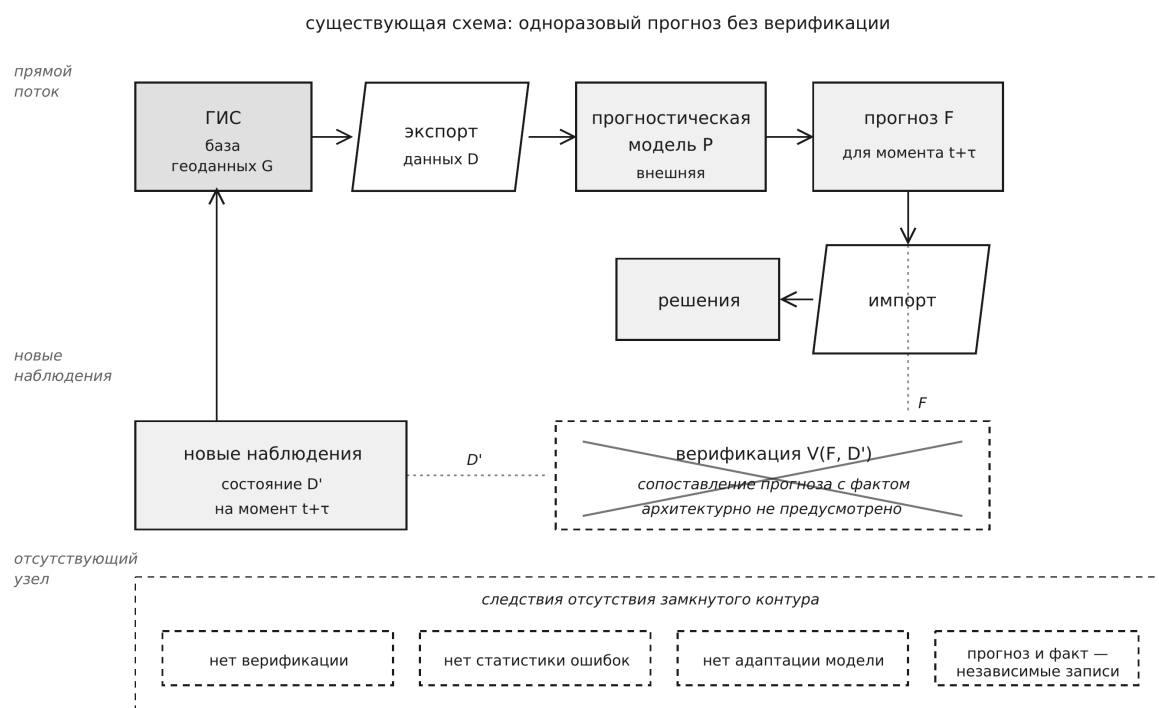


Рисунок 1.4-1 — Разрыв обратной связи в существующей архитектуре прогнозирования

Без верификации не выявляются систематические ошибки: прогностическая модель может устойчиво давать смещённые оценки для определённых условий, и такие смещения не корректируются. Ситуация усложняется для динамических обстановок с множественными прогнозами различных горизонтов: в каждый момент сосуществуют прогнозы, сделанные в различные моменты прошлого; управление таким множеством с отслеживанием статуса каждого прогноза выходит за рамки систем без архитектурной поддержки верификации. Разрыв между потенциальным

качеством прогнозов и их практическим использованием в геоинформационном контуре обнаруживается на уровне обратной связи.

#### **1.4.4. Отсутствие адаптации моделей по результатам прогнозирования**

Адаптация прогностических моделей — корректировка их параметров или структуры на основе выявленных расхождений между прогнозами и фактами — логически продолжает верификацию. Если верификация устанавливает факт и величину расхождения, адаптация использует эту информацию для уменьшения расхождений в последующих прогнозах. В теории управления такой механизм известен как обратная связь по ошибке, в машинном обучении — как дообучение на новых данных, в калибровке моделей — как итеративная настройка параметров [116, 163, 168].

Существующая архитектура взаимодействия ГИС и прогностических систем автоматической адаптации не предусматривает (Рисунок 1.4-2). Даже когда верификация выполняется вручную или полуавтоматически, её результаты не транслируются в модификацию моделей. Модель сохраняется без изменений до следующей ручной перенастройки, которая может выполняться с периодичностью в месяцы или годы.

По глубине вмешательства различаются несколько уровней корректировки моделей. *Параметрическая адаптация* корректирует численные коэффициенты при сохранении структуры модели и применяется при систематическом количественном смещении. *Структурная адаптация* модифицирует состав зависимостей — добавляет ранее неучтённые факторы или изменяет форму связей — и требуется, когда ошибка зависит от факторов, не входивших в исходную модель. *Модельная адаптация* означает замену прогностической модели на альтернативную при выявлении её качественной неадекватности наблюдаемому классу процессов. *Мета-уровневая адаптация* пересматривает сами правила перенастройки — критерии переключения между уровнями, пороги срабатывания, горизонты окон — на основе анализа эффективности предыдущих адаптационных воздействий и применяется в

случаях, когда нижестоящие уровни систематически не справляются с расхождениями. Развёрнутое содержание четырёх уровней — параметрического, структурного, модельного и мета-уровневого, — условия их применения и требования к диагностике расхождений рассматриваются в §2.5 в связи с построением контура адаптации.

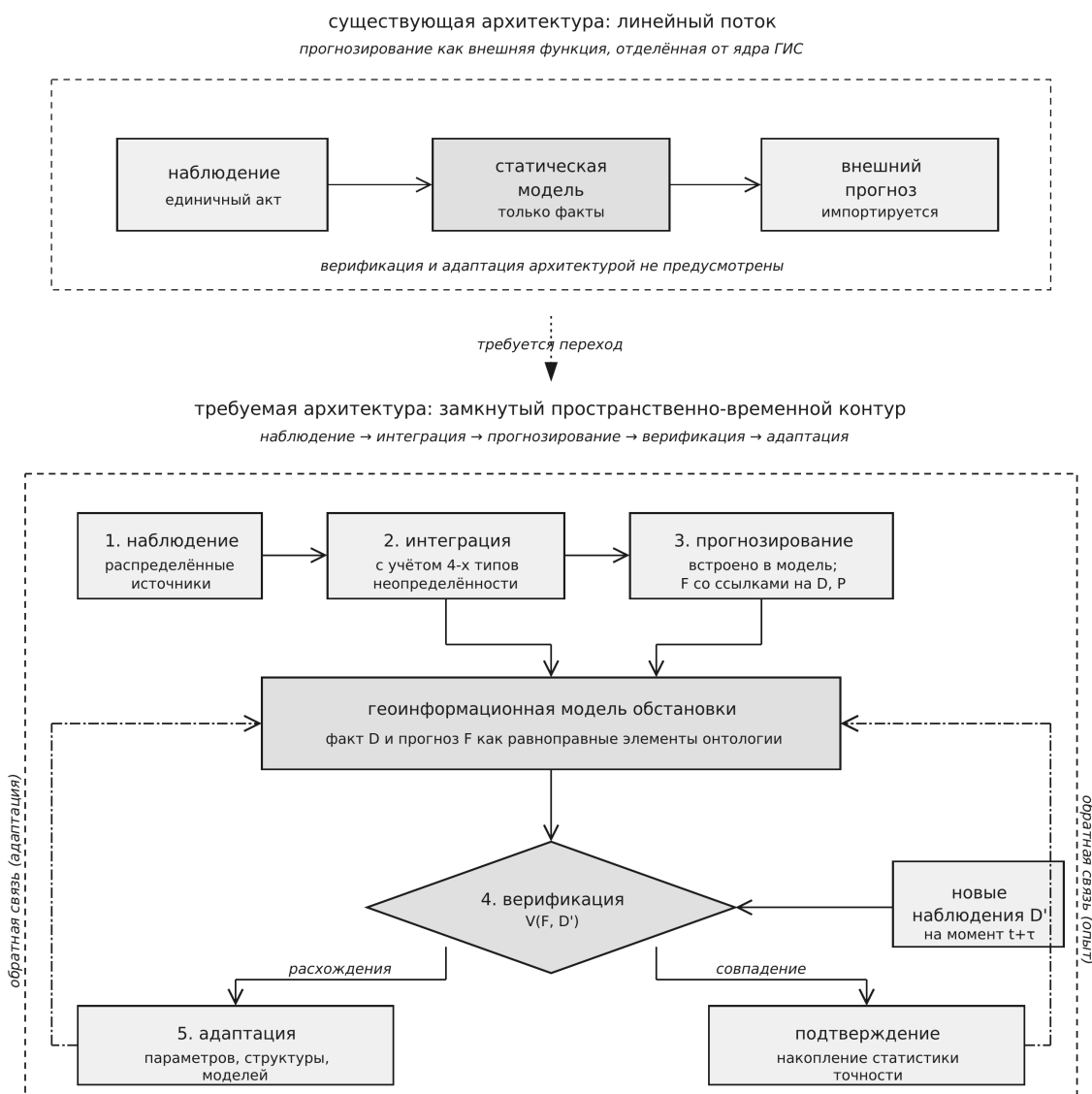


Рисунок 1.4-2 — Сравнение существующего и требуемого контуров прогнозирования

Без адаптации качество прогнозирования деградирует при изменении условий: модель, настроенная для одного режима, применяется в изменившемся без корректировки, и сезонные или долгосрочные изменения обстановки, появление новых типов объектов, переход процесса в иной режим

ведут к утрате адекватности. Замкнутый контур «наблюдение — прогноз — верификация — адаптация» необходим для поддержания качества прогнозирования в изменяющихся условиях; его отсутствие в существующих геоинформационных системах определяет необходимость разработки нового подхода, интегрирующего прогнозирование, верификацию и адаптацию в геоинформационное ядро.

Эти ограничения концептуальны: их источник — устройство архитектуры, а не недостаток вычислительных ресурсов или зрелости отдельных алгоритмов. Модификация существующих систем — добавление прогностических модулей, средств визуализации, журналов сопоставлений — отдельные ограничения адресует, но не снимает их совокупности. Снятие требует иного статуса прогноза в геоинформационной модели: прогноз перестаёт быть импортированным слоем, становится производной геоинформационной величиной с сохранённой связью с породившими её данными и моделью, а сопоставление прогноза с фактом и корректировка модели по результатам сопоставления входят в штатный цикл работы системы. Этим вопросам посвящены последующие разделы.

## **1.5. Геоинформационные системы двойного назначения**

### **1.5.1. Требования к геоинформационному обеспечению ситуационных центров**

Ситуационный центр — организационно-техническая структура, предназначенная для мониторинга обстановки, анализа ситуаций и поддержки принятия управленческих решений при необходимости оперативного реагирования [40, 93, 100]. Ведомственная принадлежность и предметная специализация — управление при чрезвычайных ситуациях, обеспечение транспортной безопасности, координация силовых структур [58, 59], антикризисное управление — задают содержательное наполнение задач; функциональные требования к информационному обеспечению, ядром которого является геоинформационный контур, для перечисленных

направлений общие. Пространственная привязка характерна для большинства анализируемых ситуаций, и геоинформационной составляющей принадлежит в информационном обеспечении центральная роль: размещение сил и средств, зоны ответственности, маршруты перемещений, области воздействия, границы территорий требуют геопространственного представления для адекватного восприятия и анализа.

Требование оперативности задаёт временные рамки информационного обеспечения: латентность данных должна быть соизмерима с характерным временем изменения обстановки — для быстро развивающихся ситуаций режим реального времени с латентностью в минуты или секунды [10, 28]. Полнота охвата достигается интеграцией данных от космических, авиационных и наземных источников, ведомственных информационных систем, средств связи; характеристики источников — модальность сигналов, форматы, частоты обновления — различаются на три–пять порядков [11, 12]. Достоверность обеспечивается верификацией, перекрёстным контролем из независимых источников, оценкой неопределённости для каждого наблюдения. Прогностичность необходима, поскольку лицо, принимающее решение, действует в настоящем, тогда как последствия решения реализуются в будущем [1, 41]. Адаптивность связана с изменчивостью условий: состав источников меняется, характер обстановки эволюционирует, алгоритмы должны совершенствоваться на поступающем потоке. Масштабируемость диктуется диапазоном условий — от локальных инцидентов до крупных ситуаций — и имеет вычислительное и концептуальное измерения. Специфика двойного назначения предполагает инвариантность базовых механизмов относительно предметной области при возможности специализации под конкретные задачи. Сводный перечень требований приведён в Таблице 1.5-1.

Таблица 1.5-1 — Укрупнённые требования к геоинформационному обеспечению ситуационных центров

Категория требований	Содержание	Критические параметры
<b>Оперативность</b>	Минимальная латентность поступления и обработки данных	Секунды–минуты для динамичных ситуаций
<b>Полнота охвата</b>	Интеграция всех релевантных источников	Пространственный и тематический охват
<b>Достоверность</b>	Верифицированность данных, оценка неопределённости	Вероятность ошибки, доверительные интервалы
<b>Прогностичность</b>	Способность предвидеть развитие обстановки	Горизонт и точность прогнозирования
<b>Адаптивность</b>	Способность перестраиваться при изменении условий	Время реконфигурации
<b>Масштабируемость</b>	Работа с различным объёмом данных и территорией	Диапазон масштабов, производительность
<b>Отказоустойчивость</b>	Сохранение работоспособности при сбоях	Время восстановления, резервирование
<b>Интероперабельность</b>	Взаимодействие с внешними системами	Поддерживаемые стандарты и протоколы

Содержательная проработка облика геоинформационного обеспечения требует детализации до конкретных факторов, от которых зависят архитектурные и методологические решения. Систематизация таких факторов выделяет четыре категории — технические, алгоритмические, инфраструктурные и правовые — с указанием степени влияния на архитектуру геоинформационной системы и уровня проработанности в известных решениях (Таблица 1.5-2).

Таблица 1.5-2 — Детализованные факторы, определяющие облик геоинформационного обеспечения, с оценкой влияния и проработанности

№	Фактор	Группа	Влияние	Проработанность
1	Гетерогенность данных от мобильных источников: модальность, форматы, частоты обновления с разбросом на 3–5 порядков	Технические	Критическое	Средняя
2	Пространственно-временное	Технические	Критическое	Средняя

№	Фактор	Группа	Влияние	Проработанность
	рассогласование наблюдений: различие систем координат, источников единого времени, задержек передачи			
3	Ограниченная пропускная способность и нестабильность каналов связи при работе с распределёнными группировками источников	Технические	Высокое	Выше средней
4	Параллельная обработка множества потоков данных с различными приоритетами и характерными временами	Технические	Высокое	Средняя
5	Надёжность и автономность работы мобильных и периферийных узлов при деградации связи с центром	Технические	Высокое	Средняя
6	Комплексирование данных от разнотипных источников на уровнях объектов, событий и ситуаций	Алгоритмические	Критическое	Низкая
7	Оценка достоверности наблюдений и выявление противоречий в данных от нескольких независимых источников	Алгоритмические	Критическое	Низкая
8	Отождествление объектов по наблюдениям из различных каналов: пространственно-временная ассоциация	Алгоритмические	Высокое	Средняя
9	Автоматическое формирование агрегированной модели обстановки в пространственно-временном представлении	Алгоритмические	Высокое	Низкая

№	Фактор	Группа	Влияние	Проработанность
10	Включение алгоритмов распознавания на мобильных источниках в контур обработки с непрерывным совершенствованием моделей по поступающим данным	Алгоритмические	Высокое	Низкая
11	Иерархическая архитектура обработки с адаптивным распределением функций между уровнями (мобильный источник — периферийный узел — центр)	Инфраструктурные	Критическое	Низкая
12	Единое хранилище геоданных со сквозной трассировкой от первичного наблюдения до итогового решения	Инфраструктурные	Высокое	Низкая
13	Интеграция с внешними информационными системами в событийной и запросной моделях	Инфраструктурные	Высокое	Средняя
14	Стандартизация протоколов информационного и функционального взаимодействия	Инфраструктурные	Высокое	Средняя
15	Информационная безопасность: управление доступом, контроль целостности, защита моделей и данных	Инфраструктурные	Критическое	Средняя
16	Отсутствие стандартов для межведомственных группировок источников и для включения обучаемых моделей в контур принятия решений	Правовые	Среднее	Низкая
17	Разнородность ведомственных требований к обмену геопространственной информацией и её защите	Правовые	Высокое	Низкая

Распределение факторов по влиянию и проработанности выявляет зону нерешённых методологических задач — факторы с критическим или высоким влиянием при низкой или средней проработанности: комплексирование разнородных наблюдений (№ 6), оценка достоверности при несогласованных источниках (№ 7), автоматическое формирование пространственно-временной модели обстановки (№ 9), включение обучаемых алгоритмов распознавания в контур с механизмом совершенствования (№ 10), иерархическая архитектура с адаптивным распределением функций (№ 11), сквозная прослеживаемость от первичного наблюдения до принятого решения (№ 12). Нерешённые задачи сосредоточены в алгоритмической и инфраструктурной группах — и именно это делает задачу методологической: разрозненные технологические улучшения её не закрывают, нужна согласованная геоинформационная основа интеграции, прогнозирования и адаптации в замкнутом контуре. Содержание соответствующих разрывов рассматривается в §1.5.2–§1.5.3.

### **1.5.2. Обзор существующих геоинформационных систем и платформ**

Современный рынок геоинформационных технологий включает широкий спектр систем и платформ, различающихся архитектурой, функциональностью и целевым назначением. Анализ с позиций требований к ситуационным центрам ведётся в двух ортогональных сечениях: по типу платформы и по функции в контуре работы с данными от мобильных источников.

Универсальные ГИС-платформы (ArcGIS, QGIS, MapInfo и аналоги) предоставляют развитые средства хранения, редактирования, анализа и визуализации геопространственных данных, изначально ориентированные на статичные или медленно меняющиеся данные; работа в реальном времени поддерживается через расширения, прогностические функции в ядре отсутствуют [77, 80]. Специализированные отраслевые системы (для транспорта, энергетики, экологии, управления территориями) реализуют [94] прогностические возможности для профильных задач, но не допускают

применения для задач иного профиля без существенной переработки [42, 47, 76]. Системы диспетчерского управления и сбора данных (SCADA) обеспечивают мониторинг и управление техническими объектами в реальном времени, но геоинформационный компонент в них представлен мнемосхемами и упрощёнными картами; основная задача — контроль параметров и управление, а не анализ обстановки. Системы мониторинга транспорта на основе ГЛОНАСС/GPS отслеживают перемещения с визуализацией на картографической основе, но аналитические возможности ограничены анализом траекторий и интеграция с иными источниками затруднена.

Военные геоинформационные системы разрабатываются с учётом специфических требований (работа в условиях противодействия, защита информации, интеграция с системами управления и связи); доступные источники указывают на их преимущественную ориентацию на отображение обстановки и планирование при меньшем внимании к автоматизированному прогнозированию и адаптации моделей [6, 7, 17]. Платформы ситуационных центров объединяют геоинформационный компонент с видеонаблюдением, оповещением, средствами коммуникации; визуализация на картографической основе — центральная функция, но прогностические возможности, если реализованы, ориентированы на конкретные типы ситуаций и не обладают универсальностью [91, 138]. Облачные геоинформационные сервисы обеспечивают масштабируемость и доступность, но ограничены зависимостью от каналов связи, вопросами информационной безопасности и недостаточной адаптируемостью к специфическим требованиям. Соответствие классов требованиям тактического прогнозирования обстановки приведено в Таблице 1.5-3.

Таблица 1.5-3 — Соответствие существующих классов геоинформационных платформ требованиям тактического прогнозирования обстановки

<b>Класс платформ</b>	<b>Примеры</b>	<b>Работа в реальном времени</b>	<b>Интеграция гетерогенных источников</b>	<b>Встроенное прогнозирование</b>	<b>Верификация прогнозов</b>	<b>Адаптация моделей</b>	<b>Представление неопределённости</b>
Универсальные ГИС-платформы	ArcGIS, QGIS, MapInfo	Частично	Частично	Нет	Нет	Нет	Нет
Специализированные отраслевые системы	Отраслевые ГИС	Да	Ограниченно	Для профильных задач	Нет	Нет	Частично
Системы SCADA с геокомпонентом	Промышленные SCADA-ГИС	Да	Ограниченно	Для профильных задач	Нет	Нет	Частично
Системы мониторинга транспорта	Транспортные платформы	Да	Да	Для профильных задач	Нет	Ограниченно	Частично
Военные геоинформационные системы	Боевые ГИС, системы управления войсками	Да	Да	Для профильных задач	Частично	Ограниченно	Частично
Платформы ситуационных центров	Ситуационные платформы	Да	Да	Для профильных задач	Частично	Ограниченно	Частично

Рассмотренные платформы ориентированы на работу с геопространственными данными вне зависимости от природы их источников. Ситуационный центр двойного назначения предъявляет дополнительные требования, связанные с функционированием мобильных источников геоданных как интегральной части геоинформационного контура. В этом измерении существующие решения распределяются по трём функциональным классам, каждый из которых закрывает лишь часть задач: системы управления

мобильными источниками (QGroundControl и функционально сходные платформы) обеспечивают телеметрию, приём видеопотока, планирование маршрутов, управление одиночным источником или небольшой группой, но не решают задачи формирования агрегированной модели обстановки [16, 200]; системы комплексной обработки разведывательной и мониторинговой информации функционально ближе к ситуационному центру и реализуют интеграцию данных от множества источников, но устойчиво характеризуются централизованной архитектурой, ориентацией на пост-обработку с участием оператора, специализацией под конкретные предметные области и закрытыми форматами [89, 90]; коммерческие платформы геопространственной обработки (фотограмметрические пакеты) обеспечивают качественную обработку материалов дистанционного зондирования, но работают исключительно в режиме пост-обработки с характерными временами от минут до часов и не интегрируются с контурами управления распределёнными группировками [85, 188]. Сравнение функциональных классов с требованиями ситуационного центра приведено в Таблице 1.5-4.

Таблица 1.5-4 — Сравнение функциональных классов систем работы с мобильными источниками геоданных

<b>Критерий</b>	<b>Системы управления источника ми</b>	<b>Системы комплексной обработки разведывательной информации</b>	<b>Коммерческие платформы геопространственной обработки</b>	<b>Требования ситуационного центра</b>
Работа в реальном времени	Телеметрия — да, комплексная обработка — нет	Частично, с задержкой на минуты	Нет, пост-обработка (минуты–часы)	Да, с адаптивной латентностью по классам задач
Число одновременно обслуживаемых источников	Единичные, малые группы (3–5)	Десятки, опосредованно через операторов	Неприменимо (оффлайн)	Десятки–сотни, в том числе в режиме распределённой группировки

<b>Критерий</b>	<b>Системы управления источника ми</b>	<b>Системы комплексной обработки разведывательной информации</b>	<b>Коммерческие платформы геопространственной обработки</b>	<b>Требования ситуационного центра</b>
Мультидоменная интеграция (разнородная среда: воздух, земля, акватория)	Нет	Частично	Нет	Обязательна
Автоматическое комплексирование наблюдений	Нет	Ограниченное, с участием оператора	Нет	Автоматическое, в замкнутом контуре
Распределённая обработка (мобильный источник, периферийный узел, центр)	Нет	Нет	Нет	Обязательна, с адаптивным распределением функций
Обучаемые алгоритмы распознавания и их совершенствование в контуре	Нет	Экспериментально	Частично, вне контура управления	Обязательны, с непрерывным совершенствованием на поступающих данных
Событийная модель взаимодействия	Нет	Нет	Нет	Шина событий с поддержкой запросной модели
Сквозная трассировка «наблюдение → обработка → решение»	Нет	Частичная	Нет	Обязательна как системное свойство

Результаты сравнительного анализа показывают, что ни один из рассмотренных классов платформ не закрывает совокупности требований к геоинформационному обеспечению ситуационных центров. Разрывы

распределены по классам неравномерно, и простая комбинация существующих решений их не восполняет: архитектурные основания, на которых построен каждый класс, с архитектурными основаниями других классов несовместимы.

### **1.5.3. Критический анализ: соответствие требованиям тактического прогнозирования обстановки**

Сопоставление возможностей существующих геоинформационных систем с требованиями к обеспечению анализа динамических обстановок выявляет системный разрыв между потребностями и доступными решениями. Разрыв качественный: дело не в недостаточной производительности или ограниченной функциональности отдельных компонентов, а в отсутствии концептуальной основы, которая позволяла бы встроить прогнозирование, верификацию и адаптацию в геоинформационное ядро.

Работа с динамическими данными в существующих системах ведётся преимущественно как расширение статической модели: поток данных от источников реального времени обрабатывается и визуализируется, однако темпоральная структура не становится первичным элементом, история копится как последовательность снимков, связи между состояниями объекта в разные моменты времени устанавливаются внешними процедурами. Интеграция гетерогенных источников поддерживается на уровне приведения форматов и систем координат — проблемы темпорального согласования, оценки сравнительной достоверности, разрешения конфликтов, сохранения прослеживаемости (раздел 1.3) системного решения в существующих платформах не получают.

Принципиально не закрытыми существующими классами систем остаются три направления. Мультидоменная интеграция — согласованное представление и обработка наблюдений в средах различной природы (воздушной, наземной, акваториальной) — требует геоинформационного представления, в котором среда служит атрибутом контекста, а не границей

подсистем; в существующих решениях каждая среда обслуживается собственной подсистемой с собственными моделями данных, и связь между ними реализуется только на уровне агрегированных выходов, что исключает единый трекинг объекта, переходящего между средами. Сквозная трассировка информационных потоков — архитектурное свойство, при котором каждое производное состояние сохраняет ссылку на порождающие его наблюдения, модели и допущения — в большинстве систем замещена фрагментарным логированием; без неё ретроспективный анализ принятых решений, верификация прогнозов на новых данных и целенаправленное совершенствование алгоритмов становятся невозможными [143, 171, 172, 204]. Адаптивное распределение функций между уровнями иерархии обработки в существующих системах фиксируется на этапе проектирования; реальные условия — переменный состав источников, нестабильное качество каналов связи, меняющийся характер обстановки — требуют динамического перераспределения вычислительной нагрузки между мобильным источником, периферийным узлом и центром.

Таблица 1.5-5 — Критический анализ существующих геоинформационных решений

<b>Требование</b>	<b>Состояние в существующих системах</b>	<b>Характер разрыва</b>
<b>Пространственно-временная модель</b>	Время как атрибут, не как измерение	Концептуальный
<b>Интеграция источников</b>	Форматное преобразование без семантики	Методологический
<b>Мультидоменная интеграция</b>	Изолированные подсистемы по средам	Методологический
<b>Прогнозирование</b>	Внешняя функция, не элемент модели	Архитектурный
<b>Верификация прогнозов</b>	Не предусмотрена архитектурой	Архитектурный
<b>Адаптация моделей</b>	Ручная периодическая настройка	Методологический

Требование	Состояние в существующих системах	Характер разрыва
Представление неопределённости	Метаданные набора, не элемента	Концептуальный
Замкнутый контур	Линейный поток без обратной связи	Архитектурный
Сквозная трассировка	Фрагментарная, на уровне логирования	Архитектурный
Адаптивное распределение функций	Фиксировано при проектировании	Архитектурный
Двойное назначение	Специализация под область применения	Методологический

Прогностические возможности существующих систем сводятся к трём способам с известными ограничениями: интеграции с внешними моделями (сохраняющей внешний характер прогнозирования — §1.4), встроенным отраслевым моделям (работающим только в своей предметной области), экстраполяционным функциям (применимым к простейшей динамике без существенных нелинейностей). Верификация и адаптация в архитектуре существующих систем не представлены как стандартные функции; отдельные специализированные системы могут включать средства оценки качества прогнозов, но эти средства не интегрированы с геоинформационным ядром и не замыкают контур обратной связи. Непрерывное совершенствование алгоритмов распознавания и прогностических моделей на поступающих данных, выполняемое в единой архитектуре с сохранением прослеживаемости, ни в одном из рассмотренных классов не обнаруживается. Представление неопределённости ограничено уровнем метаданных наборов данных: стандарты качества геопространственных данных (ISO 19157) определяют категории качества, но их представление для отдельных объектов и значений не стандартизировано.

Проблема двойного назначения в существующих системах обходится созданием отдельных версий для гражданского и военного применения либо конфигурированием универсальной платформы под конкретную область — подлинной инвариантности ни один путь не даёт. При этом решаемые задачи

— разведка и наблюдение в оборонном контексте, мониторинг критической инфраструктуры, реагирование на чрезвычайные ситуации в гражданском — при всей разнице предметного содержания структурно однородны на уровне геоинформационных операций: интеграция наблюдений от разнородных источников, формирование пространственно-временной модели обстановки, прогнозирование её развития, поддержка решений [45, 47]. Структурная общность делает построение инвариантного геоинформационного метода в принципе возможным; различия предметного содержания заставляют такой метод разрабатывать, а не ограничиваться частными решениями.

Существующие геоинформационные системы и платформы не обеспечивают комплексного решения задачи тактического прогнозирования обстановки: отдельные требования разные классы систем удовлетворяют частично, но интегрированного решения, объединяющего пространственно-временное моделирование, интеграцию гетерогенных источников, прогнозирование, верификацию и адаптацию в замкнутом контуре, среди существующих платформ нет. Выявленный разрыв методологический, а не технологический: базы геоданных, средства визуализации, прогностические модели, обучаемые алгоритмы — существуют и развиваются, отсутствует концептуальная основа, объединяющая их в систему с архитектурно обеспеченной обратной связью, сквозной трассировкой и адаптивным распределением функций. Разработка такой основы — геоинформационного метода, встраивающего прогнозирование и адаптацию в ядро геоинформационного процесса, — составляет центральную задачу исследования. Инвариантность относительно области применения достигается тем, что метод оперирует абстракциями достаточно общего уровня — пространственным объектом, динамическим процессом, неопределённостью как самостоятельным свойством данных, — а специализация сводится к параметризации и конфигурированию.

## 1.6. Выводы по главе 1

Проведённый анализ теоретических основ и существующих подходов к геоинформационному обеспечению пространственно-временного анализа обстановки позволяет систематизировать выявленные ограничения, сформулировать научную проблему исследования и обосновать направления её решения.

### Сводка выявленных ограничений

Анализ §1.5.2 формирует сравнительную типологию классов геоинформационных платформ (Таблица 1.5-3) и функциональных классов систем работы с мобильными источниками (Таблица 1.5-4), ни один из которых не закрывает совокупности требований к геоинформационному обеспечению ситуационных центров.

Критический анализ пяти аспектов геоинформационного обеспечения показал, что ограничения существующих подходов имеют общий концептуально-методологический источник — связанную систему пробелов на трёх уровнях (концептуальном, методологическом, архитектурном), распределённую по четырём областям геоинформатики: моделям пространственно-временных данных (§1.2), источникам данных (§1.3), методам прогнозирования (§1.4) и архитектурным решениям распределённых ГИС (§1.5). Ни одна из областей не преодолевается изолированно: разработка прогностических методов без архитектурной поддержки замкнутого контура воспроизводит архитектурный разрыв; адаптация архитектуры без онтологического места прогностических состояний — концептуальный.

Концептуальный уровень (§1.1, §1.2). Традиционные ГИС и пространственно-временные модели данных построены для работы с прошлым и настоящим. Время в них — атрибут актуальности записи. Прогностические состояния не имеют собственного онтологического места в модели; неопределённость фиксируется для набора данных в целом, без

дифференциации по отдельным объектам и без учёта её зависимости от горизонта прогноза.

Методологический уровень (§1.3). Принципы интеграции, сложившиеся для однородных источников, не переносятся на гетерогенный информационный поток от распределённых сенсорных платформ. Темпоральное и пространственное согласование выполняются без отдельной оценки вносимой неопределённости; семантическое согласование опирается на экспертные правила без формального обоснования. Прослеживаемость происхождения для отдельных элементов данных не сохраняется, и расхождения между прогнозом и фактом невозможно атрибутировать конкретному источнику или процедуре.

Архитектурный уровень (§1.4, §1.5). Прогнозирование остаётся внешней по отношению к ГИС функцией. Связь прогноза с породившей его моделью при передаче между системами теряется. Верификация и адаптация по результатам применения архитектурно не предусмотрены — замкнутый контур «наблюдение — прогноз — верификация — адаптация» не реализован ни в одной из рассмотренных платформ двойного назначения. Инвариантность относительно области применения заменяется конфигурированием под конкретную предметную область.

Три уровня проблемы связаны: без онтологического места прогнозов в модели данных корректное представление прогностического знания методологически недостижимо; без прослеживаемости в интеграции верификация лишается диагностической базы; без обоих условий архитектурное замыкание контура невозможно. Систематизация ограничений приведена в таблице 1.6-1.

Таблица 1.6-1 — Систематизация выявленных ограничений

Область анализа	Ключевые ограничения	Характер проблемы
Концепция ГИС (§1.1)	Ориентация на статичные данные; время как атрибут	Концептуальный

Модели данных (§1.2)	Отсутствие места для прогнозов; ограниченное представление неопределённости	Концептуальный
Интеграция данных (§1.3)	Потеря прослеживаемости; неадекватное согласование	Методологический
Прогнозирование (§1.4)	Внешний характер; отсутствие верификации	Архитектурный
Адаптация (§1.4, §1.5)	Отсутствие механизмов; статичность моделей	Архитектурный
Системы двойного назначения (§1.5)	Специализация вместо инвариантности	Методологический

### **Констатация научного противоречия**

В §1.1–§1.5 детально раскрыто противоречие между требованиями к геоинформационному обеспечению пространственно-временного анализа динамических обстановок и методологическим аппаратом, доступным сегодня в геоинформатике. Противоречие имеет концептуально-методологическую, а не технологическую природу. Базы геоданных, средства визуализации, прогностические модели и алгоритмы распознавания развиваются самостоятельными линиями; концептуальной основы, которая связывала бы их в систему с обратной связью и сквозной прослеживаемостью, в действующей методологии геоинформатики нет.

### **Обоснование направлений исследования**

Для преодоления обнаруженных ограничений требуется методологический аппарат, работающий сразу на трёх уровнях — концептуальном, модельном и архитектурном. Соответствие между ограничениями и разрабатываемыми методами показано в таблице 1.6-2.

Таблица 1.6-2 — Соответствие разрабатываемых методов выявленным ограничениям

<b>Ограничение (§ главы 1)</b>	<b>Разрабатываемый метод / раздел работы</b>	<b>Ожидаемый результат</b>
--------------------------------	--	----------------------------

Линейная архитектура без замкнутого контура (§1.1, §1.5)	Концепция адаптивно-интегрированного метода (гл. 2)	Принципы АИМТПО
Отсутствие места прогнозов в модели данных (§1.2)	Модель динамической обстановки с представлением неопределённости (гл. 2)	Структура геоинформационной модели
Потеря прослеживаемости при интеграции (§1.3)	Принципы пространственно-временной интеграции гетерогенных источников (гл. 2)	Система принципов интеграции
Внешний характер прогнозирования (§1.4)	Типология и принципы геоинформационного прогнозирования (гл. 2)	Формализованное описание прогнозного контура
Отсутствие адаптации моделей (§1.4, §1.5)	Механизмы верификации и адаптивного уточнения (гл. 2)	Замыкание контура адаптации
Специализация вместо инвариантности (§1.5)	Архитектура распределённой ГИС ситуационного центра (гл. 3)	Инвариантная архитектура с замкнутым контуром
Отсутствие оценки качества прогнозирования (§1.4)	Система метрик тактического прогнозирования обстановки (гл. 4)	Методика оценки эффективности

В главе 2 разрабатывается концепция метода, модель динамической обстановки, принципы интеграции гетерогенных источников, прогнозный контур и механизмы верификации и адаптивного уточнения моделей; этим закрываются концептуальные и методологические пробелы и снимается архитектурный разрыв, при котором прогнозирование остаётся внешней функцией. Глава 3 содержит архитектуру распределённой ГИС ситуационного центра межведомственного назначения, реализующую разработанный метод на архитектурном уровне. Глава 4 представляет систему метрик и методику многофакторной оценки эффективности с экспериментальным подтверждением работоспособности предложенных решений.

## **ГЛАВА 2. МЕТОДОЛОГИЯ АДАПТИВНО-ИНТЕГРИРОВАННОГО ТАКТИЧЕСКОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОБСТАНОВКИ**

### **2.1. Концепция и принципы метода АИМТПО**

#### **2.1.1. Методологическая проблема пространственно-временного прогнозирования в геоинформатике**

Научное противоречие, развёрнутое в §1.6, фиксирует разрыв трёх уровней — концептуального, методологического и архитектурного — между требованиями к геоинформационному обеспечению пространственно-временного анализа динамических обстановок и аппаратом, доступным в современной геоинформатике. Преодоление этого разрыва требует не точечных усовершенствований существующих компонентов, а методологического ответа, переопределяющего отношение между прогнозом и фактом, между моделью и наблюдением, между интеграцией данных и адаптацией представлений.

Методологическая проблема формулируется так: существующий концептуальный аппарат геоинформатики не обеспечивает представления прогнозных состояний как полноправных элементов геоинформационной модели обстановки, не предусматривает механизмов систематического сопоставления прогнозных и фактических пространственно-временных состояний и не реализует замкнутого контура, в котором результаты такого сопоставления транслируются в эволюцию геоинформационных представлений. Все три отсутствия имеют общий источник — ориентацию аппарата на эмпирически подтверждённое прошлое и настоящее с вынесением прогноза за рамки геоинформационной модели; их преодоление невозможно путём совершенствования алгоритмов прогнозирования, наращивания вычислительных мощностей или программной интеграции существующих компонентов и требует пересмотра методологических оснований.

Решение проблемы состоит в разработке геоинформационного метода, в рамках которого анализ, прогнозирование и верификация образуют единый методологически согласованный цикл; прогнозные состояния включаются в геоинформационную модель с эксплицитным представлением их эпистемологического статуса и неопределённости; расхождения между прогнозом и наблюдением систематически используются для адаптации моделей; пространственно-временная неоднородность и асинхронность источников данных учитываются как существенные факторы достоверности геоинформационных представлений. Предлагаемый метод обозначается далее как метод адаптивно-интегрированного тактического прогнозирования обстановки (метод АИМТПО) — геоинформационный метод пространственно-временного анализа, реализующий методологическую программу адаптивно-интегрированного тактического прогнозирования обстановки. Дальнейшее изложение раскрывает метод через пять взаимосвязанных компонентов: принцип замкнутого пространственно-временного контура, геоинформационную модель обстановки с включением прогнозных состояний, пространственно-временную интеграцию разнородных данных, геоинформационное прогнозирование и сценарный анализ, адаптацию моделей в замкнутом контуре. Разработка метода АИМТПО составляет центральную задачу настоящего исследования.

### **2.1.2. Принцип замкнутого пространственно-временного контура**

Преодоление методологической проблемы (§2.1.1) предполагает введение принципа замкнутого пространственно-временного контура как базового методологического основания метода АИМТПО. Существующие геоинформационные системы реализуют преимущественно разомкнутую схему обработки данных, в которой информационный поток направлен от источников через аналитические процедуры к потребителю без систематической обратной связи, корректирующей модели по сопоставлению ожидаемых и наблюдаемых состояний.

Понятие замкнутого контура заимствуется из теории автоматического управления, где обозначает систему с обратной связью: выходные параметры сопоставляются с заданными значениями, выявленные рассогласования используются для корректирующих воздействий. В геоинформационном контексте замкнутый пространственно-временной контур — методологический принцип, при котором прогнозные пространственно-временные состояния систематически сопоставляются с последующими наблюдениями, а результаты сопоставления транслируются в адаптацию геоинформационных моделей, прогностических процедур и стратегий сбора данных. От классической верификации прогнозов контур отличается непрерывным и интегрированным характером: сопоставление выполняется в каждом цикле функционирования, результаты сохраняются как часть геоинформационной модели, адаптация выполняется инкрементально.

Текущее состояние обстановки в рамках предлагаемого метода формально представляется как

$$S_t = \langle O_t, A_t, R_t, C \rangle, \quad (2.1)$$

где  $O(t)$  — множество пространственных объектов обстановки с их геометрией;  $A(t)$  — совокупность значений атрибутов объектов (идентификационные, классификационные, динамические характеристики), изменяющихся во времени;  $R(t)$  — пространственные и функциональные отношения между объектами;  $C$  — контекстные условия (географическая среда, инфраструктура, ограничения), рассматриваемые как инвариантные на характерном интервале анализа.

Содержательная формулировка контура включает пять этапов: наблюдение, интеграция, прогнозирование, верификация, адаптация. Формальная развёртка объединяет наблюдение и интеграцию в единое преобразование «регистрация фактического состояния  $S(t + \Delta t)$ », предполагающее интеграцию данных по правилам §2.3. Пятиэтапная и четырёхэтапная записи описывают один и тот же контур на разных уровнях

абстракции. Структурно замкнутый пространственно-временной контур включает четыре функционально различных компонента: формирование прогнозного состояния, регистрацию фактического состояния, вычисление рассогласования и адаптацию моделей. Структурное представление контура и потоки информации между его компонентами показаны на Рисунке 2.1-1.

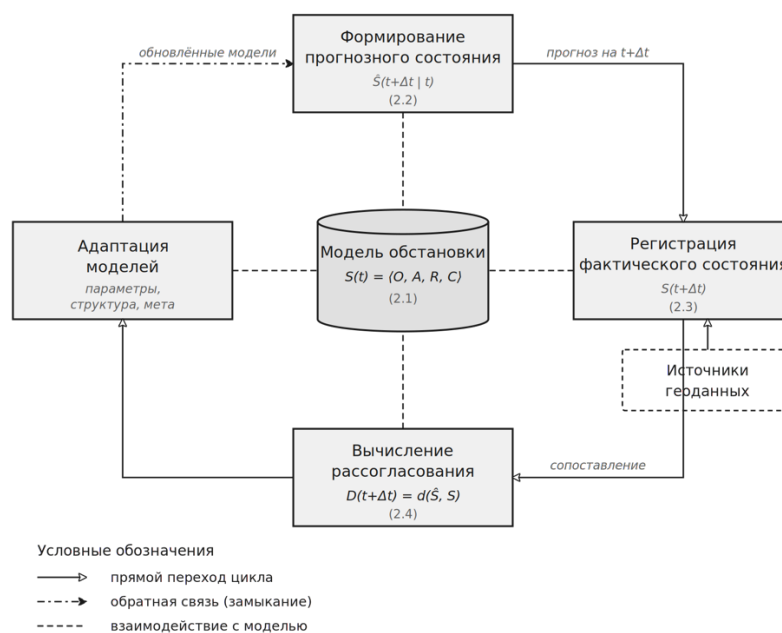


Рисунок 2.1-1 — Замкнутый пространственно-временной контур метода АИМТПО.

Формирование прогнозного состояния. Компонент строит геоинформационное представление ожидаемой обстановки на заданный будущий момент; результат выражается в терминах, сопоставимых с представлением фактических данных. Прогнозное состояние на момент  $t + \Delta t$  при информации, доступной в момент  $t$ :

$$\hat{S}(t + \Delta t | t) = \langle \hat{O}(t + \Delta t | t), \hat{R}(t + \Delta t | t), \hat{U}(t + \Delta t | t) \rangle, \quad (2.2)$$

где  $\hat{O}(t + \Delta t | t)$  — множество прогнозируемых пространственных объектов с их геометрией; прогнозные значения атрибутов  $\hat{A}(t + \Delta t | t)$  и пространственных отношений  $\hat{R}(t + \Delta t | t)$  сопровождают объекты как составляющие прогнозного состояния, структурно соответствующие компонентам  $A(t)$  и  $R(t)$  формулы (2.1);  $\hat{U}(t + \Delta t | t)$  — оценки

неопределённости по каждому элементу прогноза. В записи (2.2) атрибуты и отношения объединены с объектами в свёрнутой форме; при необходимости каждая компонента раскладывается покомпонентно  $(\hat{O}, \hat{A}, \hat{R})$  аналогично четырёхкомпонентной структуре (2.1). Индексация « $t + \Delta t \mid t$ » фиксирует условный характер прогноза: представление момента  $t + \Delta t$  при информационных условиях момента  $t$ .

Регистрация фактического состояния. Компонент опирается на совокупность источников геопространственных данных и процедуры их первичной обработки. В замкнутом контуре принципиальна сопоставимость наблюдений с прогнозным представлением. Фактическое состояние на момент  $t + \Delta t$ :

$$S(t + \Delta t) = \langle O(t + \Delta t), R(t + \Delta t), V(t + \Delta t) \rangle, \quad (2.3)$$

где  $V(t + \Delta t)$  — характеристики неопределённости наблюдений, обусловленные ограничениями источников данных и процедур обработки. Структурно (2.3) соответствует (2.1): объекты  $O(t + \Delta t)$  включают зафиксированные наблюдением геометрические и атрибутивные характеристики,  $R(t + \Delta t)$  — наблюдаемые пространственные отношения,  $V(t + \Delta t)$  занимает место компоненты неопределённости. Атрибуты и отношения объединены с объектами в свёрнутой форме; контекстные условия  $S$ , инвариантные на характерном интервале анализа, опускаются и наследуются из (2.1). Компонента неопределённости присутствует в обоих состояниях — и это не техническая деталь: сопоставление двух неопределённых величин методологически отличается от сравнения прогноза с «истинным» значением.

Вычисление рассогласования. Компонент составляет центральный элемент замкнутого контура, определяющий информационную основу для адаптации. Рассогласование между прогнозным и фактическим состояниями не сводится к скалярной мере ошибки и имеет пространственно-атрибутивную структуру: несовпадение координат, различие геометрической формы, расхождение атрибутивных значений, несоответствие топологических

отношений, структурные различия (наличие объектов в прогнозе, отсутствующих в наблюдениях, и наоборот). Формализация рассогласования требует определения метрики на пространстве геоинформационных состояний:

$$D(t + \Delta t) = d(\hat{S}(t + \Delta t | t), S(t + \Delta t)), \quad (2.4)$$

где  $d$  — функция расстояния, учитывающая геометрические, атрибутивные и структурные компоненты несовпадения с учётом неопределённостей сопоставляемых состояний. Выбор адекватной метрики представляет самостоятельную методологическую задачу, решение которой зависит от характера моделируемой обстановки и целей геоинформационного обеспечения.

Адаптация моделей. Компонент использует структурированное рассогласование для модификации элементов геоинформационной системы — параметров прогностических моделей, правил интерпретации данных, весовых коэффициентов источников, пороговых значений процедур распознавания. Накопление истории рассогласований позволяет выявлять систематические закономерности в ошибках прогнозирования — пространственную локализацию, зависимость от типа объектов, связь с условиями наблюдения — и использовать их для целенаправленного совершенствования системы. Концептуальное введение в адаптивный компонент дано в §2.1.4; механизмы реализации, многоуровневая структура и критерии устойчивости раскрываются в §2.5.

Замкнутый контур изменяет онтологический статус прогноза. В разомкнутых схемах прогноз есть внешний продукт, формируемый аналитической подсистемой; его дальнейшая судьба остаётся за пределами геоинформационной системы. В замкнутом контуре прогноз становится элементом геоинформационной модели, сохраняемым в базе данных наряду с наблюдениями, связанным с последующими фактическими состояниями отношением верификации и участвующим в формировании адаптивных

корректировок. Реализация принципа требует расширения функциональной архитектуры — хранилища прогнозных состояний с контекстом их формирования, механизма сопоставления с учётом неопределённостей обеих сторон сравнения, подсистемы адаптации, транслирующей структурированные рассогласования в корректировки параметров и моделей.

### **2.1.3. Прогноз как элемент геоинформационной модели**

Принцип замкнутого пространственно-временного контура, обоснованный в предыдущем разделе, предполагает, что прогнозные состояния обстановки сохраняются в геоинформационной системе, сопоставляются с последующими наблюдениями и участвуют в адаптации моделей. Реализация этого принципа требует решения фундаментального вопроса о способе представления прогноза в структурах геоинформационной модели. Традиционные модели пространственных данных (векторные, растровые, объектно-ориентированные) разработаны для описания наблюдаемых состояний географической реальности и не предусматривают явного представления неизвестных, гипотетических или прогнозируемых состояний. Включение прогноза в геоинформационную модель как полноправного элемента требует расширения онтологических оснований и концептуальной структуры пространственных данных.

Эпистемологическое различие между наблюдением и прогнозом [173] состоит в характере обоснования соответствующих утверждений о пространственных объектах. Наблюдение фиксирует результат взаимодействия сенсорной системы с реальностью: утверждение о наличии объекта с определёнными координатами и атрибутами обосновывается данными, полученными от источника геопропространственной информации. Прогноз формулирует ожидание относительно будущего состояния, основанное на знании о закономерностях развития обстановки и текущих условиях: утверждение о будущем наличии объекта обосновывается логическим выводом из модели, а не непосредственной регистрацией.

Различие принципиально и не может быть устранено повышением точности прогнозирования или совершенствованием моделей. Прогноз всегда остаётся гипотезой, подлежащей верификации, тогда как наблюдение при всех ограничениях его достоверности есть эмпирический факт.

В традиционных геоинформационных моделях это различие не эксплицируется. Пространственные объекты характеризуются геометрией, атрибутами и временными метками, однако не содержат указания на способ получения информации — прямое наблюдение, интерполяцию между наблюдениями, экстраполяцию за пределы фактического периода или теоретический вывод из модели. Метаданные, описывающие происхождение данных, относятся к наборам данных в целом и не обеспечивают дифференциации эпистемологического статуса отдельных объектов. Прогнозные данные, поступающие в геоинформационную систему от внешних моделей, утрачивают свою специфику: они хранятся и обрабатываются так же, как наблюдения, что приводит к смешению гипотез и фактов в аналитических результатах.

Включение прогноза в геоинформационную модель требует введения эпистемологического атрибута, явно маркирующего статус каждого пространственного объекта. Минимально необходимо разделение фактических, интерполированных, экстраполированных и прогнозных объектов. Фактические объекты соответствуют зарегистрированным данным с известными характеристиками источника. Интерполированные объекты восстановлены на основе пространственной или временной интерполяции между наблюдениями. Экстраполированные объекты получены продолжением фактических тенденций за пределы охваченного данными периода. Прогнозные объекты сформированы на основе моделей, описывающих механизмы развития обстановки. Классификация не является исчерпывающей и может расширяться в зависимости от специфики предметной области, однако она фиксирует принципиальную неоднородность содержимого геоинформационной модели по критерию обоснованности.

Вторая существенная характеристика прогнозного объекта — его неопределённость. В отличие от погрешности наблюдения, которая оценивается по метрологическим характеристикам источника данных, неопределённость прогноза имеет комплексную природу и включает несколько относительно независимых компонентов. Позиционная неопределённость описывает ограниченную точность предсказания пространственного положения объекта. Атрибутивная неопределённость описывает диапазон возможных значений свойств объекта. Темпоральная неопределённость описывает неточность предсказания момента наступления прогнозируемого состояния. Структурная неопределённость описывает возможность альтернативных конфигураций обстановки: наличия или отсутствия объектов, различных вариантов их взаимного расположения и связей.

Интеграция прогноза в геоинформационную модель порождает дополнительные требования к архитектуре системы управления пространственными данными. Требуются расширенные схемы данных, поддерживающие многокомпонентную неопределённость, эпистемологическую маркировку и двумерную темпоральную индексацию; механизмы версионирования, обеспечивающие сосуществование множественных сценариев и сохранение истории прогнозов; реализованные связи между прогнозными объектами и их провенансом, между прогнозами и результатами верификации, между сценариями и условиями их формирования; язык запросов с поддержкой фильтрации по эпистемологическому статусу, агрегации с учётом неопределённости и сценарных операций. Совокупность перечисленных требований определяет специфику геоинформационных систем, ориентированных на работу в режиме замкнутого пространственно-временного контура.

Концептуальное расширение геоинформационной модели для включения прогноза как полноправного элемента имеет значение, выходящее за рамки технической модификации структур данных. Оно означает признание

того, что геоинформационная система работает с зафиксированной реальностью и с обоснованными ожиданиями относительно её развития. Прогноз перестаёт быть внешним продуктом, потребляемым системой, и становится её внутренним содержанием, подлежащим хранению, анализу, верификации и использованию для совершенствования моделей. Такая трактовка согласуется с расширенным пониманием геоинформатики как науки о пространственных данных и о пространственном знании, включающем эмпирически обоснованные факты и логически выведенные следствия из принятых моделей.

#### **2.1.4. Адаптивное уточнение модели**

Включение прогноза в геоинформационную модель как полноправного элемента создаёт информационную основу для систематического сопоставления ожидаемых и наблюдаемых состояний обстановки. Само по себе накопление результатов верификации не обеспечивает совершенствования геоинформационного обеспечения: необходим механизм, транслирующий выявленные расхождения в целенаправленные модификации моделей, процедур и параметров системы. Этот механизм составляет содержание адаптивного уточнения, понимаемого как эволюция геоинформационных представлений на основе собственного опыта функционирования системы. В настоящем подразделе адаптивное уточнение вводится как концептуальный компонент метода; механизмы реализации детально раскрываются в §2.5.

Расхождение между прогнозным и фактическим состояниями обстановки — не просто сигнал ошибки. Это структурированный информационный объект, несущий сведения о характере и источниках неадекватности используемых моделей, о пространственно-временных условиях, при которых модели утрачивают применимость, о систематических смещениях и случайных вариациях в прогностических оценках. Преобразование этих сведений в корректирующие воздействия замыкает

контур, введённый в §2.1.2: выход контура, рассогласование  $D(t + \Delta t)$ , становится входом процедуры адаптации, результат которой модифицирует модели, формирующие последующие прогнозы  $\hat{S}(t + \Delta t' | t')$  при  $t' > t$ . Без такой трансляции сопоставление прогноза и факта остаётся пассивной регистрацией качества, не влияющей на функционирование системы.

В методе АИМТПО адаптивное уточнение рассматривается как непрерывный автоматизированный процесс, интегрированный в операционный цикл геоинформационной системы. Это отличает его от традиционной калибровки прогностических моделей, выполняемой исследователем эпизодически, и согласуется с логикой замкнутого контура: каждый цикл «прогноз — наблюдение — сопоставление» порождает инкрементальное воздействие на систему, накопление которых формирует её эволюционную траекторию. Объект адаптации — геоинформационная система как целое, совокупность взаимосвязанных моделей, процедур и параметров. Прогностическое расхождение может быть порождено различными компонентами системы: моделью динамики, исходными данными, процедурами интерпретации, параметрами интеграции. Атрибуция источника расхождения входит в содержание адаптивного процесса, а не предшествует ему как самостоятельная задача.

Адаптация имеет многоуровневый характер, определяемый глубиной воздействия на компоненты геоинформационной системы. Выделяются параметрический уровень (численные значения коэффициентов моделей, пороги классификации, весовые факторы источников), структурный уровень (правила интерпретации данных, алгоритмы агрегации, схемы интерполяции), модельный уровень (закономерности, описывающие динамику объектов и процессов) и метауровень (оценки надёжности компонентов, границы применимости моделей, характеристики неопределённости прогнозов). Каждый уровень характеризуется собственными механизмами воздействия, темпоральными масштабами и требованиями к информационному обеспечению. Детальное рассмотрение механизмов каждого уровня, процедур

диагностики источников расхождений, критериев устойчивости адаптивного процесса и его темпоральной организации составляет предмет §2.5; в настоящем подразделе уровни упоминаются как обязательный атрибут адаптации, без раскрытия их содержания.

Методологическое значение адаптивного уточнения для геоинформатики состоит в переходе от парадигмы геоинформационной системы как хранилища и инструмента обработки данных к парадигме системы как носителя эволюционирующего пространственного знания. Такое знание воплощается в настроенных параметрах, откалиброванных моделях, выявленных закономерностях ошибок, оценках надёжности компонентов — наряду с накопленными данными как таковыми. Оно формируется в процессе функционирования и составляет специфический актив, не сводимый к исходному программному обеспечению и данным. Адаптивно уточняемая геоинформационная модель — результат взаимодействия формальной структуры, эмпирических данных и опыта прогнозирования, который обеспечивает более адекватное представление пространственно-временной реальности по мере работы системы.

#### **2.1.5. Распределённые и автономные источники геопространственных данных в методе АИМТПО**

Принципы замкнутого контура (§2.1.2–2.1.4) предполагают доступность геопространственных данных [202], обеспечивающих и формирование прогнозов, и их верификацию. Современные системы мониторинга опираются на распределённые и автономные источники, типология которых разобрана в §1.3. В методологии АИМТПО эти источники трактуются не как внешний поставщик данных, а как элементы единой геоинформационной системы, функционирование которых подчинено логике замкнутого контура и одновременно обеспечивает регистрацию обстановки, верификацию прогнозов и адаптацию моделей.

Информационный вклад источников в обеспечение замкнутого контура формализуется через понятие информационного покрытия. Для элемента пространства-времени  $(x, y, t)$  и информационной потребности  $\varphi$  (тип данных, требуемое разрешение, допустимая неопределённость) информационное покрытие определяется как характеристика обеспеченности этой потребности совокупностью источников:

$$\Gamma(x, y, t, \varphi) = F(\{s_i : (x, y, t) \in \Omega_i, Q_i(x, y, t) \models \varphi\}), \quad (2.5)$$

где  $\Omega_i$  — пространственно-временная область покрытия  $i$ -го источника;  $Q_i$  — характеристики качества его данных;  $F$  — функция агрегации, учитывающая взаимодополняемость и избыточность источников. Анализ распределения  $\Gamma$  позволяет выявлять информационные лакуны, оценивать качество обеспечения различных компонентов замкнутого контура, обосновывать решения о модификации конфигурации источников.

Адаптивное управление источниками замыкает контур на уровне информационного обеспечения [116, 168]. Пространственное распределение расхождений, выявляемых при верификации прогнозов, идентифицирует зоны повышенной неопределённости, где дополнительные наблюдения наиболее ценны. Для управляемых источников эта информация транслируется в команды перенацеливания, для автономных — через модификацию параметров бортовых алгоритмов или приоритетов координации. Обратная связь от аналитической подсистемы к источникам данных формирует ещё один цикл замыкания, дополняющий основной цикл «прогноз — наблюдение — адаптация модели».

### 2.1.6. Выводы по подразделу 2.1

Изложенные методологические основания задают содержание метода АИМТПО.

1. В концептуальном аппарате геоинформатики выявлен методологический разрыв: прогнозные состояния не имеют устоявшегося

онтологического статуса, а сопоставление прогноза и факта не организовано как систематический компонент геоинформационного процесса. Разрыв не преодолевается программной интеграцией внешних прогностических модулей.

2. Введён принцип замкнутого пространственно-временного контура, связывающий формирование прогноза  $\hat{S}(t + \Delta t | t)$ , регистрацию фактического состояния  $S(t + \Delta t)$ , вычисление рассогласования  $D(t + \Delta t)$  и адаптацию моделей в единый цикл, интегрированный в операционное функционирование геоинформационной системы.

3. Прогноз трактуется как полноправный элемент геоинформационной модели — с эксплицитной эпистемологической маркировкой и многокомпонентной неопределённостью (позиционной, атрибутивной, темпоральной и структурной).

4. Сформулирован принцип адаптивного уточнения по расхождениям «прогноз — факт» с многоуровневой структурой (параметрический, структурный, модельный, мета-уровень); механизмы и критерии устойчивости раскрываются в §2.5.

5. Распределённые и автономные источники геопространственных данных рассматриваются как элементы единой системы, функционирование которой подчинено логике замкнутого контура. Для формализации их вклада введено понятие информационного покрытия  $\Gamma(x, y, t, \varphi)$  — обобщённой характеристики обеспеченности информационных потребностей метода.

6. Показана инвариантность методологического ядра относительно предметной области: задачи боевых и гражданских ситуационных центров изоморфны как геоинформационные задачи и различаются предметным наполнением.

7. Определены границы применимости метода и место в системе геоинформационных методов — интегрирующая надстройка, организующая применение существующих методов пространственного анализа,

моделирования и интеграции данных в рамках замкнутого пространственно-временного контура.

## 2.2. Геоинформационная модель динамической обстановки

### 2.2.1. Концепция геоинформационной модели обстановки в методе АИМТПО

Принципы метода АИМТПО, сформулированные в подразделе 2.1, реализуются только при наличии формализованного представления обстановки. В его терминах выполняются аналитические операции, фиксируются прогнозы и регистрируются наблюдения.

Замкнутый пространственно-временной контур, адаптивное уточнение по расхождениям, интеграция данных от распределённых источников предполагают такое представление как обязательное условие. Геоинформационная модель обстановки — структурное и концептуальное основание, на котором разворачиваются компоненты метода АИМТПО.

Понятие геоинформационной модели требует отграничения (Таблица 2.2-1) от смежных понятий геоинформатики.

Таблица 2.2-1 — Соотношение геоинформационной модели обстановки со смежными понятиями

Понятие	Ограничение в контексте АИМТПО
Модель данных (растровая, векторная, объектная)	Не определяет семантику, динамику и правила эволюции представления
Картографическая модель	Ориентирована на визуальное представление, а не на прогнозирование
База геоданных	Хранилище пространственных данных без интеграции прогнозных и фактических состояний
Геоинформационная модель обстановки	Формализованное описание пространственно-временного состояния, объединяющее структуры данных, правила интерпретации и эволюции

Центральное понятие модели — состояние обстановки: совокупность сведений о пространственных объектах, их характеристиках, взаимном расположении и отношениях, актуальных для заданного момента.

$$S_t = \langle O_t, A_t, R_t, C \rangle, \quad (2.6)$$

где  $O_t$  — множество пространственных объектов, существующих в момент  $t$ ;  $A_t$  — множество значений атрибутов;  $R_t$  — множество отношений между объектами;  $C$  — контекстные условия (географическая среда, инфраструктура, ограничения), рассматриваемые как инвариантные на характерном интервале анализа.

На концептуальном уровне модель выполняет пять функций, каждой из которых соответствует компонент замкнутого контура: интеграционную (объединение данных от множества источников в согласованное представление), прогностическую (формирование и хранение прогнозных состояний как элементов единой структуры), верификационную (сопоставление прогнозных состояний с последующими наблюдениями), адаптационную (трансляция результатов верификации в модификации модели) и архивную (сохранение истории состояний, прогнозов и верификаций).

Объектная структура модели определяется онтологией предметной области. На концептуальном уровне выделяются универсальные категории элементов: объекты, состояния, события, процессы.

Модель не является статической структурой, заполняемой данными. Поступление новых наблюдений модифицирует текущее состояние и способно пересмотреть ретроспективные оценки. Формирование прогнозов расширяет модель в направлении будущего. Верификация меняет статус прогнозов и запускает адаптивные воздействия. Адаптация, в свою очередь, изменяет параметры и правила функционирования.

Такая непрерывная эволюция и есть содержание модели как живого представления обстановки, а не архива исторических данных.

### **2.2.2. Онтологическая структура: объекты, состояния, события, процессы**

Модель из подраздела 2.2.1 требует формализации внутренней структуры на уровне базовых категорий сущностей и отношений между ними.

Такая формализация составляет онтологию модели — явную спецификацию концептуализации предметной области: какие типы сущностей признаются существующими, какими свойствами обладают, в какие отношения могут вступать. Онтология задаёт категориальный каркас, инвариантный относительно конкретного содержания обстановки.

Для метода АИМТПО онтология удовлетворяет требованиям, вытекающим из принципов замкнутого контура. Модель представляет и статические характеристики обстановки, и её динамику — закономерности изменений и возможные траектории развития. Модель допускает сосуществование фактических и прогнозных представлений, различающихся эпистемологическим статусом. Модель обеспечивает сопоставление состояний, разделённых во времени, для целей верификации прогнозов.

Именно эти требования определяют выбор базовых онтологических категорий.

Анализ существующих подходов (Таблица 2.2-2) в геоинформатике выявляет несколько конкурирующих концептуализаций пространственно-временной реальности.

Таблица 2.2-2 — Онтологические подходы к представлению пространственно-временных данных

Подход	Базовая категория	Ограничения для АИМТПО
Объектно-ориентированный	Дискретные объекты с идентичностью	Сложность представления непрерывных полей
Натурный (field-based)	Непрерывные распределения значений	Сложность выделения дискретных сущностей
Событийный	Дискретные события (occurrences)	Недостаточность для устойчивых объектов
Процессный	Протяжённые процессы	Сложность формализации
Интегрированный (АИМТПО)	Объекты, состояния, события, процессы	Требует согласования категорий

Интегрированный подход, принятый в настоящем исследовании, опирается на четыре базовые категории: объект, состояние, событие, процесс. Каждая категория определяется через отношения с другими и занимает свою нишу в представлении динамической обстановки.

Категория «Объект». Объект есть сущность, обладающая устойчивой идентичностью во времени и способная изменять положение и свойства при сохранении самотождественности. Идентичность фиксируется идентификатором, отделяющим объект от других сущностей и позволяющим связывать разновременные наблюдения как относящиеся к одному и тому же объекту. Формально:

$$o = \langle id, type, \tau_o, history \rangle, \quad (2.7)$$

где  $id$  — идентификатор;  $type$  — тип из принятой типологии;  $\tau_o = [t\_birth, t\_death]$  — интервал существования;  $history$  — история состояний.

Категория «Состояние». Состояние — совокупность характеристик объекта или обстановки в целом, отнесённых к моменту или интервалу времени. Если объект несёт идентичность сущности во времени, то состояние фиксирует её конкретные свойства в заданный момент.

Состояние объекта:

$$s_o(t) = \langle o, t, g_t, a_t, u_t \rangle, \quad (2.8)$$

где  $g_t$  — геометрическое представление в момент  $t$ ;  $a_t$  — вектор значений атрибутов;  $u_t$  — характеристики неопределённости. Состояние обстановки — совокупность состояний всех объектов:

$$S_t = \{s_{o_i}(t) : o_i \in O_t\}, \quad (2.9)$$

Различие типов состояний по эпистемологическому статусу критично для функционирования замкнутого контура.

Категория «Событие». Событие — дискретное явление, локализованное в точке пространства и моменте времени, мгновенное или краткосрочное по сравнению с масштабом анализа. От объекта событие отличается отсутствием устойчивой идентичности: оно происходит и завершается. От состояния — тем, что представляет не характеристику сущности, а само явление как таковое:

$$e = \langle type, t_e, g_e, participants, attributes, \varepsilon \rangle, \quad (2.10)$$

где  $type$  — тип события;  $t_e$  — момент (или краткий интервал);  $g_e$  — пространственная локализация;  $participants$  — множество объектов-участников;  $\varepsilon$  — эпистемологический статус.

Категория «Процесс». Процесс — протяжённое во времени изменение, обладающее направленностью, внутренней структурой и закономерностями развития. От события процесс отличается протяжённостью и разделением на фазы. От последовательности состояний — тем, что представляет само изменение как явление с собственной структурой и закономерностями:

$$p = \langle type, \tau_p, O_p, \phi, \pi, \varepsilon \rangle. \quad (2.11)$$

где  $\tau_p = [t\_start, t\_end]$ ;  $O_p$  — множество вовлечённых объектов;  $\phi: \tau_p \rightarrow \Phi$  — функция текущей фазы;  $\pi$  — параметры интенсивности, скорости, направленности.

Для метода АИМТПО процессы ценны как объекты прогнозирования: знание текущей фазы и параметров позволяет прогнозировать развитие, моменты фазовых переходов, условия завершения.

Интеграция категорий. Четыре базовые категории образуют связную онтологическую структуру, в которой каждая категория задаётся через отношения с другими. Эти отношения сведены в матрицу (Таблица 2.2-3).

Таблица 2.2-3 — Матрица отношений между онтологическими категориями

Категория	Объект	Состояние	Событие	Процесс
Объект	Тождество, различие, сходство	Характеризуется состояниями	Участвует в событиях	Вовлечён в процессы
Состояние	Принадлежит объекту	Предшествование, следование	Изменяется событиями	Трансформируется процессами
Событие	Имеет участников-объекты	Разграничивает состояния	Каузальные связи между событиями	Иницирует или завершает процессы
Процесс	Охватывает объекты	Порождает последовательность состояний	Содержит события как точки перехода	Включение, параллельность, последовательность

Матрица отношений — инвариантный слой онтологии. Она сохраняется при переходе к любой конкретной предметной области, тогда как содержание категорий (типология объектов, событий, процессов) специализируется.

Разделение инвариантного и специализируемого — методологическая основа переносимости метода АИМТПО.

Онтологическая структура задаёт единообразное представление разнородных аспектов динамической обстановки и основу для компонентов замкнутого контура. Интеграция данных происходит через отнесение поступающей информации к категориям и установление связей с существующими элементами модели. Прогнозирование дифференцируется по категориям: для объектов прогнозируются траектории и эволюция характеристик, для событий — вероятность и параметры наступления, для процессов — динамика развития и моменты фазовых переходов. Верификация выполняется путём сопоставления прогнозных и фактических элементов каждой категории с учётом специфики сравнения. Адаптация корректирует модели динамики, правила идентификации событий, закономерности развития процессов по выявленным расхождениям.

### **2.2.3. Представление фактических и прогнозных состояний в единой модели**

Онтологическая структура из подраздела 2.2.2 определяет категории сущностей и отношения между ними. Для замкнутого пространственно-временного контура этого недостаточно: необходимо определить, каким образом в рамках единой структуры сосуществуют представления различного эпистемологического статуса.

Центральная проблема — совместное представление фактических состояний, полученных от источников геопространственной информации, и прогнозных состояний, сформированных моделированием динамики обстановки. Её решение — условие функционирования механизмов верификации и адаптации, образующих ядро метода АИМТПО.

Традиционные геоинформационные системы ориентированы на данные единого эпистемологического статуса — фактические сведения, полученные в результате наблюдений, измерений, съёмки. Временная координата в них — атрибут, маркирующий момент регистрации или период актуальности. Прогнозная информация, если используется, обрабатывается внешними средствами и поступает в ГИС как готовый продукт, формально неотличимый от фактических данных.

Отсюда характерный набор методологических проблем: стирается различие между эмпирически подтверждённым знанием и обоснованным ожиданием; связь прогноза с породившими его данными непротслеживаема; отсутствует механизм систематического сопоставления прогнозов с последующими наблюдениями.

Метод АИМТПО преодолевает это ограничение включением прогнозных состояний в модель как полноправных элементов, обладающих явно выраженной спецификой. Прогнозное состояние не просто описывает характеристики объектов в некоторый будущий момент — оно фиксирует обоснованное ожидание, сформированное на основе определённых данных, моделей и допущений. Обусловленность прогноза должна быть представлена в структуре модели: это делает возможным ретроспективный анализ прогнозов и корректную интерпретацию результатов верификации.

Фактическое состояние характеризуется пространственно-временной локализацией, связью с источниками данных, оценкой неопределённости и включением в историю фактического ряда.

Прогнозное состояние при структурном сходстве с фактическим обладает принципиально иными характеристиками. Оно относится к моменту, ещё не наступившему на момент его формирования. Неопределённость прогнозного состояния определяется прогностической моделью, породившей ожидание, и фактическими состояниями, послужившими основой прогнозирования. К источникам данных она отношения не имеет: её природа

— ограниченность предсказательной способности модели, а не погрешности измерений.

До наступления прогнозируемого момента состояние существует как актуальное ожидание; после верификации переходит в историю прогнозов с зафиксированным результатом сопоставления.

Совместное представление фактических и прогнозных состояний в единой модели требует явной эпистемологической маркировки каждого элемента — бинарного разделения «факт/прогноз» для этого недостаточно. Фактические состояния разделяются на непосредственно зарегистрированные источниками и реконструированные интерполяцией или слиянием данных. Прогнозные различаются по типу породившей их модели, горизонту прогнозирования и сценарным допущениям. Особую категорию образуют верифицированные прогнозы — состояния, первоначально прогнозные, впоследствии сопоставленные с фактическими данными и получившие оценку расхождения.

Операционная реализация эпистемологической маркировки: таксономия достоверности.

Маркировка как качественный атрибут недостаточна для практики. Каждому элементу должен соответствовать числовой показатель достоверности и определённое множество допустимых действий, которые этот показатель санкционирует.

Для этого в модель вводится шкала достоверности  $\rho \in [0; 1]$  и шестикатегорийная таксономия, проецирующая непрерывный показатель на дискретные режимы обработки (Таблица 2.2-4).

Таблица 2.2-4 — Категории достоверности элементов модели обстановки

Категория	Диапазон $\rho$	Допустимые действия
Достоверные	[0,80 – 1,00]	Автоматические решения, экспорт в эталонную базу геоданных, использование как основы прогнозирования
Вероятные	[0,63 – 0,79]	Автоматические решения с флагом неопределённости, расширенные доверительные границы производных оценок

Категория	Диапазон $\rho$	Допустимые действия
Сомнительные	[0,37 – 0,62]	Только мониторинг, запрет автоматических решений
Противоречивые	конфликт источников	Блокировка использования, генерация события «противоречие данных», передача в процедуру разрешения конфликтов
Маловероятные	[0,20 – 0,36]	Исключение из принятия решений, ослабленная визуализация
Ложные	[0,01 – 0,19]	Только архивное хранение, доступны для ретроспективного анализа

Переходы между категориями реализуются с гистерезисом: при нарастании  $\rho$  и при его снижении применяются различные пороги. Принцип гистерезиса даёт устойчивость классификации — при малых колебаниях  $\rho$  вблизи пограничного значения элемент не переходит между категориями. Это согласуется с принципом темпоральной стабильности оценок и предотвращает переключательные осцилляции в режимах обработки.

Таксономия достоверности — операционный аспект эпистемологической маркировки. Статус элемента определяет и его метку в модели, и набор допустимых над ним действий в замкнутом контуре: какие решения могут приниматься автоматически, какие требуют подтверждения оператором, какие запрещены до уточнения. Связь между эпистемологической структурой модели и замкнутым контуром из подраздела 2.1.2 приобретает архитектурный характер: контур использует элемент лишь операциями, санкционированными его категорией достоверности. Недостоверное использование становится невозможным не по регламенту, а по конструкции.

Соотношение категорий достоверности и эпистемологических статусов неоднозначно. Фактическое состояние от надёжного источника с низкой погрешностью попадает в категорию «Достоверные»; фактическое состояние, основанное на единичном наблюдении в сложных условиях, может оказаться «Сомнительным». Прогнозное состояние с коротким горизонтом от устойчивой модели — «Вероятным»; долгосрочный прогноз хаотического процесса — «Маловероятным».

Структура представления прогнозного состояния. Структурное представление прогнозного состояния включает ожидаемые характеристики объектов вместе с контекстом формирования прогноза. Информационное основание — совокупность фактических состояний, использованных при формировании. Модельное основание — применённая прогностическая модель (или их совокупность), с параметрами и настройками. Временные координаты — момент формирования и целевой момент. Допущения и ограничения — условия, при которых прогноз считается применимым: сценарные предположения, границы экстраполяции, исключённые факторы.

Связь прогнозного состояния с информационным основанием принципиальна для функционирования замкнутого контура. Расхождение, выявленное при верификации, может объясняться неадекватностью прогностической модели, неточностью исходных данных, непредвиденными внешними воздействиями или ошибками верифицирующих наблюдений.

Жизненный цикл прогнозного состояния складывается из четырёх фаз. В фазе формирования прогностическая модель на основе текущих и ретроспективных фактических состояний генерирует ожидаемое состояние на заданный будущий момент; сформированное состояние включается в модель с эпистемологической маркировкой и связями с информационным основанием. В фазе актуальности прогноз существует как действующее ожидание, доступное для использования; по мере приближения к целевому моменту он может уточняться новыми прогнозами с более коротким горизонтом. В фазе верификации прогноз сопоставляется с фактическим состоянием, формируется оценка расхождения. В фазе архивации верифицированный прогноз сохраняется как элемент истории с зафиксированным результатом сопоставления — для статистического анализа и обоснования адаптивных корректировок.

Множественность прогнозов для одного целевого момента — естественное свойство модели. Прогнозы формируются в различные моменты времени, по мере поступления новых данных, образуя последовательность

уточняющихся ожиданий. Они могут основываться на разных моделях или разных параметрах одной модели. Они могут соответствовать разным сценарным допущениям. Модель должна поддерживать сосуществование множественных прогнозов, их идентификацию, различение и независимую верификацию каждого с накоплением дифференцированной статистики.

Предложенное концептуальное решение даёт структурную основу для функционирования замкнутого контура в рамках единой модели. Фактические и прогнозные состояния представлены согласованно, различаются эпистемологическим статусом и допускают единообразные операции сопоставления. Таксономия достоверности переводит эпистемологическую маркировку из декларативного атрибута в операционный инструмент, регулирующий допустимость действий с каждым элементом. Связь прогнозов с информационным основанием делает возможной диагностику расхождений и целенаправленную адаптацию.

#### **2.2.4. Темпоральная организация модели: многомоментность и версионность**

Модель обстановки в методе АИМТПО представляет динамическую реальность, в которой пространственные объекты меняют своё положение, характеристики и отношения [145] во времени. Темпоральная организация должна охватить не единичный срез обстановки, а пространственно-временную картину, включающую прошлое, настоящее и прогнозируемое будущее.

Задача осложняется тем, что для каждого момента допускается несколько альтернативных представлений, различающихся источником формирования, эпистемологическим статусом или сценарными допущениями. Требуется упорядоченное представление этого множества и эффективный доступ к нему для анализа, прогнозирования и верификации.

Традиционные подходы к представлению времени в ГИС ориентированы на фиксацию момента актуальности данных.

Пространственный объект получает атрибут времени, указывающий момент регистрации сведений. При обновлении данных прежние значения замещаются или уходят в архив. Такая модель (snapshot model) адекватна отображению текущего состояния, но с темпоральной динамикой не работает: историю изменений объекта проследить нельзя, темпоральные запросы к прошлым состояниям не поддерживаются, представление будущих ожидаемых состояний не предусмотрено.

Для метода АИМТПО необходима более развитая темпоральная модель — многомоментная.

Многомоментность означает, что модель содержит представления множества моментов времени, доступных для анализа и сопоставления. Ретроспективные состояния сохраняются как часть истории обстановки — база для анализа динамики. Текущее состояние несёт наиболее актуальные сведения. Прогнозные состояния представляют ожидаемые будущие характеристики на различные горизонты. Эти состояния образуют темпоральный континуум модели: прошлое, настоящее и будущее — связанные элементы единой структуры.

Временная ось модели неоднородна. Ретроспективный участок охватывает период от начала накопления данных до некоторого момента в прошлом; состояния на нём — фактические, образующие историческую базу. Околотекущий участок охватывает недавнее прошлое и настоящее; здесь сосредоточена наиболее актуальная информация, питающая прогнозы и решения. Прогнозный участок охватывает будущее от текущего момента до горизонта прогнозирования; состояния на нём — прогнозные, с возрастающей неопределённостью по мере удаления от настоящего.

Формальная модель временного затухания достоверности. Понятие актуального горизонта требует количественного обоснования. Представление об актуальности как бинарном свойстве — состояние либо актуально, либо устарело — противоречит природе наблюдаемой динамики. Достоверность сведений о положении и характеристиках объекта убывает непрерывно с

момента последнего наблюдения; скорость убывания существенно зависит от типа объекта. Формально это убывание описывается экспоненциальной моделью временного затухания достоверности:

$$\rho(t) = \rho_0 \cdot \exp -\lambda \cdot (t - t_{\text{last}}), \quad (2.12)$$

где  $\rho_0$  — достоверность на момент последнего наблюдения  $t_{\text{last}}$ ;  $\lambda$  — коэффициент затухания, определяемый характером объекта и свойствами его динамики.

Характерный параметр модели — период полураспада достоверности:

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}, \quad (2.13)$$

то есть интервал времени, за который достоверность сведений снижается вдвое в отсутствие новых наблюдений. Типичные масштабы  $T_{1/2}$  по классам объектов приведены в таблице 2.2-6.

Таблица 2.2-6 — Характерные периоды полураспада достоверности по классам объектов

Класс объектов	Масштаб $T_{1/2}$
Стационарные объекты инфраструктуры	Часы и более
Неподвижные природные объекты	Десятки минут
Медленно движущиеся объекты	Минуты
Подвижные наземные объекты	Единицы минут
Быстроподвижные воздушные объекты	Десятки секунд
Мгновенные события	Единицы секунд

Приведённая параметризация выполняет в модели несколько функций. Во-первых, она придаёт чёткую семантику оператору запроса вида «все состояния с актуальностью выше порога» — запрос сводится к ограничению на  $t - t_{\text{last}}$  при известных  $\lambda$  и пороге  $\rho$ . Во-вторых, становится основанием адаптивного управления периодичностью обновлений: классы с малым  $T_{1/2}$  требуют высокой частоты наблюдений, что транслируется в требования к планированию задач источникам геопространственных данных. В-третьих, согласует темпоральную логику модели с категориями достоверности из

подраздела 2.2.3: снижение  $\rho(t)$  приводит к переходу элемента между категориями и автоматически меняет множество допустимых действий.

Темпоральная организация и эпистемологическая маркировка оказываются сцеплены — устаревание наблюдения трактуется как изменение его эпистемологического статуса, а не как отдельный атрибут.

Версионность и дискретизация. Версионность модели предполагает сосуществование альтернативных представлений одного момента времени. Версии различаются по эпистемологическому статусу (фактическая, прогнозная, сценарная), по моменту формирования (последовательные прогнозы одного целевого момента по мере поступления данных), по сценарным допущениям.

Идентификация версий опирается на композитный ключ вида ( $t_{\text{target}}$ ,  $t_{\text{formed}}$ ,  $type$ ,  $scenario$ ), обеспечивающий уникальную адресацию любой версии состояния.

Связи между версиями — структурный элемент модели. Последовательные прогнозы одного целевого момента связаны отношением уточнения: каждый последующий опирается на предыдущий и дополнительные данные. Сценарные ветви связаны отношением альтернативности, указывающим их происхождение от общей точки ветвления. Прогнозные и фактические версии одного момента связаны отношением верификации с фиксированным результатом сопоставления.

Дискретизация времени определяет, для каких моментов формируются и сохраняются состояния. Регулярная дискретизация — равномерный шаг по временной оси; адаптивная — шаг, варьируемый в зависимости от интенсивности изменений; событийная — формирование состояний в моменты значимых событий независимо от календарного времени.

Для метода АИМТПО целесообразна комбинация подходов: регулярная дискретизация даёт базовую структуру, адаптивные и событийные срезы дополняют её по необходимости.

Темпоральные запросы и индексирование. Темпоральные запросы к многомоментной версионной модели разнообразнее, чем запросы к традиционным ГИС. Помимо запросов о состоянии обстановки на заданный момент, модель поддерживает запросы к истории объектов (траектории изменений характеристик на заданном интервале); запросы к множеству прогнозов (все прогнозы для заданного целевого момента или все прогнозы, сформированные в заданный момент); запросы сопоставления (пары прогнозных и фактических состояний с оценками расхождений); запросы к сценарной структуре (дерево сценариев с оценками статуса); запросы по актуальности (элементы с  $\rho(t)$  выше заданного порога).

Выбор конкретных структур определяется характеристиками данных и профилем запросов; подробное рассмотрение отнесено к подразделу 2.3 и архитектурному слою (глава 3).

Режимы синхронизации. Синхронизация темпоральной структуры с реальным временем определяет режим функционирования системы (Таблица 2.2-7).

Таблица 2.2-7 — Режимы темпоральной синхронизации

Режим	Соотношение с физическим временем	Основное применение
Реальное время	Синхронно	Оперативный мониторинг, поддержка решений
Квазиреальное время	С допустимой задержкой	Ситуационный анализ, отчётность
Ретроспективный анализ	Зафиксировано на прошлом периоде	Исследование закономерностей, обучение
Имитационное моделирование	Управляемое, произвольное	Тестирование, сценарный анализ

Темпоральная организация процедуры верификации прогнозов имеет для метода АИМТПО особое значение. Верификация инициируется при наступлении целевого момента прогноза и поступлении соответствующих фактических данных.

В условиях асинхронности данных от распределённых источников момент, когда фактическое состояние может считаться достаточно определённым для верификации, наступает с некоторой задержкой

относительно целевого. Эта задержка учитывается в темпоральной логике: прогноз не верифицируется мгновенно в целевой момент — он ожидает накопления достаточной фактической информации, причём параметр  $\rho(t)$  служит индикатором готовности фактического состояния к использованию как эталона.

Нарушение темпоральной целостности указывает на ошибки данных, сбои интеграции или неадекватность моделей — само по себе это ценная диагностическая информация.

Многомоментная версионная темпоральная организация с дифференцированным представлением участков временной оси и формализованной моделью затухания достоверности даёт структурную основу для реализации замкнутого пространственно-временного контура. Ретроспективные состояния формируют базу для анализа закономерностей и построения прогностических моделей. Текущие состояния служат отправной точкой прогнозирования и эталоном для верификации ближайших прогнозов. Прогнозные состояния в версионной структуре несут ожидания на различные горизонты. Функция  $\rho(t)$  связывает темпоральную организацию с эпистемологической маркировкой, превращая актуальность в количественно определяемый атрибут элементов модели.

### **2.2.5. Неопределённость как атрибут элементов модели**

Модель обстановки оперирует информацией, достоверность которой принципиально ограничена: пространственные координаты объектов известны с погрешностью средств позиционирования, атрибутивные значения — с ошибками измерения и классификации, временные метки — с точностью синхронизации источников, прогнозные состояния — с убывающей по горизонту достоверностью.

Источники и виды неопределённости. В §1.3.3 неопределённость распределённых источников рассмотрена в разрезе технологического стека и распределена на четыре компонента — сенсорный, навигационный,

коммуникационный, семантический. В геоинформационной модели обстановки эта декомпозиция получает онтологическую проекцию: каждый компонент проявляется в определённом подмножестве элементов модели. Сенсорная неопределённость относится прежде всего к объектам, состояниям и сетям наблюдений. Навигационная и коммуникационная неопределённости проявляются в геометрии объектов и временной привязке состояний. Семантическая неопределённость относится к атрибутам объектов и к классификации событий. Декомпозиция важна для адаптации: каждый компонент требует своего механизма обновления — параметрической калибровки источников, темпорального согласования, семантической верификации.

Формализмы представления. Для неопределённости применяются разные формализмы (Таблица 2.2-8); выбор определяется характером неопределённости и требованиями аналитических процедур. Вероятностное представление описывает позиционную и атрибутивную неопределённость через ковариационные матрицы и распределения; нечёткое — формализует размытость семантических границ. Доказательственная теория Демпстера–Шефера охватывает случай частичного незнания, когда источник не подтверждает и не опровергает гипотезу. Категориальные шкалы — таксономия достоверности §2.2.3 и шкала полноты  $\gamma$  §2.2.5 — дают единое представление, пригодное как для операторской работы, так и для агрегации между источниками.

Геоинформационная модель допускает сосуществование формализмов: позиционная неопределённость — ковариация, классификационная — апостериорные распределения, эпистемический статус — категориальная шкала.

Таблица 2.2-8 — Формы представления неопределённости для компонентов модели

<b>Компонент модели</b>	<b>Тип неопределённости</b>	<b>Рекомендуемая форма представления</b>
Координаты объекта	Позиционная	Ковариационная матрица, эллипс ошибок
Количественный атрибут	Атрибутивная	Распределение или интервал
Категориальный атрибут	Классификационная	Распределение вероятностей по классам
Существование объекта	Структурная	Вероятность существования
Временная метка	Темпоральная	Интервал или распределение
Прогнозное значение	Прогностическая	Распределение с зависимостью от горизонта

Операторское представление полноты: шкала  $\gamma$ . Непрерывная оценка неопределённости — инструмент алгоритмов интеграции и прогнозирования, ориентированный на машинную обработку. Для операторского уровня ситуационного центра, где принимаются пороговые решения о допустимости автоматических действий и необходимости доразведки, такая оценка избыточно детальна и не даёт однозначной интерпретации на уровне интерфейса. Для этого уровня в модель вводится дискретная операторская шкала полноты  $\gamma$  — срез непрерывной оценки неопределённости по ключевым характеристикам формуляра объекта. Показатель полноты определяется как сумма бинарных признаков наличия ключевых характеристик формуляра:

$$\gamma = \sum_{i=1}^{11} y_i, y_i \in \{0; 1\}, i = 1, \dots, 11, \quad (2.14)$$

где  $y_i = 1$  при наличии в формуляре  $i$ -й характеристики,  $y_i = 0$  при её отсутствии. Одиннадцать признаков полноты составляют минимально необходимый набор для принятия решений об объекте (Таблица 2.2-9). Значения  $\gamma$  агрегируются в категории полноты, каждой из которых соответствует определённый режим работы системы с элементом (Таблица 2.2-10).

Таблица 2.2-9 — Признаки полноты формуляра объекта

<b>№</b>	<b>Характеристика формуляра</b>	<b>Способ определения</b>	<b>Значение для контура решений</b>
1	Идентификатор объекта	Присвоение уникального идентификатора при первом наблюдении и	Связывание разновременных наблюдений как относящихся к одному

		его сохранение при последующих	объекту, ведение истории состояний
2	Наименование объекта	Классификация по типологии предметной области на основе сигнатурных признаков	Семантическая интерпретация, выбор применимой модели динамики и правил прогнозирования
3	Характер поведения	Анализ траектории и атрибутов на интервале наблюдения, классификация по динамическим режимам	Выбор прогностической модели, оценка горизонта прогнозирования, отнесение к категории $T_{1/2}$
4	Координаты центра объекта	Привязка к геодезической системе координат с указанием погрешности	Пространственная локализация в модели обстановки, основа для топологических операций
5	Координаты составных элементов	Координаты отдельных компонентов для группового или составного объекта	Анализ внутренней структуры объекта, оценка протяжённости и конфигурации
6	Высота	Вертикальная координата в принятой системе высот	Трёхмерная локализация, разрешение пространственных конфликтов в плотных группировках
7	Время обнаружения	Метка времени первого наблюдения, синхронизированная с модельной временной осью	Определение возраста сведений, расчёт $\rho(t)$ , темпоральная привязка событий
8	Источник наблюдения	Идентификатор источника геопространственных данных, по которому получен формуляр	Прослеживаемость происхождения, разрешение конфликтов между источниками, оценка достоверности
9	Характеристика точности	Количественная оценка погрешности атрибутов и координат	Распространение неопределённости в производных оценках, корректное сопоставление с прогнозом
10	Степень скрытости	Условия наблюдения, влияющие на полноту регистрации (затенение, помехи, отражения)	Оценка систематической составляющей погрешности, обоснование необходимости доразведки
11	Размеры объекта	Габаритные характеристики	Выбор корректного геометрического

		пространственных единицах	представления (точка/линия/полигон), оценка масштаба
--	--	------------------------------	--

Таблица 2.2-10 — Категоризация полноты и режимы обработки

Диапазон $\gamma$	Категория	Режим работы системы
$\gamma = 11$	Полные	Автоматическое принятие решений, передача в эталонную базу, использование для прогнозирования
$\gamma \in [7; 10]$	Достаточно полные	Автоматические решения с флагом неопределённости, ограниченные действия
$\gamma \in [3; 6]$	Условные	Только мониторинг, инициируется доразведка
$\gamma \in [0; 2]$	Не полные	Запрет автоматических решений, обязательное подтверждение оператором или доразведка

Дискретная шкала  $\gamma$  и непрерывная модель неопределённости — два уровня одной формализации, согласованных по области применения. Непрерывная оценка работает внутри алгоритмов интеграции, пространственно-атрибутивного слияния и прогнозирования: там, где нужно тонкое различие значений и корректное распространение ошибок. Дискретная шкала  $\gamma$  используется в операторском интерфейсе и при пороговых решениях — она даёт однозначную квалификацию элемента и немедленную определимость допустимых действий.

При операциях с данными неопределённость исходных величин переходит в неопределённость результата по правилам распространения ошибок: для аналитических операций — через якобиан преобразования и ковариационные матрицы, для интерполяции и экстраполяции — через накопление дисперсии, для категориальных оценок — через композицию правил §2.3.6. Отслеживание этой цепочки составляет диагностическую функцию прослеживаемости: аномальный рост неопределённости в результате указывает на проблемный источник или процедуру. Совокупная неопределённость интегрированных представлений выше, чем у каждого источника по отдельности, и её корректная оценка важна для последующих процедур контура. Несовпадение совокупной неопределённости не свидетельствует о неадекватности модели — это нормальное следствие распространения; сигналом неадекватности служит превышение наблюдаемого расхождения над предсказанным распределением, что

фиксируется статистикой нормализованных инноваций. Поэтому, неопределённость становится диагностическим инструментом — она задаёт нормативную полосу расхождений, в пределах которой расхождение интерпретируется как штатное, а её превышение — как сигнал к адаптации.

Интеграция неопределённости как атрибута элементов модели требует расширения структур данных, алгоритмов обработки и интерфейсов взаимодействия. Каждый элемент сопровождается характеристиками неопределённости соответствующего вида; операции с данными распространяют неопределённость и формируют оценки неопределённости результатов; запросы к модели допускают учёт неопределённости при выборке и агрегации; процедуры верификации и адаптации используют неопределённость при оценке значимости расхождений и обосновании корректировок. Двухуровневая формализация — непрерывная модель для алгоритмического уровня и дискретная шкала  $\gamma$  для операторского — обеспечивает адекватность представления на каждом уровне обработки без их смешения.

#### **2.2.6. Геоинформационная модель как цифровой двойник обстановки**

Модель обстановки, структура которой раскрыта в §2.2.1–§2.2.5, удовлетворяет ключевым критериям концепции цифрового двойника [41, 100, 113, 201]; на методологическом уровне она согласуется с программой следующего поколения цифровой Земли [142]. Модель представляет определённый фрагмент пространственной реальности и непрерывно синхронизируется с ним через поток данных от распределённых источников. Она поддерживает моделирование динамики, прогнозирование развития и принятие решений о действиях в реальном пространстве. Интерпретация модели как цифрового двойника фиксирует её функциональную роль в методе АИМТПО и отделяет её от статических представлений традиционных ГИС.

Цифровой двойник обстановки обладает свойством эмерджентности: его аналитические и прогностические возможности превосходят сумму

возможностей отдельных источников данных за счёт пространственно-временной интеграции (§2.3), сопоставления прогнозных и наблюдаемых состояний (§2.5), накопления истории (§2.2.4) и адаптивного уточнения моделей (§2.5). На этой основе двойник реализует функции мониторинга, анализа, прогнозирования, сценарного моделирования (§2.4.5) и поддержки принятия решений.

Интерпретация модели обстановки как цифрового двойника задаёт методологическую позицию метода АИМТПО относительно объекта моделирования. Двойник опосредует связь между наблюдаемой реальностью и процессами принятия решений, преобразуя поток разрозненных наблюдений в согласованное динамически обновляемое представление с прогнозами и аналитикой. Замкнутый контур поддерживает актуальность двойника по отношению к реальности; адаптивность обеспечивает совершенствование моделей в процессе эксплуатации. Эти свойства задают функциональную полноту геоинформационной модели обстановки.

## **2.3. Пространственно-временная интеграция разнородных геопространственных данных**

### **2.3.1. Интеграция как компонент пространственно-временного контура**

Геоинформационная модель обстановки, структура которой раскрыта в предыдущем подразделе, требует наполнения данными от источников геопространственной информации. При использовании множества распределённых и автономных источников, характерных для современных систем мониторинга, данные поступают в различных форматах, системах координат, с различным пространственным и временным разрешением, в произвольные моменты времени. Формирование согласованного представления обстановки на основе такого разнородного потока составляет задачу пространственно-временной интеграции данных. В методе АИМТПО

эта задача приобретает специфическое содержание, определяемое требованиями замкнутого контура, введённого в §2.1.2.

Интеграция геопространственных данных в традиционном понимании трактуется как технологическая процедура объединения разнородных наборов данных в единое представление. Такое понимание акцентирует технические аспекты: преобразование форматов, трансформацию систем координат, согласование схем данных, разрешение конфликтов значений. Эти аспекты важны, однако не исчерпывают содержания интеграции в предлагаемом методе. Интеграция здесь — непрерывный процесс, обеспечивающий функционирование замкнутого контура в условиях постоянного поступления новых данных, а не завершающая технологическая операция с фиксированным результатом.

Интеграция в методе охватывает несколько взаимосвязанных процедур. Темпоральное согласование приводит разновременные данные к единому референсному моменту. Пространственное согласование снимает различия разрешения и точности позиционирования. Семантическое согласование унифицирует представления, полученные в различных терминологиях и классификациях. Разрешение конфликтов определяет результирующие значения при противоречивости исходных данных. Каждая процедура вносит вклад в интегрированное представление и одновременно является источником дополнительной неопределённости, подлежащей учёту.

Результат интеграции — актуальное состояние геоинформационной модели обстановки, синтезированное из множества частных наблюдений. Качество этого представления пространственно неоднородно: участки с интенсивным покрытием данными представлены достовернее, чем участки с редкими наблюдениями. Неоднородность не скрывается, а эксплицируется в модели для дифференцированного использования данных в прогностических и аналитических процедурах. Карта неопределённости интегрированного

представления входит в его структуру и подаётся на вход подсистеме верификации прогнозов.

Обратная связь от аналитических компонентов контура к интеграции реализуется через механизмы адаптивного уточнения, раскрываемые в §2.5. Систематические расхождения между прогнозами и фактами могут указывать на проблемы интеграции: смещения отдельных источников, ошибки преобразования координат, некорректность временной привязки. Диагностика расхождений позволяет идентифицировать источники проблем и корректировать параметры интеграции. Такая обратная связь превращает интеграцию из статичной процедуры с фиксированными параметрами в адаптивный процесс, совершенствующийся по мере накопления опыта функционирования контура.

### 2.3.2. Гетерогенность распределённых источников

Современные системы геоинформационного обеспечения опираются на множество источников пространственных данных, различающихся по принципам регистрации, характеристикам охвата, точности, оперативности и надёжности. Эта гетерогенность фундаментальна. Она обусловлена разнообразием задач и условий наблюдения и не может быть полностью преодолена стандартизацией. Методология интеграции исходит из признания гетерогенности как данности и обеспечивает эффективное использование разнородных источников при сохранении качества результирующих представлений.

Оценка вычислительной нагрузки, порождаемой ростом числа распределённых источников, обосновывает структуру подсистемы интеграции. Суммарная нагрузка на узел интеграции описывается выражением:

$$Q = N \cdot q_{\text{ист}} + \alpha \cdot \frac{N(N-1)}{2} \cdot q_{\text{соп}} + Q_{\text{внеш}}, \quad (2.15)$$

где  $N$  — число распределённых источников;  $q_{\text{ист}}$  — средний поток от одного источника;  $\alpha \in [0, 1]$  — доля пар источников с перекрывающимися зонами наблюдения;  $q_{\text{соп}}$  — вычислительная нагрузка одного сопоставления наблюдений при отождествлении объектов;  $Q_{\text{внеш}}$  — потоки от внешних информационных систем (эталонных ГИС-слоёв, метеорологических, навигационных сервисов).

Линейная составляющая  $N \cdot q_{\text{ист}}$  отражает потоки индивидуальных источников. Квадратичная составляющая  $\alpha \cdot \frac{N(N-1)}{2} \cdot q_{\text{соп}}$  возникает из-за попарного сопоставления наблюдений: при перекрытии зон охвата одно и то же явление может быть зафиксировано несколькими источниками, и эти наблюдения подлежат отождествлению во избежание дублирования в интегрированном представлении. При  $\alpha = 0,3$  и  $N = 50$  число пар для сопоставления составляет 368; при  $N = 100$  — 1485. Квадратичный рост нагрузки принципиально ограничивает применимость централизованной схемы интеграции и формирует методологическое требование иерархической обработки. Часть операций согласования выполняется на стороне источников в форме предварительного сопоставления в локальных зонах ответственности, а на верхний уровень передаются агрегированные и частично согласованные данные. Это требование связывает содержание настоящего параграфа с Положением 3 диссертации, раскрывающим распределённую архитектуру метода.

Гетерогенность источников проявляется в нескольких измерениях, каждое из которых порождает специфические проблемы интеграции. Типологический анализ этих измерений создаёт основу для систематического подхода к согласованию данных.

Пространственная гетерогенность охватывает различия в охвате территории, пространственном разрешении и точности позиционирования. Космические системы обеспечивают глобальный или региональный охват с умеренным разрешением. Авиационные носители, включая мобильные

беспилотные платформы, дают высокодетальные данные на ограниченных участках [135]; наземные датчики фиксируют информацию в отдельных точках с высокой частотой. Совместное использование этих данных требует согласования масштабов и разрешений, интерполяции между точками наблюдения, экстраполяции за пределы покрытия.

Таблица 2.3-1 — Пространственные характеристики типов источников геопространственных данных

Тип источника	Пространственный охват	Типичное разрешение	Точность позиционирования
Космические системы ДЗЗ	Глобальный, региональный	0,3–30 м	5–50 м (без опорных точек)
Пилотируемая авиация	Региональный, локальный	0,1–1 м	0,5–5 м
Мобильные беспилотные платформы	Локальный	0,01–0,1 м	0,1–2 м
Наземные мобильные комплексы	Маршрутный	0,01–0,05 м	0,05–0,5 м
Стационарные датчики	Точечный	Неприменимо	0,01–0,1 м
Навигационные системы	Объектный	Неприменимо	1–10 м

Временная гетерогенность определяется различиями в периодичности обновления, времени регистрации и оперативности доступа. В любой момент доступны данные различной давности — отсюда необходимость механизмов темпорального согласования.

Тематическая гетерогенность обусловлена различиями в регистрируемых параметрах. Оптические сенсоры фиксируют отражённое излучение в различных спектральных диапазонах, радарные системы — характеристики обратного рассеяния, лидары измеряют дальность и интенсивность отражённого импульса, тепловизоры регистрируют собственное излучение объектов. Наблюдения в разных физических модальностях несут комплементарную информацию, однако их совместная интерпретация предполагает знание связей между регистрируемыми параметрами и интересующими характеристиками объектов.

Семантическая гетерогенность возникает при использовании различных классификаций, терминологий и моделей представления: несовпадающие типологии объектов, различные наборы атрибутов, несогласованные значения категориальных переменных. Установление соответствий между концептуальными схемами и трансформация представлений детализируются в §2.3.5.

Метрологическая гетерогенность охватывает различия в точности, достоверности и характеристиках ошибок. Источники отличаются погрешностями измерений, вероятностью ложных обнаружений и пропусков, устойчивостью к внешним условиям; степень определённости метрологических характеристик варьируется от паспортных данных до экспертных оценок. При интеграции эти различия учитываются через взвешивание вклада источников пропорционально их надёжности.

Организационная гетерогенность связана с принадлежностью источников различным ведомствам, организациям и системам. Она порождает различия в режимах доступа, форматах обмена, регламентах обновления, политиках использования. Организационные барьеры могут ограничивать возможности интеграции независимо от технической совместимости данных. При интеграции источников разного ведомственного происхождения корреляционная структура их ошибок в общем случае неизвестна, и это обстоятельство определяет выбор консервативных методов слияния, рассматриваемых в §2.3.6.

### **2.3.3. Темпоральное согласование**

Данные от различных источников геопространственной информации регистрируются в различные моменты времени и поступают в систему с различными задержками. В условиях динамической обстановки, когда объекты перемещаются и изменяют свои характеристики, разновременность наблюдений становится источником систематических искажений при попытке формирования согласованной картины. Темпоральное согласование

компенсирует эти искажения и приводит данные к единому референсному моменту времени.

Базовым понятием темпорального согласования является референсный момент времени — точка на временной оси, к которой приводятся все данные для формирования согласованного представления. Выбор референсного момента определяется целями анализа. Для формирования представления о текущем состоянии референсным служит настоящий момент. Для ретроспективного анализа референсным может быть любой момент в прошлом. Для прогнозирования референсным служит будущий момент, к которому относится прогноз.

Неопределённость темпорального согласования неизбежно возникает из-за неполноты знаний о динамике объектов между наблюдениями. Интерполяция основывается на предположениях о плавности изменений, которые могут нарушаться при резких манёврах или дискретных событиях. Экстраполяция накапливает ошибку по мере удаления от последнего наблюдения. Модельное приведение ограничено точностью используемых моделей. Оценка ошибки темпоральной интерполяции на момент запроса входит в общую ковариационную матрицу наблюдения и учитывается в процедурах слияния, формализуемых в §2.3.6.

Понятие возраста данных характеризует интервал времени между регистрацией данных и референсным моментом. Возраст непосредственно связан с неопределённостью темпорального согласования: чем больше возраст, тем больше неопределённость приведённых значений. Для динамичных объектов данные быстро устаревают, их возраст уже через короткое время делает их малоинформативными. Для стабильных объектов данные сохраняют актуальность длительное время. Дифференцированный учёт возраста в зависимости от характера объектов позволяет корректно оценивать вклад разновременных данных в интегрированное представление.

Функция деградации описывает снижение информационной ценности данных с увеличением их возраста. Для позиционных данных о подвижных объектах деградация связана с нарастанием неопределённости положения, для атрибутивных данных — со снижением вероятности сохранения значений. Форма функции деградации зависит от характера объекта и есть параметр, подлежащий оценке на основе анализа динамики или экспертных суждений.

Синхронизация наблюдений от множества источников составляет самостоятельную проблему при работе с распределёнными системами. Бортовые часы различных носителей могут быть согласованы с различной точностью. Задержки передачи данных вносят дополнительную неопределённость во временные метки. Для корректной интеграции необходима синхронизация временных шкал источников с требуемой точностью, определяемой динамикой наблюдаемых объектов и пространственным разрешением данных.

В замкнутом контуре метода темпоральное согласование приобретает дополнительное значение в связи с процедурами верификации. Сопоставление прогнозного и фактического состояний требует их отнесения к одному моменту времени. Прогноз формируется на определённый целевой момент. Фактические данные поступают с задержками и относятся к моментам, не совпадающим точно с целевым. Корректная верификация требует либо интерполяции фактических данных к целевому моменту прогноза, либо явного учёта временного рассогласования при оценке расхождений.

#### **2.3.4. Пространственное согласование**

Источники геопространственных данных характеризуются различным пространственным разрешением, определяющим минимальный размер различимых объектов и детальность представления пространственной структуры. Интеграция данных различного разрешения порождает методологическую проблему: каким образом объединить детальные локальные данные с обзорными данными меньшего разрешения, сохранив

информационный вклад каждого источника и избежав артефактов на границах зон различной детальности.

Пространственное разрешение определяется физическими характеристиками сенсора и условиями наблюдения: размером элемента изображения на местности, шириной диаграммы направленности, плотностью точек лазерного сканирования. Для растровых данных оно выражается размером пикселя. Для векторных — минимальным размером представимых объектов и точностью координат. Различия в разрешении могут составлять порядки величины: от сантиметров для наземной съёмки до десятков метров для космических систем.

Согласование данных различного разрешения выполняется в направлении генерализации или детализации. Генерализация агрегирует детальные данные до уровня менее детального источника, детализация дезагрегирует данные низкого разрешения с привлечением дополнительной информации. Выбор направления определяется целями интеграции: для формирования обзорного представления используется генерализация, для уточнения локальных участков — детализация.

Генерализация детальных данных реализуется через процедуры пространственного агрегирования. Для растровых данных она сводится к усреднению или выбору доминирующего значения в пределах укрупнённых ячеек. Для точечных данных — к построению регулярной сетки с интерполяцией значений. Для векторных объектов — к упрощению геометрии, объединению мелких объектов, исключению деталей меньше порога разрешения. Генерализация сопровождается потерей информации, которая должна учитываться при оценке неопределённости результата.

Проблема совмещения данных от различных источников проявляется в систематических и случайных расхождениях положения одних и тех же объектов на разных изображениях или в разных наборах данных. Систематические расхождения обусловлены ошибками геопривязки и

компенсируются аффинными или полиномиальными преобразованиями. Случайные расхождения отражают неустранимую неопределённость позиционирования. Для корректной интеграции необходимо минимизировать систематические расхождения и оценить остаточную случайную неопределённость, представляемую ковариационной матрицей положения.

Совмещение данных в рамках предлагаемого метода имеет специфику, связанную с требованиями верификации: сопоставление прогнозного положения объекта с фактическим требует, чтобы расхождения обуславливались ошибками прогноза, а не несовместённостью данных. Некомпенсированное систематическое смещение между источниками будет ошибочно интерпретировано как ошибка прогнозирования и приведёт к некорректной адаптации моделей. Калибровка взаимного положения источников — предпосылка корректного функционирования замкнутого контура.

### **2.3.5. Семантическое согласование**

Данные от различных источников несут информацию об объектах и явлениях, выраженную в различных системах понятий, классификациях и терминологиях. Один и тот же объект реального мира может быть отнесён к различным категориям в различных информационных системах, описан различными наборами атрибутов, представлен с различной степенью детализации. Семантическое согласование обеспечивает взаимопонимание между представлениями различных источников: устанавливает соответствия между понятиями и трансформирует данные к унифицированной концептуальной схеме.

Семантическая гетерогенность проявляется на нескольких уровнях. На терминологическом уровне одни и те же сущности обозначаются различными терминами в различных системах. Синонимия, то есть использование различных терминов для одного понятия, требует отождествления. Омонимия, использование одного термина для различных понятий, требует различения.

На уровне классификаций объекты группируются по различным основаниям, с различной детальностью, в иерархии различной глубины. Классификация одной системы может не иметь точных соответствий в классификации другой. На уровне атрибутов объекты описываются различными наборами характеристик, измеряемых в различных единицах, с различной точностью и детальностью.

Установление семантических соответствий между источниками может осуществляться вручную экспертами или автоматизированно с использованием методов сопоставления онтологий. Ручное сопоставление даёт высокое качество для ограниченного числа хорошо изученных источников. Автоматизированные методы опираются на лексическое сходство терминов, структурное сходство схем, анализ экстенционалов понятий. Ни один из подходов не является универсальным. На практике применяются комбинированные схемы: автоматизированное сопоставление с экспертной валидацией и корректировкой.

Типы семантических соответствий между понятиями различных источников варьируются по характеру (Таблица 2.3-2). Эквивалентность означает полное совпадение объёмов понятий: каждый объект, относящийся к одному понятию, относится и к другому. Включение описывает ситуацию, когда объём одного понятия является подмножеством другого. Пересечение указывает на частичное совпадение объёмов. Несовместимость соответствует отсутствию общих объектов. Характер соответствия определяет возможности трансформации данных и сохранение информации при преобразованиях.

Таблица 2.3-2 — Типы семантических соответствий и их следствия для интеграции

Тип соответствия	Характеристика	Возможность трансформации	Потери информации
Эквивалентность	Полное совпадение объёмов понятий	Прямая замена	Отсутствуют
Включение (A ⊂ B)	Объём A входит в объём B	A → B без потерь; B → A с потерей части объектов	При обратном преобразовании

Пересечение	Частичное совпадение объёмов	Возможна для пересечения, проблемна для остатков	Для объектов вне пересечения
Несовместимость	Объёмы не пересекаются	Невозможна	Полные

Унификация представлений предполагает приведение данных всех источников к единой целевой схеме — онтологии геоинформационной модели обстановки. Целевая схема определяет типологию объектов, набор атрибутов, допустимые отношения. Для каждого источника разрабатывается отображение из его схемы в целевую, специфицирующее правила трансформации объектов, атрибутов, значений. Отображения могут быть однозначными или предполагать выбор из альтернатив на основе дополнительных критериев.

Семантическое согласование в динамической обстановке осложняется возможностью изменения категориальной принадлежности объектов. Объект может менять тип, статус, классификационные характеристики в течение своего жизненного цикла. Такие переходы не являются исключениями. Семантическая модель должна допускать их и фиксировать как события изменения состояния объекта.

### **2.3.6. Разрешение конфликтов и оценка согласованности**

При интеграции данных от множества источников неизбежно возникают ситуации, когда различные источники предоставляют несовместимые сведения об одних и тех же объектах или участках территории. Такие конфликты требуют разрешения, то есть определения результирующего значения, которое будет включено в интегрированное представление. Стратегии разрешения конфликтов существенно влияют на качество интеграции и должны быть методологически обоснованы, а не ограничиваться эвристическими правилами.

Типология конфликтов по их характеру включает несколько категорий. Конфликты существования возникают, когда один источник фиксирует

объект, а другой — нет; причиной может быть как ошибка одного из источников (ложное обнаружение или пропуск), так и реальное изменение обстановки между наблюдениями. Позиционные конфликты выражаются в расхождении координат объекта по данным различных источников. Атрибутивные конфликты проявляются в несовпадении значений атрибутов, классификационные — в отнесении объекта к различным категориям.

Первичная оценка доверия к наблюдению. Формализация надёжности данных, поступающих от распределённого источника, строится на мультипликативной декомпозиции трёх независимых факторов:

$$P_{\text{initial}} = K_{\text{ист}} \cdot K_{\text{усл}} \cdot P_{\text{обн}}, \quad (2.16)$$

где  $K_{\text{ист}}$  — коэффициент надёжности источника, определяемый его функциональной ролью в геоинформационной инфраструктуре;  $K_{\text{усл}}$  — коэффициент условий наблюдения, отражающий деградацию канала регистрации;  $P_{\text{обн}}$  — вероятность корректного обнаружения объекта или явления по данным данного источника.

Обобщённые диапазоны  $K_{\text{ист}}$  для категорий источников, характерных для распределённых геоинформационных систем, приведены в таблице 2.3-3. Категории сформированы по функциональной роли источника в инфраструктуре, а не по конкретному типу сенсора, что обеспечивает переносимость оценок между различными реализациями.

Таблица 2.3-3 — Диапазоны коэффициента надёжности источника  $K_{\text{ист}}$  по категориям

Категория источника	Диапазон $K_{\text{ист}}$
Источники высокоточной навигационной привязки	0,90–0,97
Источники стандартной навигационной привязки	0,70–0,82
Оптико-электронные средства распознавания	0,55–0,85
Тепловизионные средства	0,60–0,80
Радиолокационные средства	0,60–0,95
Эталонные ГИС-данные и цифровые модели местности	0,85–0,95
Кооперативная идентификация (верифицированная)	0,80–0,92
Внешние информационные сервисы	0,50–0,70

Диапазоны  $K_{\text{ист}}$  согласованы с категориями таксономии достоверности §2.2.3: значения  $K_{\text{ист}}$  в верхнем диапазоне (0,80–0,97) отвечают категории

«Достоверные», диапазон 0,63–0,79 — категории «Вероятные», диапазон 0,50–0,62 — категории «Сомнительные». Тем самым первичная оценка доверия наблюдению  $P_{initial}$  при последующей проекции на шкалу  $\rho$  модели обстановки попадает в одну из категорий таксономии без дополнительного отображения.

Коэффициент условий наблюдения  $K_{усл}$  учитывает факторы, снижающие достоверность отдельного наблюдения вне зависимости от номинальной надёжности источника. Типовые значения приведены в таблице 2.3-4; при одновременном действии нескольких факторов они комбинируются мультипликативно.

Таблица 2.3-4 — Факторы деградации условий наблюдения

Фактор	$K_{усл}$
Деградация навигационного обеспечения	0,70
Деградация оптико-электронного канала	0,60
Повышенная задержка канала связи	0,80
Единственный источник (отсутствие подтверждения)	0,90
Автономный режим источника	0,85

Значения  $K_{ист}$  не являются статическими константами. Апостериорная калибровка коэффициента реализована через бета-распределение параметров доверия: каждый источник характеризуется парой  $(\alpha, \beta)$ , где  $\alpha$  накапливает число подтверждённых наблюдений,  $\beta$  — опровергнутых; подтверждение и опровержение фиксируются по результатам верификации прогнозов и диагностики расхождений (§2.5.2). Точечная оценка:  $K_{ист} = \alpha / (\alpha + \beta)$ . Источник, систематически дающий расхождения, постепенно теряет вес в интегрированном представлении; стабильно подтверждаемый — наращивает. Формальная связь с подсистемой адаптации (§2.5) делает оценку доверия не экспертно назначаемым атрибутом, а динамически уточняемым параметром.

Байесовское слияние наблюдений от независимых источников [117]. При наличии нескольких наблюдений об одном объекте от различных источников результирующая вероятность достоверного обнаружения определяется как

$$P_{\text{total}} = 1 - \prod_{i=1}^N (1 - P_i \cdot K_{\text{eff},i}), \quad (2.17)$$

где  $K_{\text{eff},i} = K_{\text{ист},i} \cdot K_{\text{незав},i}$ ;  $K_{\text{незав},i}$  — коэффициент независимости наблюдения  $i$ , учитывающий корреляцию источников. Значения  $K_{\text{незав}}$  приведены в таблице 2.3-5 и отражают степень информационной независимости: полностью независимые источники разных организационных структур получают максимальный коэффициент, повторные наблюдения от одного сенсора в близкие моменты времени — существенно меньший.

Таблица 2.3-5 — Коэффициенты независимости наблюдений

Комбинация источников	$K_{\text{незав}}$
Один источник, один канал наблюдения	0,3
Один источник, разные каналы наблюдения	0,7
Разные источники одной группировки	0,9
Независимые источники разных ведомств	1,0

Формальные критерии обнаружения конфликтов. Для автоматического выявления ситуаций, требующих разрешения, вводятся три независимых критерия с явно заданными порогами.

Пространственный конфликт. Расхождение позиций одного и того же объекта по данным двух источников оценивается расстоянием Махаланобиса между наблюдениями с учётом их ковариационных матриц [60]:

$$d_M^2 = (\mathbf{x}_1 - \mathbf{x}_2)^T (\mathbf{P}_1 + \mathbf{P}_2)^{-1} (\mathbf{x}_1 - \mathbf{x}_2) > T_M, \quad (2.18)$$

где  $\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2$  — векторы координат объекта по данным первого и второго источников;  $\mathbf{P}_1, \mathbf{P}_2$  — ковариационные матрицы наблюдений первого и второго источников;  $T_M = 11,35$  — квантиль распределения  $\chi^2$  с тремя степенями свободы при доверительной вероятности 0,99. Превышение порога интерпретируется как статистически значимое расхождение, не объяснимое номинальными погрешностями источников.

Классификационный конфликт. Расхождение классификационных решений, выраженных распределениями вероятностей по классам, оценивается расстоянием Бхаттачарьи [60, 124]:

$$D_B = -\ln \sum_{c \in C} \sqrt{P_1(c) \cdot P_2(c)} > T_B, \quad (2.19)$$

где  $C$  — множество классов, общих для классификационных схем обоих источников;  $P_1(C) \cdot P_2(C)$  — вероятности отнесения объекта к классу  $c$  по данным первого и второго источников;  $T_B$  — порог обнаружения классификационного конфликта, калибруемый по статистике классификационных расхождений на этапе настройки системы; типовые значения  $T_B$  лежат в диапазоне 0,3–0,7 в зависимости от характеристик используемых классификаторов. Превышение порога интерпретируется как существенное расхождение классификационных решений, выходящее за пределы типового разброса оценок надёжных классификаторов.

Темпоральный конфликт. Скорость перемещения объекта, вычисленная по двум последовательным наблюдениям, сопоставляется с предельно допустимой для соответствующего класса:

$$\frac{\|X_2 - X_1\|}{\Delta t} > k \cdot V_{max}, \quad (2.20)$$

где  $X_2, X_1$  — векторы координат объекта в моменты двух последовательных наблюдений;  $\Delta t > 0$  — интервал времени между ними;  $V_{max}$  — максимально допустимая скорость для данной категории объектов (таблица 2.3-6);  $k > 1$  — коэффициент запаса, учитывающий кратковременные отклонения скорости и ошибки измерений; типовое значение  $k = 1,5$ , конкретный выбор калибруется по статистике корректных наблюдений в режиме настройки системы.

Таблица 2.3-6 — Предельные скорости по обобщённым категориям объектов

Категория объекта	$V_{max}$ (м/с)
Неподвижные объекты	0
Пешеходы	3
Наземный транспорт	40
Беспилотные воздушные объекты	50
Пилотируемые воздушные объекты	300
Водные объекты	15

Для объектов с  $V_{max} = 0$  (неподвижные) пороговое условие (2.20) формально нарушается при любом ненулевом перемещении. Для этого класса критерий применяется в виде  $|X_2 - X_1| > k_{pos} \cdot \sigma_{pos}$ , где  $\sigma_{pos}$  — погрешность позиционирования двух наблюдений, а  $k_{pos}$  — коэффициент запаса; расхождение оценивается относительно неопределённости измерения,

а не максимальной скорости. Содержательно перемещение неподвижного объекта свидетельствует либо об ошибке измерения, либо о неправильной классификации объекта как неподвижного; обе ситуации требуют диагностики, а не автоматического сглаживания.

Формальное слияние согласованных наблюдений. После прохождения проверок на конфликт наблюдения подлежат слиянию в единую оценку. Для  $N$  независимых источников с вектором наблюдения  $x_i$  и ковариационной матрицей  $P_i$  оптимальная по минимуму следа ковариации оценка даётся информационным фильтром [117, 158]:

$$P_{\text{fused}}^{-1} = \sum_{i=1}^N P_i^{-1}, \quad x_{\text{fused}} = P_{\text{fused}} \sum_{i=1}^N P_i^{-1} x_i, \quad (2.21)$$

Информационная форма удобна для распределённой обработки: частичные информационные вклады  $P_i^{-1}x_i$  и  $P_i^{-1}$  аддитивны и могут вычисляться независимо на стороне источников.

При интеграции источников с неизвестной или частичной корреляционной структурой применение информационного фильтра приводит к переоценке точности результата, поскольку слияние коррелированных наблюдений учитывается как независимое. Для таких случаев используется метод ковариационного пересечения (Covariance Intersection, CI), гарантирующий непротиворечивую оценку при любых скрытых корреляциях:

$$P_{\text{CI}}^{-1}(\omega) = \omega \cdot P_1^{-1} + (1 - \omega) \cdot P_2^{-1}, \quad \omega \in [0; 1], \quad (2.22)$$

где параметр  $\omega$  оптимизируется по минимуму следа (или определителя) результирующей ковариационной матрицы. Метод даёт консервативную оценку, то есть переоценивает неопределённость результата. Такая переоценка безопасна: итоговая ковариационная матрица всегда мажорирует истинную, каковы бы ни были фактические корреляции источников. Это свойство критично для интеграции данных из систем разного ведомственного происхождения, где корреляционная структура принципиально неизвестна и не может быть восстановлена по доступной метаинформации.

В замкнутом контуре результаты разрешения конфликтов подвергаются косвенной проверке через верификацию прогнозов. Систематическое смещение, порожаемое принятой стратегией, проявится в систематических расхождениях прогнозов и фактов. Анализ расхождений в рамках подсистемы диагностики выявляет необходимость корректировки стратегии или пересмотра оценок надёжности источников. Формальный аппарат, введённый в настоящем разделе, встраивается в адаптивный контур и обеспечивает саморегуляцию параметров интеграции.

### **2.3.7. Прослеживаемость интегрированных данных**

Геоинформационная модель обстановки, формируемая путём интеграции данных от множества источников, есть производное представление, связь которого с исходными данными не является самоочевидной. Для корректного функционирования замкнутого контура, диагностики расхождений и адаптации моделей требуется сохранение информации о происхождении каждого элемента интегрированного представления. Эта информация, обозначаемая как происхождение данных [127, 128, 129] (provenance), обеспечивает прослеживаемость: возможность восстановить, из каких исходных данных и посредством каких преобразований получен каждый элемент модели.

Происхождение данных в контексте интеграции включает несколько компонентов. Источники задают перечень исходных наборов данных, использованных при формировании элемента. Преобразования фиксируют последовательность операций, применявшихся к данным: преобразование координат, темпоральное согласование, семантическую трансформацию, разрешение конфликтов. Параметры хранят конкретные значения параметров преобразований — используемые проекции, модели интерполяции, весовые коэффициенты источников, применённые значения  $K_{\text{ист}}$  и  $K_{\text{усл}}$  на момент обработки. Временные метки фиксируют моменты регистрации исходных данных и выполнения преобразований.

Совокупность этих компонентов формирует граф происхождения данных [114, 125, 126, 143], формализуемый стандартами W3C PROV [205, 206, 208], в котором вершинами служат исходные наблюдения, промежуточные представления и интегрированные элементы модели, а рёбрами — применённые преобразования с зафиксированными параметрами. Граф есть самостоятельный информационный объект, связанный с геоинформационной моделью обстановки, и доступный для запросов и анализа.

Прослеживаемость в замкнутом контуре — не служебное свойство метаданных, а необходимое условие для атрибуции расхождений «прогноз — факт» и — через эту атрибуцию — для самой возможности адаптации. Без полных сведений о происхождении расхождение между прогнозом и наблюдением не атрибутируется к конкретному источнику или преобразованию, диагностика теряет определённую определённость, и адаптивный механизм лишается направленного сигнала. Поэтому прослеживаемость рассматривается как методологическое условие, без которого замкнутый контур формально замыкается, но содержательно — функционировать не может.

Атрибуция расхождений на основе прослеживаемости выполняется по следующей логике. Расхождение, локализованное в области, покрытой только одним источником, вероятнее всего связано с этим источником; в таком случае корректируется его коэффициент надёжности через механизм бета-калибровки (§2.3.6). Расхождение, возникающее на границе зон покрытия различных источников, указывает на возможную проблему согласования и требует корректировки параметров пространственного или семантического отображения. Систематическое расхождение для определённого типа объектов свидетельствует о проблеме семантического отображения. Корреляция расхождения с возрастом данных указывает на неадекватность функции деградации и требует её уточнения.

Происхождение данных служит основой для оценки их надёжности и в режиме текущей работы, а не только при диагностике. Данные от более надёжных источников, полученные с меньшим количеством преобразований на основе более свежих наблюдений, характеризуются меньшей неопределённостью. Формализация связи между происхождением и неопределённостью позволяет автоматически оценивать качество элементов модели на основе информации об их происхождении, без обращения к исходным данным.

Интеграция сведений о происхождении в геоинформационную модель обстановки завершает формирование структуры, обеспечивающей функционирование замкнутого контура. Модель содержит текущие и прогнозные состояния обстановки вместе с полной информацией об их формировании, необходимую для верификации, диагностики и адаптации. Прослеживаемость превращает модель из непрозрачного артефакта, выдающего результаты неизвестного происхождения, в систему, каждый элемент которой может быть объяснён и проверен, а каждое расхождение — атрибутировано конкретному источнику.

## **2.4. Геоинформационное прогнозирование и сценарный анализ обстановки**

### **2.4.1. Прогнозирование как функция геоинформационной системы**

Геоинформационные системы традиционно ориентированы на представление и анализ пространственных данных, отражающих текущее или прошлое состояние географической реальности. Аналитические функции таких систем направлены на выявление пространственных закономерностей, измерение характеристик объектов и территорий, оценку взаимосвязей между элементами обстановки. Прогнозирование — формирование обоснованных суждений о будущих состояниях — остаётся преимущественно за пределами функциональности геоинформационных систем. Оно реализуется внешними

средствами; в систему поступает уже готовый продукт для визуализации и хранения. Подобное разделение порождает методологический разрыв: прогноз, сформированный вне модели обстановки, не связан с её онтологией, структурами неопределённости и механизмами верификации, а значит, не может быть включён в замкнутый контур адаптации.

Метод АИМТПО занимает принципиально иную позицию: прогнозирование рассматривается как имманентная функция геоинформационной системы, интегрированная в её ядро наряду с функциями представления и анализа данных. Такое позиционирование согласуется с тезисом §2.1.3, где прогноз определён как полноправный элемент геоинформационной модели, а не как внешний программный импорт. Прогноз формируется в терминах модели обстановки, хранится в её структурах, сопоставляется с последующими фактическими состояниями и порождает адаптивные корректировки; весь цикл реализуется внутри геоинформационной системы и оказывается доступен последующей верификации.

Функциональная архитектура геоинформационного прогнозирования в методе АИМТПО включает несколько взаимосвязанных компонентов. Информационную основу образуют текущее и ретроспективные состояния модели обстановки. Прогностические модели описывают закономерности динамики объектов и процессов и служат основанием для вывода ожидаемых будущих состояний из известных текущих. Механизм формирования прогнозов применяет модели к данным. Подсистема управления прогнозами отвечает за их хранение, версионирование, связывание с основаниями. Интерфейс с контуром верификации реализует сопоставление прогнозов с фактами и трансляцию результатов в адаптацию.

Объектами прогнозирования в геоинформационной модели обстановки выступают все категории сущностей, определённые в её онтологии. Для объектов прогнозируются траектории перемещения, эволюция характеристик,

моменты появления и исчезновения. Для событий — вероятность наступления, ожидаемое время и место, параметры. Для процессов — динамика развития, переходы между фазами, моменты завершения. Для зон — изменения границ, интенсивности, характеристик. Комплексность объекта прогнозирования — обстановки в целом — требует координации прогнозов отдельных элементов, обеспечивающей их взаимную согласованность.

Временной горизонт прогнозирования определяет, на какой период в будущее формируются прогнозные состояния. Выбор горизонта зависит от потребностей потребителей информации, характера решаемых задач, предсказуемости моделируемых процессов. Оперативные задачи требуют краткосрочных прогнозов с высокой достоверностью. Планирование опирается на среднесрочные прогнозы, допускающие большую неопределённость. Для стратегического анализа формируются долгосрочные прогнозы или сценарии, отражающие альтернативные траектории развития. Геоинформационная система должна поддерживать прогнозирование на различные горизонты с соответствующей дифференциацией методов и оценок достоверности.

Прогнозирование в геоинформационной системе реализуется как регулярный процесс, встроенный в операционный цикл. По мере поступления новых данных и обновления текущего состояния модели инициируется формирование новых прогнозов или уточнение существующих. При наступлении целевых моментов ранее сформированных прогнозов запускается процедура верификации. Её результаты накапливаются и периодически транслируются в адаптацию прогностических моделей. Непрерывность цикла обеспечивает актуальность прогнозов и совершенствование их качества.

Интеграция прогнозирования в геоинформационную систему как имманентной функции изменяет характер системы в целом. Она перестаёт быть пассивным хранилищем и инструментом визуализации данных и

становится активным аналитическим средством, формирующим знание о будущем на основе знания о прошлом и настоящем. Это соответствует расширенному пониманию геоинформатики как науки о пространственных данных и пространственном знании, включающем закономерности и прогнозы.

#### **2.4.2. Классы прогностических моделей в методе АИМТПО**

Прогнозирование состояний геоинформационной модели обстановки опирается на прогностические модели, описывающие закономерности динамики объектов и процессов. Разнообразие объектов, характера их динамики и доступной информации определяет необходимость использования различных классов моделей. В обзорной литературе классификация прогностических моделей обычно строится по принципу их математического аппарата: геостатистика, методы машинного обучения, агентное моделирование, сценарный анализ. Такое деление полезно при систематизации методов, но недостаточно для методологии геоинформационного прогнозирования: оно не даёт критерия, по которому системе следует выбирать ту или иную модель применительно к конкретному объекту наблюдаемой обстановки.

Соответствие между типовыми классами объектов модели обстановки и классами прогностических моделей представлено в таблице 2.4-1. Приводимые классы динамики — статическая модель, модель постоянной скорости (*constant velocity, CV*), модель постоянной скорости с координированным поворотом (*constant turn, CV+CT*), модель постоянного ускорения (*constant acceleration, CA*) — образуют методологическое, а не алгоритмическое основание: конкретные реализации (линейные и нелинейные фильтры, численные схемы интегрирования) относятся к уровню инженерной реализации и в настоящей работе детально не рассматриваются.

Таблица 2.4-1 — Соответствие классов объектов модели обстановки и классов прогностических моделей

<b>Класс объектов модели обстановки</b>	<b>Класс прогностической модели</b>	<b>Размерность вектора состояния</b>	<b>Обоснование выбора</b>
Стационарные объекты инфраструктуры	Статическая модель, шум процесса пренебрежимо мал	3D (координаты)	Местоположение фиксировано; прогноз сводится к оценке надёжности сохранения наблюдения во времени
Медленно движущиеся наземные объекты малой подвижности	Модель постоянной скорости в плоскости (CV)	4D (координаты и компоненты скорости)	Траектория между наблюдениями аппроксимируется прямой; допустимы редкие смены направления
Подвижные объекты со сложной наземной или надводной динамикой	Модель постоянной скорости с переключением на координированный поворот (CV+CT)	4–5D (координаты, скорости, скорость поворота)	Характерно чередование прямолинейных участков и манёвров поворота; требуется адаптивное переключение моделей движения
Высокоманевренные воздушные объекты	Модель постоянного ускорения в трёхмерном пространстве (CA)	9D (координаты, скорости, ускорения)	Возможны быстрые изменения вектора скорости во всех трёх измерениях
Пилотируемые воздушные объекты	Модель постоянной скорости в трёхмерном пространстве (CV 3D)	6D (координаты и скорости)	Характерны плавные траектории с малыми ускорениями

Внутри этого методологического каркаса остаются релевантными и традиционные классификации прогностических моделей. Экстраполяционные модели опираются только на фактическую траекторию без привлечения знаний о механизмах движения. Модели динамики объектов конкретизируют класс прогностической модели характеристиками среды, возможностями объекта, типичными паттернами маневрирования. Модели взаимодействия учитывают влияние объектов друг на друга. Они переводят прогнозирование с уровня отдельного объекта на уровень конфигурации объектов.

Статистические модели — нейронные сети, ансамблевые методы, модели глубокого обучения [23, 104] — применяются там, где доступны значительные объёмы обучающих данных, но структура динамики не поддаётся формальному описанию. Экспертные модели формализуют знания специалистов о закономерностях предметной области и особенно уместны для редких событий и качественных закономерностей, слабо представленных в эмпирических данных.

Гибридные модели объединяют несколько подходов для использования их комплементарных преимуществ. Экстраполяция может обеспечивать базовый прогноз, корректируемый моделью динамики при наличии информации о механизмах. Статистические модели дополняются экспертными правилами для редких ситуаций. Модели взаимодействия используют результаты индивидуальных прогнозов объектов как входные данные.

Выбор класса модели для конкретного объекта или ситуации прогнозирования определяется совокупностью факторов: семантическим типом объекта в онтологии модели обстановки, характером его динамики, доступностью информации о механизмах, объёмом накопленных данных, требуемой точностью, вычислительными ресурсами. В рамках одной геоинформационной модели обстановки сосуществуют модели различных классов, применяемые к различным типам объектов и процессов. Единство обеспечивается не унификацией моделей, а унификацией интерфейса — способа представления прогнозов в структурах модели обстановки.

Адаптивность прогностических моделей означает их способность к модификации на основе результатов верификации. Параметры моделей корректируются для минимизации систематических расхождений между прогнозами и фактами. Структура моделей может пересматриваться при выявлении устойчивых паттернов ошибок, не устранимых параметрической настройкой. Выбор модели для конкретной ситуации адаптируется на основе

сравнительной статистики точности. Адаптивность превращает прогностический компонент в обучающуюся систему, совершенствующуюся в процессе эксплуатации.

### **2.4.3. Пространственно-временная экстраполяция и её ограничения**

Экстраполяция есть наиболее универсальный и часто применяемый подход к прогнозированию, основанный на продолжении фактических тенденций за пределы периода наблюдений. В контексте геоинформационной модели обстановки экстраполяция приобретает пространственно-временной характер: прогнозируются траектории объектов в пространстве, динамика их характеристик во времени, эволюция пространственных структур.

Экстраполяция траекторий объектов прогнозирует будущее положение объекта на основе его текущего положения и наблюдаемого характера движения. В простейшем случае сохраняется вектор скорости — объект продолжает движение в том же направлении. Полиномиальная экстраполяция учитывает изменения скорости, аппроксимируя траекторию многочленом более высокой степени. Экстраполяция на основе типичных паттернов использует знание о характерных траекториях объектов данного типа: движение по дорожной сети, следование фарватерам.

Точность экстраполяции траекторий быстро деградирует с увеличением горизонта прогнозирования. Даже небольшая неопределённость в направлении движения транслируется в значительную неопределённость положения на больших расстояниях. Изменения режима движения — манёвры, остановки, изменения курса — не предсказываются экстраполяцией, основанной только на предшествующей траектории. Практическая применимость экстраполяции ограничивается горизонтами, на которых вероятность изменения режима остаётся низкой.

Экстраполяция атрибутивных характеристик прогнозирует будущие значения параметров объекта на основе фактической динамики изменений.

Если температура объекта изменяется с определённой скоростью, экстраполяция прогнозирует её будущие значения. Если запас ресурса расходуется с наблюдаемой интенсивностью, прогнозируется момент его исчерпания. Экстраполяция атрибутов подвержена тем же ограничениям, что и экстраполяция траекторий: она предполагает сохранение режима изменений и неспособна предсказать переходы к иным режимам.

Экстраполяция пространственных структур прогнозирует эволюцию распределённых явлений — расширение или сокращение зон, перемещение фронтов, изменение конфигураций. Если зона распространяется с наблюдаемой скоростью, экстраполяция прогнозирует её будущие границы. Для этого класса прогнозов существенную роль играет анизотропия — зависимость скорости распространения от направления, определяемая характеристиками среды.

Ограничения экстраполяции носят принципиальный характер и не могут быть преодолены совершенствованием методов. Экстраполяция основывается на предположении о стационарности — сохранении закономерностей, выявленных в прошлом, в будущем. Нарушение стационарности — изменение режимов, внешние воздействия, дискретные события — порождает ошибки экстраполяции. Чем динамичнее обстановка и чем больше горизонт прогнозирования, тем выше вероятность нарушения стационарности и тем менее надёжна экстраполяция.

Условия применимости экстраполяции включают достаточность ретроспективных данных для выявления устойчивых тенденций, стабильность условий на прогнозном горизонте, отсутствие предпосылок для качественных изменений режима. В контексте метода АИМТПО экстраполяция целесообразна для краткосрочного прогнозирования инерционных процессов при отсутствии информации о предстоящих изменениях режима. Для более длительных горизонтов или динамичных ситуаций необходимо дополнение экстраполяции иными методами или переход к сценарному анализу.

Неопределённость экстраполяционного прогноза возрастает с увеличением горизонта прогнозирования. Для линейной экстраполяции неопределённость положения объекта растёт линейно с временем при фиксированной неопределённости направления и квадратично — при неопределённости ускорения. Количественная оценка неопределённости экстраполяции основывается на статистике ретроспективных данных и характеристиках стабильности траекторий.

#### **2.4.4. Модельное прогнозирование динамики объектов**

Модельное прогнозирование основывается на применении формализованных моделей [121], описывающих закономерности динамики объектов, к известному текущему состоянию для вывода ожидаемых будущих состояний. В отличие от экстраполяции, опирающейся только на фактические тенденции, модельное прогнозирование использует знания о механизмах — физических, поведенческих, организационных, — определяющих динамику объектов.

Для ряда классов объектов динамика не описывается одной моделью на всём протяжении наблюдения. Поведение может переключаться между качественно различными режимами — прямолинейным движением, координированным поворотом, ускорением. Выбор единственной прогностической модели априори в этих условиях оказывается методологически некорректным: модель, адекватная одному режиму, систематически ошибается в другом. Методологический ответ состоит в адаптивном переключении моделей по схеме интерактивных многомодельных алгоритмов (Interacting Multiple Model, IMM). Параллельно поддерживается несколько прогностических моделей, соответствующих альтернативным режимам динамики [186], а итоговый прогноз формируется как взвешенная комбинация прогнозов отдельных моделей. Веса определяются апостериорными вероятностями соответствия каждой модели наблюдаемым данным и обновляются по ходу наблюдений. Матрица вероятностей

переходов между моделями задаёт априорную картину типичной смены режимов для объекта данного класса и служит структурной составляющей прогностической модели наряду с параметрами отдельных её компонентов. Такой механизм реализует принцип адаптивного прогнозирования, введённый в §2.1.4: при изменении характера поведения объекта система перераспределяет вес между прогностическими моделями без внешнего вмешательства, сохраняя единство модели обстановки.

Другой методологический вызов возникает, когда прогнозное распределение состояния принципиально не сводится к единственному наиболее вероятному значению. Неоднозначная ассоциация наблюдений, внезапный манёвр, негауссовский шум наблюдения порождают ситуации, в которых состояние объекта согласуется с несколькими альтернативными гипотезами одновременно. В этих условиях гауссовская парадигма прогнозирования даёт сбой. Усреднение альтернатив через единственное среднее и единственную ковариацию приводит к состоянию, не соответствующему ни одной из гипотез. Методологическое расширение состоит в переходе к мультимодальному прогнозированию. Апостериорное распределение состояния аппроксимируется ансамблем взвешенных гипотез — отдельных прогнозных состояний с различной плотностью. Вместо единственной наиболее вероятной траектории прогноз содержит распределение альтернативных траекторий, каждая со своим весом; последующая верификация наблюдениями перераспределяет веса, постепенно подавляя гипотезы, несовместимые с данными. Алгоритмическая реализация этой схемы, оперирующая частицами как вычислительным представлением гипотез, относится к уровню инженерной реализации и в настоящей работе не детализируется.

Неопределённость модельных прогнозов определяется неточностью начальных условий, неопределённостью параметров модели, неполнотой модели как описания реальности. Даже идеальная модель с точно известными параметрами даёт неопределённый прогноз при неточно известном начальном

состоянии. Для нелинейных систем неопределённость может нарастать экспоненциально — явление динамического хаоса. Оценка неопределённости модельных прогнозов требует чувствительностного анализа — отклика модели на вариации начальных условий и параметров.

Верификация прогнозов модели обстановки выполняется в замкнутом контуре метода АИМТПО. Систематические расхождения прогнозных состояний с фактическими наблюдениями указывают на структурную неадекватность модели или на смещение её параметров; различить эти два случая позволяет анализ того, как распределены расхождения по пространству, времени и категориям достоверности входных данных. Полученная структура расхождений определяет адаптационное воздействие. Верификационная статистика, накапливаясь, даёт эмпирическую оценку точности модели в различных режимах обстановки.

Выбор между экстраполяцией и модельным прогнозированием определяется тем, насколько известны механизмы динамики. При адекватной модели с идентифицированными параметрами модельный прогноз точнее экстраполяционного на средних и длительных горизонтах. На коротких горизонтах, когда структурное знание ограничено, экстраполяция сохраняет работоспособность. При отсутствии модели или неизвестности параметров экстраполяция может быть единственным доступным методом. Гибридный подход использует экстраполяцию как базовый прогноз, корректируемый модельными оценками при наличии соответствующей информации.

#### **2.4.5. Сценарный анализ: множественность прогнозных состояний**

Прогнозирование сложных динамических обстановок сталкивается с фундаментальной неопределённостью, обусловленной неточностью данных и моделей, а также принципиальной многовариантностью будущего. Решения и действия участников обстановки, внешние воздействия, случайные события порождают ветвление траекторий развития, которое не сводится к единственному прогнозу. Сценарный анализ признаёт эту множественность и

представляет будущее не как точечную оценку, а как пространство возможностей, структурированное в виде совокупности сценариев. Сценарный анализ входит в номенклатуру задач пространственно-временного анализа и в методе АИМТПО реализуется как множественные ветви прогнозных состояний единой геоинформационной модели.

Формирование сценариев в контексте метода АИМТПО основывается на идентификации ключевых неопределённостей — факторов, различная реализация которых определяет различные траектории развития обстановки. Для каждой ключевой неопределённости определяются возможные альтернативы. Комбинации альтернатив по различным неопределённостям образуют матрицу сценариев. Из полной матрицы отбираются наиболее значимые и внутренне согласованные комбинации, формирующие итоговый набор сценариев для анализа.

Таблица 2.4-2 — Типология сценариев в геоинформационном прогнозировании

Тип сценария	Основание формирования	Назначение	Характеристика
<b>Базовый</b>	Наиболее вероятный ход событий	Основа планирования	Инерционное развитие при сохранении текущих условий
<b>Оптимистический</b>	Благоприятное сочетание факторов	Оценка верхней границы возможностей	Реализация благоприятных альтернатив
<b>Пессимистический</b>	Неблагоприятное сочетание факторов	Оценка рисков, подготовка к худшему	Реализация неблагоприятных альтернатив
<b>Альтернативный</b>	Качественно иной ход событий	Расширение горизонта планирования	Переход к иным режимам развития
<b>Целевой</b>	Желаемое состояние	Определение необходимых действий	Обратное построение от цели

<b>Контрастный</b>	Максимально различающиеся варианты	Оценка диапазона неопределенности	Крайние точки пространства возможностей
--------------------	------------------------------------	-----------------------------------	---

Вероятностная оценка сценариев определяет их относительное правдоподобие. Вероятности могут оцениваться экспертно, выводиться из статистических моделей, корректироваться по мере поступления данных. Байесовский подход позволяет обновлять вероятности сценариев при поступлении информации [60, 117], указывающей на реализацию определённых альтернатив. Сценарий, вероятность которого снижается до пренебрежимо малых значений, может исключаться из активного рассмотрения, хотя сохраняется в архиве для ретроспективного анализа.

Пространственное измерение сценарного анализа проявляется в том, что альтернативные сценарии предполагают различную локализацию событий, различные направления перемещений, различную конфигурацию зон и областей. Один сценарий может предполагать концентрацию активности в одном районе, другой — в ином. Сопоставление сценариев выявляет устойчивые элементы, реализующиеся при любом развитии, и вариативные, зависящие от хода событий.

Использование сценариев для поддержки решений предполагает анализ последствий решений в различных сценариях и выбор решений, приемлемых или оптимальных для совокупности сценариев. Робастное решение обеспечивает приемлемый результат при любом сценарии. Адаптивная стратегия предусматривает различные действия в зависимости от разворачивающегося сценария с определением триггеров переключения.

Сценарный анализ в замкнутом контуре АИМТПО подвергается верификации по мере развития обстановки. Наступающие события позволяют дискриминировать сценарии. Несовместимые с наблюдениями исключаются, совместимые получают повышенную вероятность. Точки ветвления, прогнозировавшиеся в сценариях, сопоставляются с фактическим развитием,

и накопленные расхождения служат обратной связью для корректировки способов построения сценариев.

#### **2.4.6. Оценка неопределённости прогнозов**

Прогнозирование по своей природе сопряжено с неопределённостью: утверждения о будущем не могут быть достоверными в той степени, в какой достоверны утверждения о наблюдаемом. Адекватная оценка неопределённости прогнозов является не менее важной составляющей прогнозирования, чем формирование самих прогнозных значений. Прогноз без оценки неопределённости неполон и потенциально вводит в заблуждение, создавая иллюзию определённости там, где она отсутствует.

Источники неопределённости прогнозов многообразны. К ним относятся неопределённость начальных условий, неопределённость параметров моделей, неполнота моделей, непредсказуемость внешних воздействий и решений акторов. Неопределённость начальных условий определяется качеством данных о текущем состоянии и распространяется через прогностические модели. Параметры оцениваются с ограниченной точностью. Неполнота моделей порождает систематические расхождения, не устранимые уточнением параметров. Внешние воздействия и решения акторов вносят элемент принципиальной непредсказуемости.

Структурная сторона неопределённости прогноза согласуется с операторской шкалой полноты  $\gamma$  из §2.2.5. Объект, формуляр которого характеризуется значениями  $\gamma$  в верхнем диапазоне, допускает применение прогностической модели соответствующего семантическому типу класса в полном объёме; формирование прогноза опирается на достаточный набор атрибутов и оценок точности. При значениях  $\gamma$  в нижнем диапазоне формуляр объекта неполон, и применение детальной прогностической модели методологически неоправданно — недостающие компоненты вектора состояния не могут быть восполнены прогностическими процедурами. Шкала  $\gamma$  служит индикатором пригодности объекта для применения данного класса

прогностической модели и параметром, регулирующим допустимый горизонт прогнозирования.

Методы оценки неопределённости прогнозов варьируются в зависимости от характера прогностических моделей и доступной информации. Аналитические методы выводят характеристики неопределённости результата из характеристик неопределённости входных данных на основе анализа модели. Для линейных моделей распространение неопределённости описывается ковариационными матрицами. Для нелинейных моделей применяется линеаризация или более сложные аналитические техники.

Метод Монте-Карло оценивает неопределённость путём многократного прогнозирования при различных реализациях случайных входных данных, выбираемых в соответствии с их распределениями. Статистика результатов прогнозирования формирует оценку распределения прогнозных значений. Метод универсален и применим к моделям любой сложности, но требует значительных вычислительных ресурсов.

Ансамблевое прогнозирование использует множество моделей или множество вариантов параметризации одной модели для формирования набора прогнозов. Разброс результатов ансамбля характеризует неопределённость. Ансамблевый подход позволяет учесть как неопределённость параметров, так и структурную неопределённость, связанную с выбором модели.

Эмпирическая оценка неопределённости основывается на статистике расхождений между прогнозами и фактами, накопленной в замкнутом контуре. Распределение ошибок прогнозирования для различных типов объектов, горизонтов, условий позволяет оценить ожидаемую неопределённость новых прогнозов. Этот подход наиболее прямо связан с логикой АИМТПО и обеспечивает оценки, калиброванные относительно фактической точности прогнозирования.

## 2.4.7. Горизонты прогнозирования и деградация достоверности

Достоверность прогноза закономерно снижается с увеличением горизонта прогнозирования — интервала времени между моментом формирования прогноза и моментом, к которому он относится. Эта деградация достоверности имеет фундаментальный характер и определяется механизмами распространения неопределённости в динамических системах. Понимание закономерностей деградации необходимо для корректного использования прогнозов и определения границ практической применимости прогнозирования.

Скорость деградации достоверности существенно зависит от характера прогнозируемых объектов и процессов. Для инерционных систем с медленной динамикой достоверность сохраняется на длительных горизонтах. Для высокодинамичных систем деградация происходит быстро. Для хаотических систем с экспоненциальной чувствительностью к начальным условиям существует предел предсказуемости, за которым прогнозирование невозможно независимо от качества моделей и данных.

Связь характерного горизонта прогнозирования с темпоральной актуальностью наблюдений, формализованной в §2.2.4 экспоненциальной моделью затухания достоверности с периодом полураспада  $T_{1/2}$ , имеет принципиальный характер. Для класса объектов с малым  $T_{1/2}$  темп устаревания фактических данных задаёт нижнюю оценку допустимого горизонта: прогноз, формируемый на интервал, многократно превышающий  $T_{1/2}$ , использует входные данные с пониженной достоверностью и наследует их неопределённость в усиленной форме. Согласование класс-зависимого периода полураспада из §2.2.4 и характерного горизонта прогнозирования из настоящего подраздела согласует темпоральную структуру метода между уровнями данных и прогноза.

Предел предсказуемости — это характерный временной масштаб, за пределами которого неопределённость прогноза сопоставима с априорной

неопределённостью — вариабельностью, наблюдаемой без учёта информации о текущем состоянии. За пределом предсказуемости прогноз не информативнее климатологических или статистических оценок. Для различных объектов и процессов предел предсказуемости составляет от минут до месяцев и лет.

Таблица 2.4-3 — Характерные горизонты предсказуемости для различных объектов

<b>Объект прогнозирования</b>	<b>Характерный горизонт</b>	<b>Лимитирующие факторы</b>
Положение маневрирующего объекта	Минуты — десятки минут	Непредсказуемость решений, ограниченность экстраполяции
Траектория транспорта в сети	Часы	Выбор маршрута, внешние задержки
Развитие локальной ситуации	Часы — сутки	Взаимодействие факторов, действия участников
Погодные условия	Сутки — недели	Хаотическая динамика атмосферы
Состояние инфраструктуры	Недели — месяцы	Медленная динамика, внешние воздействия
Изменения территории	Месяцы — годы	Инерционность процессов

Практическое определение горизонтов прогнозирования для конкретной геоинформационной системы основывается на анализе статистики верификации. Зависимость точности прогнозов от горизонта, выявленная в процессе эксплуатации, определяет горизонты, на которых достигается требуемый уровень достоверности. Для различных типов объектов и различных требований к точности эти горизонты будут различаться.

## **2.5. Адаптация геоинформационных моделей в замкнутом контуре**

Принцип замкнутого пространственно-временного контура (§2.1.2) получает операциональное содержание в процедурах адаптации геоинформационных моделей по результатам сопоставления прогнозных и фактических состояний. В §2.1.4 рассмотрены концептуальные основания

адаптивного уточнения: его место в структуре замкнутого контура, связь с извлечением информации из расхождений, отличие от классической калибровки моделей. Настоящий подраздел переводит эти основания в операциональный план. Вопрос, определяющий изложение, — как выявленные расхождения трансформируются в целенаправленные модификации компонентов геоинформационной системы при сохранении её прослеживаемости и устойчивости.

### 2.5.1. Верификация прогнозов

Верификация прогноза есть контрольная точка замкнутого контура. В этой точке прогнозное состояние, сформированное в момент  $t_0$  на горизонт  $\tau$ , сопоставляется с фактическим состоянием, зарегистрированным в момент  $t_0 + \tau$ . В терминах §2.1.2 операция переводит прогнозный объект из состояния актуального ожидания в состояние верифицированного элемента истории и фиксирует его вклад в статистику расхождений.

Верификация опирается на представление прогноза и факта в сопоставимых структурах данных (§2.1.3): оба состояния описаны пространственными объектами с координатами, атрибутами, топологическими отношениями и характеристиками неопределённости. Сопоставимость не равна тождественности. Прогноз содержит ковариационные оценки позиций, вероятностные распределения атрибутов и ссылки на условия формирования. Факт характеризуется метрологическими погрешностями источников и коэффициентами условий наблюдения. Корректная верификация учитывает обе формы неопределённости; сопоставление двух неопределённых величин отличается от сравнения прогноза с «истинным» значением.

Операционально процедура включает три шага: ассоциацию прогнозных и наблюдаемых объектов, вычисление компонентов расхождения, формирование записи верификации. Ассоциация выполняется по тем же формальным критериям, что и ассоциация между наблюдениями в §2.3.6:

статистическое стробирование по расстоянию Махаланобиса, классификационная совместимость, темпоральная непротиворечивость. Различие — в статусе сопоставляемых элементов. В §2.3.6 сопоставляются два наблюдения; здесь — прогноз и наблюдение.

Каждая запись верификации фиксирует прогноз, факт, структурированное расхождение, критерии ассоциации и информационный контекст формирования прогноза. Контекст включает идентификатор прогностической модели, значения её параметров на момент формирования, состав входных данных и коэффициенты условий наблюдения. Без этого сохранённого контекста последующая атрибуция расхождений невозможна.

Верификация не сводится к бинарной оценке «подтверждён/опровергнут». Различаются полное подтверждение (соответствие в пределах заявленной неопределённости), частичное подтверждение (соответствие по отдельным компонентам), опровержение (существенное расхождение) и неопределённый результат (отсутствие верифицирующих данных). Диагностическая нагрузка исходов неоднородна. Опровержения формируют основной сигнал для модификации моделей. Неопределённые результаты транслируются в требования к источникам данных. Частичные подтверждения указывают на локальные дефекты отдельных компонентов модели.

### **2.5.2. Структура расхождений и диагностика**

Расхождение между прогнозным и фактическим состояниями не есть скалярная величина и не сводится к мере ошибки прогнозирования. Это структурированная информационная сущность, компоненты которой несут сведения о различных источниках неадекватности моделей. Диагностика расхождения раскладывает наблюдаемое несоответствие на компоненты и атрибутирует каждый компонент к определённому источнику ошибки.

Типология компонентов согласована с типологией критериев ассоциации из §2.3.6, но отличается от неё по методологическому статусу

сопоставляемых сущностей. В §2.3.6 конфликт возникает между двумя наблюдениями, имеющими одинаковый эпистемологический статус: оба — факты. В настоящем подразделе расхождение возникает между элементами с различным статусом. Прогноз есть гипотеза о будущем; факт — эмпирически зарегистрированное состояние. Это различие определяет структуру атрибуции. Источник ошибки локализуется в одной из четырёх категорий: несоответствие прогностической модели характеру поведения объекта; ошибка в исходных данных, на которых строился прогноз; ошибка в верифицирующих данных; некорректность интеграции данных.

Атрибуция возможна только при полной прослеживаемости компонентов, участвовавших в формировании прогноза и в его верификации. Без сохранения информационного контекста — состояния источников, значений параметров модели, процедур интеграции — различить ошибку модели и ошибку входных данных нельзя: наблюдаемое расхождение допускает любое объяснение. Прослеживаемость, введённая в §2.3.7 как свойство интегрированной картины обстановки, оказывается необходимым условием адаптации. Это соответствие обосновывает Положение 1 диссертации в его операциональном измерении.

Для формального различения случайных и систематических компонентов расхождения применяется нормализованная инновация. Это величина, измеряющая расхождение с учётом ожидаемой неопределённости прогноза:

$$v_{\text{norm}} = (\mathbf{z} - \mathbf{H} \hat{\mathbf{x}})^T \cdot \mathbf{S}^{-1} \cdot (\mathbf{z} - \mathbf{H} \hat{\mathbf{x}}), \quad (2.23)$$

где  $\mathbf{z}$  — вектор фактического наблюдения;  $\hat{\mathbf{x}}$  — прогнозное состояние;  $\mathbf{H}$  — матрица наблюдения, проецирующая пространство состояний в пространство наблюдений;  $\mathbf{S}$  — ковариация инновации, объединяющая неопределённость прогноза и неопределённость наблюдения.

При корректной работе прогностической модели статистика  $v_{\text{norm}}$  на последовательности верификаций соответствует распределению  $\chi^2$  с числом

степеней свободы, равным размерности наблюдения. Статистически значимое отклонение — устойчивое превышение ожидаемого среднего, автокоррелированность последовательных инноваций, дрейф — служит формальным диагностическим признаком рассогласования модели с реальностью. Критерий отделяет случайные расхождения, неизбежные при корректной модели, от систематических, требующих адаптивного воздействия. Адаптация на основе случайных расхождений ведёт к подстройке модели под шум и к деградации её прогностической способности.

### 2.5.3. Уровни адаптации

Адаптивное воздействие, направленное на устранение выявленного расхождения, может затрагивать различные компоненты геоинформационной системы. Уровни адаптации различаются глубиной модификации модели — от подстройки параметров до пересмотра самих критериев адаптации. С каждым уровнем связаны свой механизм воздействия, область применимости и временной масштаб срабатывания.

На параметрическом уровне корректируются значения коэффициентов прогностической модели; структура модели при этом сохраняется. Задача сводится к минимизации взвешенного функционала расхождений:

$$\theta^* = \operatorname{argmin}_{\theta} \sum_i w_i \cdot D_i(\theta), \quad (2.24)$$

где  $\theta$  — вектор параметров модели;  $D_i(\theta)$  — расхождение на  $i$ -м верифицированном событии при значениях параметров  $\theta$ ;  $w_i$  — весовой коэффициент события, учитывающий его значимость и давность. Оптимизация выполняется в скользящем окне или инкрементально, рекуррентной оценкой параметров по схеме фильтра Калмана и его модификаций [117, 159]. Это самый быстрый уровень адаптации. Он допускает автоматическое применение в оперативном контуре.

Структурный уровень охватывает модификации способов обработки данных при сохранении базовых моделей динамики. Сюда относятся переключения между альтернативными прогностическими моделями одного класса (например, между моделью постоянной скорости и моделью координированного поворота из §2.4), изменения состава учитываемых факторов, модификации правил слияния данных. Формальной реализацией структурной адаптации служит адаптивное переключение прогностических моделей в схеме ИММ: апостериорные вероятности соответствия моделей наблюдениям формируют основу для текущего выбора активной модели. Структурная адаптация требует предварительной формализации правил в виде, допускающей параметризацию.

Модельный уровень затрагивает закономерности, положенные в основу прогнозирования. Переход на этот уровень обоснован, когда диагностика нормализованных инноваций указывает на систематическое отклонение, не устраняемое параметрической или структурной адаптацией: расхождения сохраняют статистические свойства, несовместимые с классом используемой модели. Модельная адаптация предполагает замену класса модели целиком — переход от детерминированной к стохастической, от линейной к нелинейной, от кинематической к динамической. Автоматизация такой адаптации ограничена возможностями символьного вывода и экспертных правил. В общем случае модельное решение принимает оператор на основе диагностической информации, формируемой системой.

Мета-уровень направлен на адаптацию самих критериев и порогов адаптации. К нему относятся пересмотр весовых коэффициентов  $w_i$  в функционале параметрической оптимизации, пороговых значений для переключения между моделями на структурном уровне, размеров временного окна, критериев диагностики. Мета-адаптация обеспечивает рефлексивность системы — её способность оценивать собственные правила адаптации по накопленному опыту их применения. В большинстве сценариев мета-уровень остаётся под контролем оператора. Автоматизация адаптации правил

адаптации создаёт риск неконтролируемой эволюции системы и требует специальных защитных механизмов.

Соотношение уровней адаптации по критериям применимости и масштабу времени приведено в таблице 2.5-1.

Таблица 2.5-1 — Уровни адаптации геоинформационных моделей

Уровень	Содержание модификации	Условие инициации	Временной масштаб	Степень автоматизации
Параметрический	Корректировка численных значений коэффициентов модели	Систематическое количественное смещение при сохранении формы распределения расхождений	Оперативный (скользящее окно верификаций)	Автоматический
Структурный	Переключение между альтернативными моделями одного класса, изменение состава учитываемых факторов	Зависимость величины расхождения от режима поведения объекта или от неучтённых факторов	Тактический (от нескольких циклов верификации)	Полуавтоматический
Модельный	Замена класса прогностической модели	Систематическое отклонение статистики нормализованных инноваций, не устраняемое корректировкой параметров	Стратегический (от периода накопления диагностической статистики)	С участием оператора
Мета	Пересмотр весов, порогов, окон и критериев адаптации	Накопленные свидетельства неоптимальности самих процедур адаптации	Стратегический	С участием оператора

Пространственная и источниковая дифференциация адаптации составляет ортогональное измерение, пересекающее все четыре уровня. Оба измерения рассматриваются в §2.5.4 и §2.5.6.

#### 2.5.4. Пространственная дифференциация адаптации

Адаптация геоинформационных моделей не является глобальной операцией над всей моделью обстановки. Расхождения между прогнозами и

фактами обнаруживают пространственную неоднородность. В одних территориальных зонах прогностические модели работают в соответствии с ожидаемыми характеристиками; в других проявляются систематические отклонения. Причины неоднородности — пространственная вариабельность моделируемых процессов, различие условий наблюдения, неравномерность плотности и качества исходных данных. Глобальная адаптация усредняет расхождения по всей территории и стирает эту информацию. Результат — смещённая калибровка, при которой среднее качество прогнозов улучшается за счёт ухудшения их качества в ранее благополучных зонах.

Методологическое решение состоит во введении пространственной структуры адаптивных параметров. Параметры прогностической модели рассматриваются не как единый вектор  $\theta$ , а как поле параметров, заданное на пространстве:  $\theta(x, c)$ , где  $x$  — пространственная координата или идентификатор зоны;  $c$  — класс объекта. Адаптация обновляет значения  $\theta(x, c)$  только в тех областях параметрического пространства, где диагностика фиксирует статистически значимое систематическое расхождение. В зонах, где расхождения статистически не отличимы от случайных вариаций, параметры сохраняются неизменными.

Пространственная сегментация территории может реализовываться по-разному: через административные или функциональные зоны, через геоморфологические единицы, через адаптивные кластеры, формируемые по пространственной структуре расхождений. Выбор схемы — самостоятельная методологическая задача, решаемая с учётом характера моделируемой обстановки. Слишком крупная сегментация стирает локальные особенности. Слишком мелкая оставляет каждую зону со статистически недостаточной выборкой расхождений.

Если сохранение пространственной непрерывности модели критично, применяются геостатистические методы интерполяции корректирующих поправок между зонами. Альтернативный подход — локально-адаптивные модели с пространственно-переменными параметрами. Он не требует

дискретной сегментации, но предъявляет повышенные требования к объёму верификационных данных.

Пространственная дифференциация применима к любому из уровней §2.5.3. На параметрическом уровне она проявляется как зонально дифференцированная оптимизация коэффициентов. На структурном — как различный выбор активных моделей в разных зонах. На модельном — как локальная замена класса модели при сохранении класса в остальных зонах. Накопление истории зонально-дифференцированных адаптаций формирует пространственно-структурированную метаинформацию о поведении моделей, имеющую самостоятельную аналитическую ценность: по ней удаётся выявлять области систематической неадекватности моделей и связывать их с характеристиками территории.

### **2.5.5. Темпоральная организация адаптивного цикла**

Темпоральная организация адаптивного цикла определяется соотношением между скоростью накопления верификационных данных, периодом поступления новых наблюдений и требуемой оперативностью реакции. Выбор темпоральной схемы — не технический параметр, а методологический компромисс. Компромисс устанавливается между памятью системы о предшествующем опыте и её пластичностью, то есть способностью быстро реагировать на изменения условий.

Мгновенная адаптация транслирует каждое новое расхождение в немедленную корректировку модели. Такая схема максимально реактивна, однако подвержена влиянию случайных выбросов и может вызывать нестабильность параметров. Пакетная адаптация выполняется периодически на основе накопленной статистики; она устойчива, но отстаёт от реальных изменений обстановки. Компромиссная форма — скользящее окно обучения, в котором адаптация параметров опирается на окно последних  $N$  верифицированных событий, перемещающееся вдоль временной оси по мере поступления новых данных.

Размер окна  $N$  — ключевой методологический параметр. Короткое окно обеспечивает быстрый отклик на изменения условий, однако увеличивает статистическую чувствительность к случайным флуктуациям и может порождать колебательные режимы параметров. Длинное окно повышает устойчивость оценок за счёт усреднения по большему числу событий. Но оно же замедляет реакцию на реальные изменения и способно удерживать параметры модели в состоянии, не отвечающем актуальной обстановке. Количественное обоснование размера окна требует учёта ожидаемой скорости изменения условий и приемлемого уровня статистической вариации.

Принцип экспоненциального взвешивания событий внутри окна вводит дополнительную степень свободы в организации памяти. Веса  $w_i$  в функционале параметрической адаптации (§2.5.3) задаются убывающей функцией времени: свежие события получают больший вес, старые — затухающий. Принцип согласуется с экспоненциальной моделью затухания достоверности информации из §2.2.4: актуальность верификационного события убывает со временем с темпом, зависящим от класса объекта и характера обстановки.

Управляемый горизонт памяти адаптивной системы определяется размером окна и параметрами функции взвешивания. В стабильных обстановках, где условия сохраняются длительное время, горизонт расширяется и обеспечивает накопление статистически репрезентативной выборки. В динамичных обстановках горизонт сокращается — система переходит в режим повышенной пластичности. Управление горизонтом осуществляется оператором либо автоматически, на основе диагностики нестационарности процессов, выявляемой по изменению статистических характеристик расхождений.

### **2.5.6. Адаптивное управление источниками данных**

Замкнутый контур, сопоставляющий прогнозы с фактами и адаптирующий модели по расхождениям, расширяется до управления

источниками данных в том случае, когда результаты диагностики транслируются в требования к конфигурации и параметрам наблюдательных средств. Адаптивное управление источниками замыкает контур на втором уровне — уровне формирования фактической информации. В методе АИМТПО источники наблюдений становятся регулируемыми компонентами системы, а не только внешними поставщиками данных.

Адаптивное управление источниками опирается на пространственное распределение расхождений, которое накапливается в ходе адаптации (§2.5.4). Зоны повышенной неопределённости прогнозов — там, где систематические расхождения не снимаются параметрической адаптацией или где диагностика указывает на дефицит данных, — задают приоритеты для наблюдательных ресурсов. Способ реализации приоритетов определяется классом источника: управляемым отправляются команды перенацеливания, регламентным — корректировки программ наблюдений, автономным — модификации параметров бортовых алгоритмов при очередном сеансе связи либо сдвиг приоритетов в координационной схеме. Главный объект адаптивного управления — мобильные источники, траектория которых допускает оперативную модификацию; среди них первыми идут беспилотные платформы.

Коэффициенты надёжности источников, введённые в §2.3.6, динамически калибруются через бета-распределение с параметрами ( $\alpha$ ,  $\beta$ ). Параметры обновляются по результатам подтверждения или опровержения наблюдений. Формально это частный случай параметрической адаптации из §2.5.3, применяемый не к параметрам прогностических моделей, а к параметрам процедур интеграции данных. Общность механизма методологически значима: адаптация моделей и адаптация параметров интеграции действуют в одном замкнутом контуре и опираются на одни формальные принципы, что обеспечивает согласованность всех компонентов метода. Расхождение между прогнозом и фактом, атрибутированное к ошибке источника (§2.5.2), транслируется в обновление параметров ( $\alpha$ ,  $\beta$ ) этого

источника. Накопленное изменение коэффициента надёжности, в свою очередь, влияет на веса источника при последующих операциях интеграции.

Адаптивные пороги стробирования — второй механизм подстройки параметров интеграции к изменяющимся условиям. Пороги расстояния Махаланобиса, используемые при ассоциации наблюдений с объектами модели (§2.3.6), не могут быть зафиксированы как статические. При деградации условий наблюдения ожидаемая неопределённость возрастает; фиксированный порог начинает систематически отбрасывать корректные наблюдения как статистически неправдоподобные. Порог задаётся функцией условий наблюдения:

$$T_{\text{gate}}(K_{\text{усл}}) = T_{\text{base}} \cdot \varphi(K_{\text{усл}}), \quad (2.25)$$

где  $T_{\text{base}}$  — базовое значение порога, соответствующее штатным условиям;  $K_{\text{усл}}$  — интегральный коэффициент условий наблюдения;  $\varphi(\cdot)$  — монотонно убывающая функция, расширяющая порог пропорционально ухудшению условий. Параметризация сохраняет ассоциацию при деградации каналов; корректные наблюдения не теряются.

Для источников данных замкнутый контур устроен симметрично основному. Расхождения, атрибутированные ошибкам источников, дают сигнал для коррекции их параметров. Изменённые параметры меняют характер последующих наблюдений, а те — порождают новые расхождения, которые либо подтверждают коррекцию, либо служат основанием для её пересмотра. Методологический смысл этой симметрии в том, что принцип замкнутого контура распространяется и на модели источников данных, а не только на прогностические модели; так возникает иерархия вложенных адаптивных процессов.

### 2.5.7. Устойчивость и сходимость адаптивного процесса

Адаптивный процесс модифицирует модели, на основе которых формируются последующие прогнозы. Расхождения этих прогнозов с фактами

вновь используются для адаптации. Эта обратная связь — содержательное ядро замкнутого контура — одновременно является источником потенциальных нарушений устойчивости: колебательных режимов параметров, систематического дрейфа, расходимости. Формальные условия устойчивости адаптивного процесса составляют необходимую часть его методологического обоснования.

В рамках метода АИМТПО устойчивость обеспечивается совокупностью трёх формальных ограничений, действующих на разных уровнях: монотонность накопления достоверности в операции байесовского обновления; пороговый контроль переключения между уровнями адаптации по статистике нормализованных инноваций; ограничение скорости и амплитуды изменения параметров на параметрическом уровне.

Монотонность накопления достоверности. Достоверность  $D$  решения о состоянии объекта или о корректности модели, принимаемого по совокупности верифицированных событий, обновляется рекуррентной формулой:

$$D_{i+1} = D_i + (1 - D_i) \cdot d_{i+1}. \quad (2.26)$$

где  $D_i$  — накопленная достоверность после  $i$  верификаций;  $d_{i+1}$  — достоверность  $(i+1)$ -го подтверждения, нормированная к интервалу  $[0, 1]$ .

Формула обладает свойствами, существенными для устойчивости адаптивного процесса. При любом положительном подтверждении ( $d_{i+1} > 0$ ) достоверность монотонно возрастает и остаётся в диапазоне  $[D_1, 1]$ ; предел  $D \rightarrow 1$  достигается асимптотически и не превышает, что сохраняет корректную вероятностную интерпретацию при произвольном числе подтверждений. При полностью неинформативном подтверждении ( $d_{i+1} = 0$ ) достоверность сохраняется:  $D_{i+1} = D_i$  — система не теряет накопленную уверенность при поступлении неинформативного события и не увеличивает её безосновательно. Рекуррентная форма эквивалентна байесовскому обновлению §2.3.6 при  $K_{eff} = d_{i+1}$ , что обеспечивает согласованность с

процедурами интеграции данных. Соотношение между накопленной достоверностью  $D$  и шкалой достоверности  $\rho$  из §2.2.3:  $\rho$  — атрибут элемента модели обстановки на момент времени, обновляемый при каждом верифицированном событии;  $D$  — суммарная достоверность по последовательности подтверждений, накапливаемая в адаптивном цикле; текущее значение  $\rho$  совпадает с  $D$ , достигнутым к моменту последнего обновления.

Пороговый контроль переключения уровней. Переход от параметрической адаптации к структурной или модельной (§2.5.3) требует формального критерия, отличающего ситуацию, в которой корректировка параметров достаточна, от ситуации, требующей более глубокой модификации модели. Критерием служит статистика нормализованных инноваций  $v_{\text{norm}}$  из §2.5.2. Прогностическая модель считается адекватной, если на скользящем окне последних  $W$  шагов распределение  $v_{\text{norm}}$  соответствует распределению  $\chi^2$  с числом степеней свободы, равным размерности наблюдения (размер окна  $W$  выбирается по темпу накопления событий и требуемой статистической значимости).

Систематическое отклонение статистики — устойчивое превышение эмпирического среднего над ожидаемым за пределами доверительного интервала, автокоррелированность последовательных инноваций, тренд — служит сигналом о несоответствии модели реальности, не устранимом корректировкой параметров. Отклонение активирует переход к структурной или модельной адаптации. В теории фильтрации этот механизм известен как адаптивная оценка по инновациям (Innovation-Based Adaptive Estimation, ИВАЕ). В контексте метода АИМТПО он получает более широкое содержание — формальный критерий необходимости адаптации прогностической модели на основе пространственно-временной статистики расхождений.

Ограничение скорости и амплитуды изменения параметров. На параметрическом уровне устойчивость обеспечивается также ограничениями на величину корректировки за один цикл адаптации. Ограничения —

защитный механизм, предотвращающий реакцию на случайные выбросы в верификационных данных и обеспечивающий плавную эволюцию параметров. Максимальная скорость изменения и максимальная амплитуда за окно устанавливаются оператором и подлежат мета-адаптации (§2.5.3) при накоплении свидетельств их неоптимальности.

Три ограничения вместе — монотонность рекуррентного обновления достоверности, пороговый контроль переключения уровней по статистике инноваций и ограничения скорости параметрической адаптации — задают корректность адаптивного процесса в смысле теории адаптивных систем. Оценки достоверности удерживаются в допустимом диапазоне. Переключения между уровнями инициируются только при статистически значимых свидетельствах. Параметрические изменения не превышают установленных границ. Метод АИМТПО получает формальный критерий устойчивости, согласованный с теорией адаптивного управления.

Устойчивость адаптивного процесса не гарантирует [20, 116, 163, 167, 168] его эффективности. Процесс может быть устойчивым, но медленным; устойчивым, но сходящимся к субоптимальному состоянию. Количественная оценка эффективности опирается на динамику совокупного показателя качества прогнозов из §2.4 и на скорость накопления достоверности по рекуррентной формуле. Диагностика эффективности включается в мета-уровень адаптации (§2.5.3) и служит основанием для пересмотра критериев и порогов самого адаптивного процесса.

## **2.6. Выводы по главе 2**

### **2.6.1. Синтез методологических компонентов АИМТПО**

Изложенные в §2.1–§2.5 положения образуют пять взаимосвязанных методологических компонентов метода АИМТПО.

Первый компонент — принцип замкнутого пространственно-временного контура (§2.1). Контур задан как последовательность четырёх

эксплицитных преобразований: формирование прогнозного состояния  $\hat{S}(t+\Delta t | t)$  на основе текущей модели  $S(t)$ ; регистрация факта  $S(t+\Delta t)$ ; вычисление расхождения  $D(t+\Delta t)$  с учётом ковариационной структуры; адаптация модели по параметру, структуре или классу. Контур операционализирован формулой состояния обстановки и формулой прогнозного состояния (§2.1.2), что отличает его от качественных описаний цикла «наблюдение — решение — действие».

Второй компонент — структура геоинформационной модели обстановки (§2.2). Онтологическая основа — четырёхэлементная схема «объекты — состояния — события — процессы» с прогнозным состоянием как равноправным элементом онтологии. Эпистемологическая маркировка задана шестикатегорийной таксономией достоверности; темпоральная актуальность — экспоненциальным затуханием с класс-зависимым  $T_{1/2}$ ; операторская шкала полноты  $\gamma$  приводит оценки разных источников к сопоставимому виду.

Третий компонент — принципы пространственно-временной интеграции (§2.3). Первичная оценка доверия есть произведение коэффициента надёжности источника  $K_{\text{ист}}$  и коэффициента условий наблюдения  $K_{\text{усл}}$ . Независимые источники сливаются байесовской композицией: в гауссовском случае это информационный фильтр, при неизвестной корреляции — ковариационное пересечение [158]. Конфликтность диагностируется по трём критериям: расстоянию Махаланобиса ( $T_M = 11,35$ ), дивергенции Бхаттачарьи и темпоральной несогласованности. Прослеживаемость происхождения данных — условие того, чтобы расхождения, выявленные при верификации, можно было привязать к конкретным источникам и преобразованиям.

Четвёртый компонент — классы прогностических моделей и сценарный анализ (§2.4). Выбор класса задан соответствием семантическому типу объекта: инерционным — модели CV/CV+CT/CA, переключаемым между

режимами — IMM, мультимодальным — ансамбли взвешенных гипотез, распределённым — модели полей и пространственных структур. Адаптивное переключение внутри класса через IMM, между классами — через структурную адаптацию §2.5. Неопределённость прогноза формализована с учётом накопления по горизонту.

Пятый компонент — механизмы адаптации в замкнутом контуре (§2.5). Адаптация структурирована по четырём уровням: параметрическому, структурному (переключение моделей одного класса), модельному (замена класса), мета-уровню. Диагностика расхождений — через нормализованные инновации. Устойчивость зафиксирована рекуррентным соотношением накопления достоверности со свойствами монотонности при согласованных наблюдениях и ограниченности сверху, что переводит требование устойчивости из эвристики в формальный критерий.

Пять компонентов связаны единой операциональной логикой: принципы замкнутого контура реализуются через структуру модели обстановки, наблюдения интегрируются в модель по сформулированным правилам, прогнозные состояния порождаются классифицированными моделями, расхождения обрабатываются механизмами адаптации, возвращая цикл к исходным принципам.

### **2.6.2. Научная новизна результатов главы**

Научная новизна результатов Главы 2 раскрывается по шести направлениям, каждое опирается на операциональный результат, зафиксированный в §2.1–§2.5.

1. Принцип замкнутого пространственно-временного контура с эксплицитной формализацией четырёх преобразований (формирование прогноза, регистрация факта, вычисление расхождения, адаптация модели) в единой пространственно-временной системе координат. В отличие от концептуальных схем «наблюдение — решение — действие», контур задан

формулой состояния и формулой прогнозного состояния (§2.1.2) и пригоден для алгоритмической реализации.

2. Геоинформационная модель обстановки с прогнозным состоянием как равноправным элементом онтологии, шестикатегорийной таксономией достоверности, экспоненциальной моделью темпоральной актуальности с класс-зависимым  $T_{1/2}$  и операторской шкалой полноты  $\gamma$ . Совокупность элементов отличает модель от существующих ГИС-моделей, работающих с фактическими состояниями и плоской семантикой достоверности.

3. Метод пространственно-временной интеграции разнородных наблюдений с формальным аппаратом байесовского слияния через информационный фильтр и Covariance Intersection, типологией конфликтов по трём критериям (Махаланобиса в координатах, Бхаттачарьи в классификационных гипотезах, темпоральной несогласованности) с заданными порогами и механизмом динамической калибровки надёжности источников через обновление коэффициентов  $K_{ист}$  на основе истории расхождений.

4. Геоинформационный критерий выбора класса прогностической модели по семантическому типу объекта в модели обстановки. Критерий связывает онтологический слой (класс объекта) с алгоритмическим слоем (класс модели) и устраняет произвольность выбора модели из общего пула.

5. Формальный критерий устойчивости адаптивного процесса, заданный рекуррентным соотношением накопления достоверности со свойствами монотонности при согласованных наблюдениях и ограниченности сверху.

6. Обоснование принципа прослеживаемости происхождения данных и преобразований как необходимого условия адаптации в замкнутом контуре: без неё диагностика расхождений теряет определённость — невозможно установить, какой компонент породил ошибку, и обоснованно выбрать уровень адаптивной реакции.

Шесть направлений раскрывают пункты 3, 4, 5 и 8 раздела «Научная новизна» Введения применительно к методологическому ядру работы.

### **2.6.3. Положения, выносимые на защиту (по главе 2)**

В Главе 2 обоснованы три положения из общего списка положений диссертации.

Положение 1 (метод АИМТПО — формулировка см. Введение) обосновано в Главе 2 содержательно и формально.

Обоснование опирается на формализацию замкнутого контура в §2.1.2, где четыре преобразования заданы эксплицитно с формулами состояния и прогнозного состояния; на структуру модели обстановки в §2.2 с прогнозными состояниями как полноправными элементами и оценкой неопределённости; на принцип прослеживаемости как обязательное свойство интегрированной модели; на формальную диагностику расхождений через нормализованные инновации и на рекуррентное соотношение накопления достоверности в §2.5 как формальный критерий устойчивости. Метод реализует замкнутость контура через явные преобразования, обеспечивает прослеживаемость как функциональное условие адаптации и обладает доказуемыми свойствами устойчивости адаптивного процесса.

Положение 2 (геоинформационная модель обстановки — формулировка см. Введение) обосновано в Главе 2.

Обоснование опирается на шестикатегорийную таксономию достоверности §2.2.3, темпоральную актуальность с класс-зависимыми  $\lambda$  и  $T_{1/2}$ , операторскую шкалу полноты  $\gamma$  и включение прогнозных состояний в модель с оценкой неопределённости и её накопления по горизонту. Модель отличается от существующих ГИС-моделей, в которых прогноз выносится за пределы онтологии, а эпистемологическая сторона ограничивается одномерной шкалой достоверности.

Положение 5 (методология адаптивно-интегрированного тактического прогнозирования обстановки — формулировка см. Введение) обосновывается распределённо в Главах 2, 3, 4. Вклад Главы 2 — развёртывание методологических оснований.

Принцип замкнутости пространственно-временного контура формализован в §2.1.2 с обеспечением возврата результатов прогнозирования в систему как материала адаптации. Принцип эпистемологической дифференциации реализован через шестикатегорийную таксономию достоверности и темпоральную модель актуальности (§2.2). Принцип прослеживаемости операций как условия адаптации развёрнут в §2.3.7 и связан с диагностикой расхождений и адаптивной реакцией. Принцип темповой адекватности обработки классам обстановок обоснован в §2.4 через классификацию прогностических моделей. Принцип согласованности методологического, архитектурного и оценочного уровней реализуется в Главе 2 через единую систему преобразований контура, развёртываемую далее на архитектурный и оценочный уровни.

### **ГЛАВА 3. РАСПРЕДЕЛЁННАЯ ГЕОИНФОРМАЦИОННАЯ АРХИТЕКТУРА СИТУАЦИОННОГО ЦЕНТРА**

Методология АИМТПО, развёрнутая во второй главе, определяет принципы организации геоинформационного процесса, но не задаёт архитектуру реализующей их системы. Между методологическим и архитектурным уровнями возникает задача, не ставившаяся в Главе 2: реализовать замкнутый пространственно-временной контур в условиях пространственно разнесённых компонентов, с разнородными источниками данных и переменным качеством связи. Глава 3 представляет распределённую геоинформационную архитектуру ситуационного центра, реализующую метод АИМТПО.

Специфика рассматриваемой архитектуры определяется двумя обстоятельствами. Беспилотные авиационные системы (БАС) используются

как мобильные источники геопространственных данных, что разделяет функции обработки между бортовым и наземным контурами. Целевой средой функционирования являются ситуационные центры, что задаёт требования к оперативности, достоверности и форме представления информации. Сочетание этих обстоятельств приводит к архитектуре, в которой предобработка данных выполняется на стороне источника, интеграция и анализ — в наземной части, а обратная связь замыкает контур в единый адаптивный цикл.

### **3.1. Архитектура распределённого геоинформационного контура ситуационного центра**

#### **3.1.1. Концептуальные основания распределённой архитектуры**

Архитектура геоинформационной системы, реализующей метод АИМТПО [22, 76, 106, 107, 132], обеспечивает функции, заданные методологическими принципами: сбор и интеграцию данных от распределённых источников, формирование и хранение модели обстановки, генерацию прогнозов, верификацию и адаптацию моделей, предоставление информации потребителям. Количественная оценка вычислительной нагрузки интегрированной обработки (§2.3.2) показывает несостоятельность централизованного варианта при числе источников выше единиц; распределённая архитектура [110, 111, 165] принимается как базовое архитектурное решение. Распределение функций между пространственно разнесёнными узлами производится по двум совместно действующим критериям — оперативности обработки и пропускной способности каналов связи: функции с минимальной задержкой и доступом к первичным данным сенсоров размещаются ближе к источнику, функции интеграции и значительные вычислительные нагрузки — на верхних уровнях.

Распределённая реализация замкнутого контура должна сохранять работоспособность при переменном качестве связи, включая периоды её полного отсутствия. Автономность нижних узлов означает способность продолжать сбор и предобработку данных при потере связи с верхними

уровнями и передавать накопленные данные при её восстановлении; устойчивость верхних узлов — способность формировать оценки обстановки и прогнозы при неполноте данных от части источников. Функции замкнутого контура распределены по узлам так: нижние уровни поставляют данные для интеграции и верификации; верхние выполняют интеграцию, прогнозирование, верификацию и адаптацию; обратная связь к нижним уровням проходит через корректировку приоритетов наблюдений и параметров обработки.

### **3.1.2. Иерархия пространственно-временных контуров обработки**

Распределение функций между узлами архитектуры структурируется как иерархия пространственно-временных контуров. Каждый уровень характеризуется пространственным охватом обрабатываемых данных, временным горизонтом операций и степенью автономности при потере связи с верхним уровнем. Выделяются четыре уровня: бортовой уровень мобильного источника данных, уровень предварительной агрегации, наземный уровень формирования общей картины обстановки, центр консолидации и обучения. Содержание каждого уровня определено его ролью в замкнутом пространственно-временном контуре метода АИМТПО.

Бортовой уровень размещается на мобильном источнике геопространственных данных и выполняет операции с минимальной задержкой — первичную обработку сенсорного потока, нормализацию представления, оценку качества по локальному контексту, геопривязку, формирование первичного описания обнаруженных объектов. Сенсорный поток порядка сотен мегабит в секунду на один-два порядка превышает пропускную способность типовой радиолинии беспилотного носителя, что исключает передачу данных в исходной форме. Пространственный охват ограничен зоной непосредственного наблюдения, временной горизонт — миллисекундами и единицами секунд; при потере связи носитель сохраняет регистрацию и предобработку, накапливая результаты в буфере, и выполняет ранее назначенную задачу автономно.

На уровне предварительной агрегации данные подгруппы носителей в одной пространственной окрестности сводятся в общую картину. Здесь наблюдения приводятся к единой системе отсчёта, снимаются дубликаты, проводится перекрёстная верификация источников, а на выход подаётся агрегированный поток. Пространственный охват — зона действия подгруппы, временной горизонт — секунды. Уровень замыкает контур локально при потере связи с наземным уровнем; одновременно он разгружает наземный узел, поскольку попарное сопоставление выполняется уже на промежуточном уровне.

Иерархичность количественно обоснована двумя независимыми факторами. Первый — вычислительный. При отождествлении объектов в перекрывающихся зонах попарное сопоставление наблюдений растёт квадратично по числу источников; если вынести предварительное отождествление на промежуточный уровень, эта нагрузка распределяется по локальным узлам (количественная оценка введена в §2.3.2). Второй — пропускной: после семантического сжатия выходной поток одного носителя — единицы-десятки мегабит в секунду, при числе носителей порядка ста суммарный наземный поток приближается к гигабиту в секунду. Без промежуточного уровня агрегации наземный канал должен пропускать сумму выходных потоков всех носителей; с промежуточным уровнем суммарный поток на каждом межуровневом интерфейсе ограничен пропускной способностью канала между этим уровнем и следующим. Иерархия снимает оба ограничения одновременно.

Наземный уровень реализует полный замкнутый контур метода АИМТПО на масштабе всей зоны ответственности ситуационного центра: интеграцию агрегированных потоков от всех источников, формирование текущего состояния модели обстановки, генерацию прогнозов, верификацию, адаптацию моделей, обратную связь к нижним уровням, предоставление информации операторам и внешним системам. Пространственный охват — вся зона ответственности, временной горизонт — от секунд до часов. Доступ

к данным от всех источников и эталонной картографической основе позволяет выполнять процедуры, не реализуемые на нижних уровнях: разрешение конфликтов между источниками, сопоставление с эталоном, формирование интегральных оценок доверия. Частичная потеря связи с источниками преобразуется в повышение неопределённости интегрированных оценок без прекращения работы контура.

Центр консолидации и обучения объединяет данные нескольких ситуационных центров и обеспечивает функции долгосрочной адаптации: хранение истории наблюдений и прогнозов, ретроспективную верификацию, дообучение [23, 63] моделей, ведение реестра версий, распространение обновлённых моделей. Пространственный охват — несколько зон ответственности, временной горизонт — сутки и более. Центр не участвует в оперативном контуре; связь с нижними уровнями асинхронная, обновлённые модели возвращаются через процедуры контролируемого ввода в эксплуатацию.

Восходящие потоки несут результаты обработки с возрастающей степенью обобщения — от первичных данных бортового уровня до обобщённых историй в центре консолидации; нисходящие — управляющие воздействия и адаптационные обновления: приоритеты наблюдений и корректировки параметров от наземного уровня к нижним, обновления моделей от центра. Граница допустимой задержки нарастает при движении вверх по иерархии — миллисекунды на бортовом уровне, секунды на уровне агрегации, секунды-минуты на наземном уровне, часы и сутки в центре; нарастание отражает физическую природу задач: чем больше пространственный охват и число источников, тем больше время согласования.

Целевая распределённая архитектура геоинформационной системы ситуационного центра приведена на Рисунке Б.1 Приложения Б.

### **3.1.3. Архитектурная проекция подсистемы обеспечения доверия**

Методологические основания подсистемы доверия — состав факторов, процедуры динамической калибровки, интегральный показатель  $K_{ист}$  — раскрыты в §2.3.6. Здесь рассматривается распределение функций оценки по уровням иерархии и состав данных о доверии в межуровневых потоках.

Подсистема доверия распределена по уровням иерархии в соответствии с тем, какая информация физически доступна на каждом из них для формирования оценки. На бортовом уровне доступна локальная информация о состоянии собственных сенсоров носителя и условиях их функционирования; на уровне агрегации становится возможным сравнение наблюдений нескольких источников одной подгруппы; на наземном уровне — сопоставление наблюдений с эталонной базой и с историей функционирования источников. Каждый уровень формирует составляющую интегральной оценки, соответствующую его информационным возможностям. Интегральный показатель  $K_{ист}$ , по которому источники взвешиваются в процедурах слияния, формируется на наземном уровне; правила его свёртки из частных составляющих заданы в §2.3.6.

Бортовая самооценка опирается на встроенный контроль оборудования, условия наблюдения и согласованность показаний разных сенсоров одного носителя; её результат — локальный показатель достоверности в метаданных каждого передаваемого наблюдения. Самооценка не выявляет систематических искажений вне локального контекста и скрытой компрометации источника. Кросс-источниковая верификация на уровне агрегации сравнивает наблюдения нескольких источников одной подгруппы: систематические расхождения наблюдений одного источника с согласующимися наблюдениями остальных указывают на снижение его достоверности; процедура требует перекрытия зон наблюдения и даёт относительный показатель согласованности. Наземный уровень сопоставляет наблюдения с эталонной картографической основой и с историей функционирования источника, выявляя искажения, расходящиеся с устойчивыми элементами обстановки, и признаки деградации. Свёртка трёх

составляющих в интегральный показатель выполняется по правилам §2.3.6; согласование размещено на наземном уровне как единственном, где доступны все три составляющие одновременно.

Состав данных о доверии в межуровневых потоках определён архитектурной проекцией подсистемы. В восходящих потоках наблюдения сопровождаются локальной самооценкой бортового уровня; агрегированные данные от уровня агрегации — показателями кросс-источниковой согласованности. В нисходящих потоках наземный уровень передаёт интегральные показатели  $K_{ист}$  и предписания по использованию источников: понижение приоритета или временное исключение источников при критическом снижении показателя, корректировка весов при интеграции.

Архитектурная проекция подсистемы доверия согласована с требованием автономности уровней при потере связи. При разрыве связи с наземным уровнем уровень агрегации продолжает кросс-источниковую верификацию по доступным данным и формирует локальные оценки доверия для использования в собственных решениях; при разрыве связи с уровнем агрегации бортовой уровень опирается на самооценку. Восстановление связи сопровождается передачей накопленных оценок и их корректировкой в соответствии с информацией, ставшей доступной после восстановления.

#### **3.1.4. Сбалансированное объединение и разделение функций**

Реализация метода АИМТПО в распределённой архитектуре требует решения двух взаимосвязанных задач: объединения данных от гетерогенных источников в общем пространстве представления и разделения функций обработки между уровнями архитектуры с обеспечением их корректного взаимодействия. Методологические основания обеих задач рассмотрены в §2.3.

Гетерогенность источников проявляется в архитектуре как несовместимость форматов входных данных, систем координат, временных шкал, единиц измерения, протоколов передачи. Её масштаб превосходит то, что предполагают типовые архитектурные шаблоны: один класс источников

координатных данных одновременно поддерживает несколько форматов передачи, источники инерциальных данных представлены принципиально разными исполнениями с разными способами привязки временных меток, метрики состояния транспортной подсистемы передаются по протокольному стеку, не пересекающемуся с протоколами полезных данных.

Универсальная процедура, охватывающая все возможные источники, нежизнеспособна: расширение на новый класс требует её модификации, сложность которой нелинейно растёт с числом охваченных классов, а устойчивость снижается, поскольку особенности нового класса конфликтуют с уже реализованными правилами. Адаптерная организация подсистемы приёма данных локализует различия: ядро с фиксированным внутренним интерфейсом и набор адаптеров — по одному на каждый класс источников, преобразующих данные своего класса к этому интерфейсу. Подключение нового класса выполняется добавлением адаптера без изменения ядра и без влияния на адаптеры других классов. Внутренний интерфейс задаёт единое представление: нормализованные единицы измерения, временная метка в шкале UTC, пространственные координаты в системе WGS-84.

Адаптерная организация воплощает принцип интеграции из §2.3 в архитектурном слое: интеграция выполняется как двухэтапный процесс — приведение к общему представлению на границе системы и собственно интеграция внутри неё; разнесение этих этапов сохраняет однородность процедур внутренней обработки. В иерархии §3.1.2 адаптерная организация присутствует на нижнем уровне обработки каждого узла: адаптеры на бортовом уровне приводят данные сенсоров к внутреннему представлению, адаптеры на уровне агрегации — данные от нижестоящих узлов, адаптеры на наземном уровне — данные от внешних систем и эталонных баз.

Разделение функций обработки между уровнями реализуется на основе двух моделей информационного обмена. Поточковая событийная модель обеспечивает передачу данных реального времени: поставщик публикует

поток событий, потребители подписываются и получают каждое событие по мере его поступления; на неё опираются восходящие потоки наблюдений, междуровневая передача результатов первичной обработки и оповещений. Запросно-ответная модель обеспечивает обращение к относительно стабильным ресурсам — эталонной картографической основе, реестру источников, конфигурационным данным, архивам. Граница между двумя моделями обмена проходит по функциональному характеру передаваемых данных; конкретная привязка к интерфейсам описана в §3.2.3, §3.3.1 и §3.4.1.

Адаптерная организация приёма данных и эти две модели вместе образуют архитектурный паттерн распределённой геоинформационной системы, в которой работает метод АИМТПО. На границе системы гетерогенные внешние потоки приводятся к общему представлению, а внутри системы каждому потоку соответствует своя модель обмена — выбранная под его характер.

### **3.1.5. Масштабируемость и отказоустойчивость архитектуры**

Геоинформационный контур разворачивается в разных конфигурациях [147]: от единичных носителей с локальной задачей до развитых группировок, ведущих региональный охват. Параметры конфигурации меняются в широких пределах, и архитектура должна выдерживать эти изменения. Имеются в виду два требования. Во-первых, рост числа источников и расширение территориального охвата не должны вынуждать структурную перестройку — нужна масштабируемость в собственном смысле. Во-вторых, при сбоях отдельных компонентов основные функции системы должны сохраняться.

Квадратичную составляющую вычислительной нагрузки, появляющуюся при росте числа источников, принимает на себя уровень предварительной агрегации (см. §3.1.2). Данные от групп носителей агрегируются последовательно: на каждой ступени уменьшается объём передаваемых данных, и часть попарных сопоставлений выполняется уже на локальном узле. Наземный уровень получает уже агрегированные потоки и масштабируется линейно по числу узлов агрегации, а не по числу первичных

источников. Рост территориального охвата компенсируется сегментацией зоны ответственности на районы, обрабатываемые отдельными узлами наземного уровня; координация между узлами обеспечивает согласованность представлений на границах сегментов.

Устойчивость к отказам обеспечивается на каждом уровне архитектуры собственными средствами. На бортовом уровне — автономностью, заданной в §3.1.2: при потере связи с верхними уровнями носитель продолжает сбор и предобработку данных, накапливая результаты для последующей передачи; резервирование критических компонентов носителя — навигационной системы, вычислителя — повышает надёжность; деградация отдельных сенсоров отражается в метаданных качества, не прекращая функционирование носителя. На уровне агрегации и на наземном уровне — резервированием обрабатывающих узлов и хранилищ данных с репликацией основного и резервного узлов и кластерной организацией, распределяющей нагрузку.

При частичных отказах функциональность сокращается ступенчато. Потеря части источников сохраняет обработку данных от оставшихся с увеличением неопределённости интегрированных оценок без прекращения работы контура. Сокращение вычислительных ресурсов отдаёт приоритет формированию текущей картины и краткосрочному прогнозированию; долгосрочное прогнозирование и детальное архивирование сокращаются первыми. Политики деградации задают порядок сокращения функциональности в зависимости от характера отказа.

### **3.2. Бортовой контур пространственно-временной подготовки геопространственных данных**

Геоинформационная функция бортового контура определяется не составом сенсорного оборудования и не вычислительной платформой носителя, а формой, в которой данные поступают на вход наземной интеграции. Сырые сенсорные потоки в исходном представлении в модель обстановки включены быть не могут: их объём на один-два порядка превышает пропускную способность каналов связи, привязка ведётся к

локальным системам отсчёта сенсоров, формальная оценка достоверности в исходных потоках отсутствует. На бортовом уровне выполняются три операции, выделенные критерием необратимости — если операция связана с потерей информации, восстановление которой на стороне приёма невозможно, она размещается там, где исходная информация ещё доступна: семантическое сжатие первичных потоков, первичная оценка доверия с учётом контекста наблюдения, приведение исходящих сообщений к единому пространственно-временному представлению. Содержание подразделов 3.2.1–3.2.3 раскрывает каждую из них.

### **3.2.1. Семантическое сжатие на стороне источника**

Сенсорные комплексы на борту мобильного носителя генерируют поток порядка сотен мегабит в секунду по видеоканалам, лидарным сканерам и радиолокационным средствам; радиолиния беспилотного носителя располагает единицами мегабит в секунду. Разрыв на два порядка не закрывается канальными средствами — он определяет постановку задачи бортовой обработки.

Принцип, преодолевающий этот разрыв [16, 130, 187], для целей настоящей работы вводится под наименованием *семантическое сжатие на стороне источника*. Бортовой модуль преобразует первичные сенсорные потоки в поток геопространственных объектов с атрибутами — обнаружений, треков, агрегированных характеристик наблюдаемой территории — и передаёт результат этого преобразования вместо исходного сигнала. Сокращение объёма обеспечивается переходом от сигнального представления к объектному: размер записей определяется числом наблюдаемых сущностей и составом их атрибутов, а не разрешением и частотой кадров сенсоров. Объём метаданных обнаружений после сжатия — единицы и десятки мегабит в секунду на один носитель; снижение относительно первичных данных составляет один-два порядка.

Восстановить исходный кадр или облако точек по записи об объекте невозможно: объект, не выделенный бортовым модулем, в наземном контуре

не существует, и никакая последующая обработка его не воспроизведёт. Пропуски и ложные обнаружения, возникшие на бортовом уровне, транслируются в модель обстановки без возможности коррекции на наземной стороне.

Геоинформационное содержание операции — переход от непрерывного сенсорного представления к дискретному объектному в пространственно-временной системе координат. Каждое исходящее сообщение содержит запись о наблюдаемом объекте или треке, отнесённую к точке пространства и моменту времени, с указанием класса объекта, оценки достоверности классификации, погрешности локализации. Для треков фиксируется последовательность состояний, образующих траекторию, и оценки производных характеристик — скорости и направления движения.

Сохранение фрагментов первичных данных для верификации в наземном контуре выполняется выборочно. При обнаружении объектов высокой значимости, при срабатывании детекторов аномалий, при низкой оценке достоверности классификации в исходящий поток включаются ограниченные фрагменты исходного представления — изображения области детектирования, локальные участки облаков точек. На наземной стороне они используются для контроля качества бортового сжатия и для разрешения неоднозначностей при интеграции данных от нескольких источников.

### **3.2.2. Оценка доверия источника на стороне источника**

Свёртка факторов доверия с коэффициентами  $K_{ист}$  введена в §2.3.6; здесь определяется архитектурное место формирования их исходных значений. На наземной стороне вычисление по уже принятому сообщению невозможно: фактическое состояние источника, режим его работы, точность навигационной привязки в момент регистрации в наземном контуре недоступны. Оценка формируется на стороне источника и передаётся в составе сообщения.

Бортовой модуль располагает прямой информацией о состоянии собственного оборудования и о контексте регистрации: о фактической

точности навигационного решения, о режиме работы сенсоров, об условиях наблюдения, о наличии помех и расхождениях между показаниями избыточных датчиков. На этой информации строится текущая оценка  $K_{\text{усл}}$  и текущая компонента оценки  $K_{\text{ист}}$ , отражающая отклонение состояния источника от номинального. Принцип необратимости проявляется здесь в особенно жёсткой форме: для отдельных классов источников временная метка не входит в состав сообщения, а формируется из аппаратного сигнала точного времени, привязанного к моменту физической регистрации с микросекундной точностью; восстановление этой привязки на наземной стороне физически невозможно, и оценка точности временной привязки, входящая в  $K_{\text{усл}}$ , обязана формироваться на борту.

$K_{\text{ист}}$  на бортовом уровне формируется как корректировка статически заданного для данного типа источника базового коэффициента. Базовое значение отражает паспортные характеристики оборудования и устанавливается при его сертификации. Корректировка отражает текущее состояние и снижает значение  $K_{\text{ист}}$  при деградации сенсоров, при выходе параметров аппаратуры за номинальные диапазоны, при нарушениях целостности тракта обработки. Подсистема обеспечения доверия, рассмотренная в §3.1.3, вносит в оценку дополнительную компоненту, связанную с криптографическим подтверждением аутентичности.

$K_{\text{усл}}$  формируется по фактическим характеристикам наблюдения. Точность текущего навигационного решения и геометрический фактор конфигурации навигационных источников определяют верхнюю границу достижимой точности геопривязки; при ухудшении этих параметров  $K_{\text{усл}}$  снижается. Условия наблюдения для оптико-электронных каналов (уровень освещённости, метеорологическая видимость, ракурс наблюдения, наличие источников засветки) фиксируются бортовыми датчиками и входят в формирование коэффициента  $K_{\text{усл}}$ .

Передача оценок  $K_{ист}$  и  $K_{усл}$  в составе каждого сообщения обеспечивает корректную интеграцию на наземной стороне. При отсутствии явных значений приходится либо считать источники равноценными, что искажает результаты слияния, либо реконструировать оценки косвенно, что требует дополнительных каналов передачи метаданных и не воспроизводит фактический контекст регистрации. Бортовая оценка с явной передачей значений в составе сообщения замыкает цепь от условий наблюдения до весов в процедурах слияния.

К функциям бортовой оценки доверия примыкает обнаружение аномалий и деградации источника. Резкие изменения статистических характеристик сенсорных данных, рассогласования между избыточными источниками, выход параметров аппаратуры за допустимые границы фиксируются в виде маркеров, включаемых в сообщение. В критических случаях данные от деградировавшего источника помечаются как недостоверные и могут исключаться из передачи; информация о состоянии источника передаётся в наземный контур для учёта при интеграции.

### **3.2.3. Контурный обмен с ситуационным центром**

Сообщения, формируемые на бортовом уровне, поступают в наземный контур и включаются в процедуры обновления модели обстановки. Корректность интеграции зависит как от содержания сообщений, так и от формы их представления. Условие интегрируемости разнородных данных — отнесение к общему пространственно-временному базису — введено в §2.3 и операционализируется здесь в требованиях к структуре исходящих сообщений.

Структура исходящего сообщения фиксируется тремя обязательными атрибутами. Временная метка указывает момент регистрации первичных данных в единой шкале UTC с миллисекундным разрешением; отсчёт ведётся по бортовым часам, привязка к единой шкале выполняется средствами бортовой навигационной системы. Метка относится к моменту регистрации, а не к моменту передачи; задержки бортовой обработки компенсируются на

стороне приёма по разнице меток. Пространственные координаты передаются в единой геодезической системе; преобразование к ней на бортовом уровне выполняется с учётом положения и ориентации носителя, геометрии размещения сенсоров и параметров их полей зрения. Повторное преобразование на стороне приёма недопустимо: исходные локальные координаты в наземном контуре недоступны, их восстановление порождает ошибки, не поддающиеся диагностике. Третий атрибут — оценка точности пространственно-временной локализации: ковариационная матрица или скалярные показатели погрешности координат, оценка погрешности временной метки. Эти показатели формируются на бортовом уровне с учётом фактической точности навигационного решения и используются на наземной стороне при формировании весов в процедурах слияния.

Сообщение, не удовлетворяющее этим требованиям, в процедуры интеграции не включается: либо отклоняется на этапе приёма, либо принимается с понижением приоритета и выводится в отдельный поток для диагностики. Ослабление любого из трёх требований нарушает условие интегрируемости и переводит наземную часть метода АИМТПО в режим работы с заведомо несогласованными представлениями. Требования к структуре сообщения операционализируют методологический принцип интеграции, сформулированный в §2.3, и одновременно отвечают на положение пункта 6 паспорта специальности 1.6.20 в части совмещения разнородных пространственных данных. Конкретные протокольные стеки, реализующие передачу сообщений с указанной структурой, в настоящем разделе не рассматриваются — они принадлежат уровню инженерной реализации и фиксируются в составе программно-технических решений.

Передача сообщений с бортового уровня на наземный реализуется в потоковой событийной модели §3.1.4: бортовой модуль публикует поток сообщений по мере их формирования, наземная подсистема приёма получает каждое сообщение без явного запроса. Подгрузка фрагментов первичных

данных для верификации, упомянутая в §3.2.1, выполняется по запросно-ответной модели.

Прослеживаемость происхождения данных обеспечивается включением в сообщение идентификационных полей. Каждое сообщение содержит идентификатор носителя, идентификатор сенсора-источника, номер цикла обзора, параметры алгоритма выделения объекта; для треков — последовательность исходных обнаружений, послуживших основой формирования трека. Эта информация необходима для замыкания цикла верификации, выполняемого в наземном контуре (§3.3.3), и контура адаптивной обратной связи, рассматриваемого в §3.5. При расхождении прогноза с фактическими наблюдениями прослеживаемость локализует источник расхождения — конкретный носитель, сенсор, фрагмент данных — и направляет корректирующее воздействие на тот элемент бортового контура, в котором было внесено искажение.

Приоритизация передачи и буферизация при ограниченной пропускной способности канала организуются как средства управления потоком сообщений, не нарушающие требований к их структуре. Сообщения о значимых обнаружениях передаются в первоочередном порядке; менее приоритетные накапливаются в бортовом буфере и передаются при восстановлении канала с сохранением исходных временных меток. Старение данных учитывается на наземной стороне при оценке актуальности интегрированных представлений; этим бортовой контур включается в процедуры оценки достоверности модели обстановки наземной части метода АИМТПО.

### **3.3. Наземный контур интеграции геопространственных ресурсов и уточнения обстановки**

Наземный контур реализует функции, невыносимые на бортовой уровень: многогипотезное отождествление наблюдений от пространственно разнесённых источников, формирование агрегированной модели обстановки в масштабе всей зоны наблюдения, верификацию прогнозов с привлечением

накопленной истории. Вычислительный и информационный ресурс стационарного ситуационного центра снимает компромисс между полнотой обработки и оперативностью отклика, заложенный в проектирование бортового уровня.

Архитектурное членение наземного контура следует логике замкнутого контура АИМТПО: согласование данных от источников по единым формальным критериям, агрегация в согласованное представление обстановки, прогностическое расширение модели с последующей верификацией прогнозов поступающими фактическими данными.

### **3.3.1. Региональное согласование данных**

Региональное согласование на наземном уровне операционализирует принципы пространственно-временной интеграции из §2.3. Здесь сходятся данные от всех бортовых источников, наземных и морских сенсоров, внешних систем геопространственных ресурсов и сводятся в согласованное представление, пригодное для последующей агрегации.

Региональное согласование функционально размещено на двух уровнях иерархии [21, 22]. Уровень предварительной агрегации, введённый в §3.1.2, выполняет локальное согласование наблюдений от подгруппы источников в пределах одной зоны: первичную ассоциацию наблюдений соседних носителей, устранение дублирования при совпадающих наблюдениях одного объекта несколькими источниками подгруппы, формирование агрегированных потоков для передачи на верхний уровень. Полное региональное согласование (Рисунок 3.3-1) зоны ответственности ситуационного центра выполняется на наземном уровне; на нём становятся доступны все три необходимые опоры — данные от всех источников и всех узлов агрегации, эталонная картографическая основа, накопленная история функционирования источников. Распределение между двумя уровнями подчинено количественной оценке нагрузки из §2.3.2: попарное сопоставление в пределах подгруппы остаётся локальной операцией,

согласование на масштабе всей зоны выполняется однократно над уже агрегированными потоками.

Ассоциация наблюдений на наземном уровне устанавливает соответствие между поступившими наблюдениями и уже зафиксированными в модели объектами. Используются формальные критерии §2.3.6: расстояние Махаланобиса для оценки пространственной близости с учётом ковариаций положения, расстояние Бхаттачарьи для контроля согласованности классификационных распределений, темпоральный критерий для отбраковки соответствий, кинематически невозможных для данного класса объектов. Число потенциальных соответствий между наблюдениями от десятков источников растёт квадратично, и корректное разрешение конкурирующих гипотез требует алгоритмов многогипотезной ассоциации с отложенной фиксацией решений.

Формирование интегрированных описаний объектов сводит ассоциированные наблюдения от разных источников в единую оценку состояния. Для источников с известной и независимой ковариационной структурой применяется информационный фильтр (формула 2.21), допускающий аддитивное накопление вклада каждого источника. Для источников с неизвестной или частично коррелированной ковариационной структурой — характерный случай при интеграции данных из систем разного ведомственного происхождения — применяется ковариационное пересечение (формула 2.22), обеспечивающее гарантированно непротиворечивую оценку при любых скрытых корреляциях. Выбор схемы определяется свойствами источников. Применение информационного фильтра к коррелированным данным даёт оптимистичное смещение ковариации, искажающее последующие операции согласования.

Сопоставление с эталонной геоинформационной базой контролирует согласованность оперативных данных с устоявшимся знанием о территории. Эталонные слои — рельеф, гидрографическая сеть, дорожная сеть, застройка, административное деление — поступают из интегрированных систем

геопространственных ресурсов и образуют пространственный контекст, в котором интерпретируются результаты ассоциации. Выявленные расхождения относятся к одному из трёх типов: ошибки в оперативных данных, фактические изменения на местности, устаревание эталонов. Различение типов выполняется с привлечением показателей качества источников и истории верификации, что относит соответствующие решения к компетенции наземного уровня.

Выявление противоречий с генерацией событий замыкает региональное согласование на адаптивный контур, рассматриваемый в §2.5 и проецируемый на архитектуру в §3.5. Противоречия фиксируются по тем же критериям, что используются при ассоциации, но интерпретируются иначе. Превышение порога Махаланобиса означает теперь не отсутствие соответствия двух наблюдений одному объекту, а потенциальное несоответствие модели реальности, требующее диагностического анализа. Каждое выявленное противоречие порождает событие с атрибуцией к источникам и операциям согласования, что обеспечивает входные данные для механизмов адаптивной корректировки.

Бортовой и наземный уровни решают задачи разной размерности, и их разделение в архитектуре определяется сменой информационного контекста между уровнями, а не оптимизационными соображениями.



Рисунок 3.3-1 — Функциональная организация регионального согласования

### 3.3.2. Агрегация и формирование общей картины обстановки

Агрегация преобразует результаты регионального согласования в согласованное представление обстановки [38, 112], соответствующее структуре геоинформационной модели, определённой в §2.2. Архитектурное решение определяется требованием структурной идентичности модели на разных уровнях её реализации: структурно одна и та же модель должна функционировать на стороне отдельного бортового источника и на наземном уровне, различаясь не способом представления, а полнотой и масштабом. Из этого требования вытекает двухуровневая организация модели обстановки (Рисунок 3.3-2).

Локальная модель обстановки поддерживается на стороне отдельного бортового источника: содержание ограничено объектами в зоне непосредственной видимости, состоянием собственных подсистем и ближайшими событиями; локальная модель обеспечивает автономность источника при потере связи с наземным контуром. Глобальная модель обстановки формируется на наземном уровне путём агрегации данных от всех источников и интегрированных описаний, полученных на этапе

регионального согласования; её содержание охватывает зону наблюдения целиком, включая объекты, не наблюдаемые ни одним отдельным источником, но восстанавливаемые по пересечению полей наблюдения нескольких источников. Глобальная модель служит основой для прогнозирования, поддержки принятия решений и информационного обеспечения внешних потребителей.

Структура — состав слоёв, типизация объектов, форма представления состояний и событий, способ кодирования неопределённости — на обоих уровнях идентична (§2.2.1); различаются масштаб охвата, полнота состава и вычислительные требования. Идентичность структуры обеспечивает технологическую совместимость: данные бортового уровня включаются в глобальную модель без структурных преобразований, фрагменты глобальной модели передаются на бортовой уровень в качестве пространственного контекста.

Агрегация в глобальной модели включает несколько операций, разнородных по характеру. Темпоральное согласование сдвигает разновременные данные к единому референсному моменту через модели динамики, свои для каждого класса объектов: стационарные включаются без модификации, медленно изменяющиеся приводятся интерполяцией, динамичные — экстраполяцией по известной траектории. Пространственное согласование переводит данные разного разрешения в общее представление. Целевое разрешение зависит от назначения модели: для оперативной картины оно детальное, для обзорного представления — огрублённое. Разрешение конфликтов между источниками строится по характеру самого конфликта. Позиционные конфликты снимаются взвешенным усреднением с учётом ковариаций. Атрибутивные требуют согласования классификационных распределений. Структурные удерживаются как набор альтернатив до прихода уточняющих данных.

Прослеживаемость на этапе агрегации фиксируется графом происхождения. Для каждого элемента глобальной модели обстановки в нём

хранятся исходные наблюдения, веса, с которыми они учитывались, и применённые операции согласования. Без сохранённого графа происхождения становится невозможной атрибуция расхождений «прогноз — факт» к конкретным источникам и преобразованиям, что блокирует функционирование адаптивного контура. Граф происхождения служит на наземном уровне опорой для замыкания этапа интеграции на этап верификации; в этом отношении он играет ту же роль, что метаданные доверия на бортовом уровне для замыкания регистрации на интеграцию.

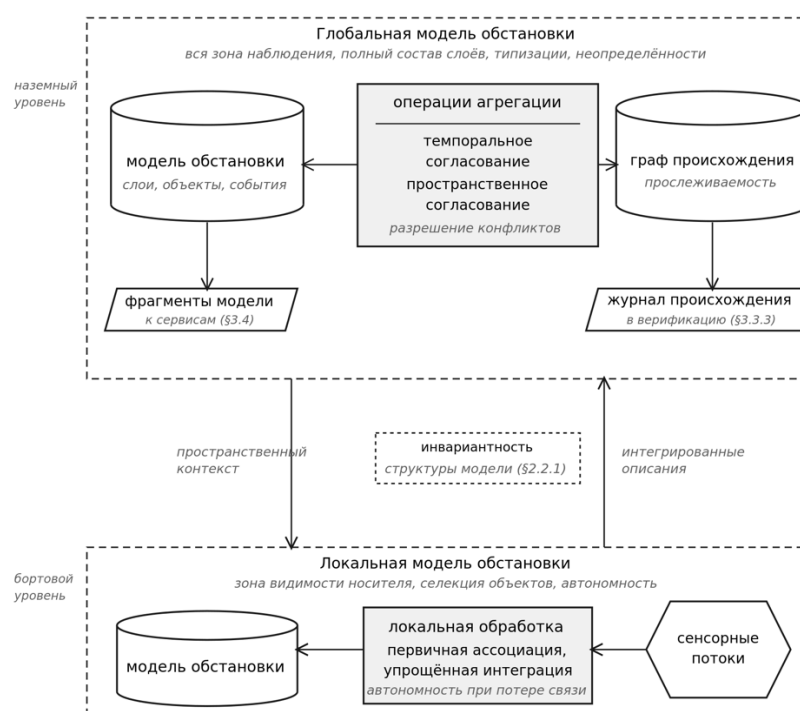


Рисунок 3.3-2 — Двухуровневая организация модели обстановки

### 3.3.3. Аналитический и прогностический слой

Аналитический и прогностический слои надстраиваются над агрегированной моделью [42, 47, 96, 140] обстановки и обеспечивают функциональное содержание поддержки принятия решений. Новых формальных конструкций по отношению к §2.4 эти слои не вводят — все необходимые элементы (классы прогностических моделей, режимы верификации, процедуры оценки расхождений) определены там. На уровне

архитектуры рассматривается размещение этих элементов в наземном контуре и их связь с другими подсистемами.

Аналитический слой обеспечивает преобразование данных модели обстановки в формы, пригодные для интерпретации оператором и для использования автоматизированными подсистемами. Анализ выполняется как на текущем срезе модели — пространственный анализ распределения объектов, их типизация, выявление аномалий, — так и на её темпоральных проекциях с обращением к истории состояний для выявления трендов, периодичностей, скачкообразных изменений. Аналитический слой не реализует прогнозирование как самостоятельную функцию; его роль в архитектуре — формирование входных данных для прогностического слоя в виде трендов, идентифицированных паттернов движения и классификаций сценариев развития обстановки.

Прогностический слой реализует процедуры формирования и сопровождения прогнозов в соответствии с классификацией прогностических моделей, введённой в §2.4. На наземном уровне применимы все классы моделей — от простой кинематической экстраполяции для динамичных объектов до сценарных моделей для развивающихся ситуаций; выбор класса определяется характером прогнозируемой сущности и доступностью данных. Часть классов недоступна на бортовом уровне — это методы адаптивного прогнозирования, опирающиеся на накопленную историю верификаций, и сценарные модели, требующие обращения к глобальной модели обстановки в её полном объёме.

Сформированные прогнозы включаются в модель обстановки наряду с фактическими данными, но с явным эпистемологическим маркированием: прогнозное состояние всегда отличимо от фактического, имеет привязку к моменту его формирования и к целевому моменту, для которого оно сформировано. Это исключает самоподтверждающиеся прогнозы — ситуацию, когда прогноз, ошибочно принятый за факт, накапливает и закрепляет ошибку.

Связь прогностического слоя с замкнутым контуром АИМТПО реализуется через процедуру верификации, размещённую в наземном модуле. По мере наступления целевых моментов прогнозов сформированные прогнозные состояния сопоставляются с фактическими данными, накопленными к этому моменту. Сопоставление включает идентификацию соответствий между прогнозными и фактическими объектами, вычисление расхождений по координатам, атрибутам и структуре, оценку значимости расхождений с учётом неопределённостей прогноза и факта. Результаты верификации фиксируются в хранилище в структурированной форме, обеспечивающей последующее обращение к ним со стороны механизмов адаптации (§3.5).

Объективный контроль качества геоинформационного обеспечения формируется как агрегированная статистика результатов верификации: доля подтверждённых прогнозов, средние и максимальные расхождения, распределение расхождений по типам и категориям объектов. Динамика этих показателей служит индикатором состояния системы — устойчивое улучшение свидетельствует об эффективности адаптации, устойчивое ухудшение указывает на деградацию источников или изменение характеристик прогнозируемой среды. В архитектурном плане контроль качества реализуется как функция аналитического слоя, оперирующая накопленными в хранилище результатами верификации.

Доступ потребителей к результатам анализа и прогнозам организован через геоинформационные сервисы, рассматриваемые в §3.4. Аналитический и прогностический слои формируют содержательное наполнение этих сервисов; сервисный слой отвечает за форму его предоставления потребителям различных категорий.

### **3.4. Геоинформационные сервисы поддержки принятия решений**

Геоинформационная модель обстановки, формируемая в наземном контуре, доступна потребителям через сервисный слой, преобразующий внутренние представления — хранилище данных, результаты интеграции, продукты прогнозирования — в геоинформационные сервисы со стандартизированными интерфейсами. Архитектурно сервисный слой связывает наземный уровень с внешним контуром: ситуационным центром, аналитическими подсистемами, внешними геоинформационными системами различной ведомственной принадлежности. Слабая связанность сервиса и потребителя — обращение через унифицированный интерфейс без знания внутренней реализации — критична в распределённой инфраструктуре межведомственного назначения, где состав потребителей меняется со временем, а сами потребители принадлежат различным ведомствам с несовпадающими режимами эксплуатации, требованиями к данным и политиками доступа.

Сервисный слой опирается на стандарты Open Geospatial Consortium [175, 176, 177, 178, 179, 180, 181] (далее — OGC): Web Map Service (WMS) и Web Map Tile Service (WMTS) — для картографических изображений, Web Feature Service (WFS) — для векторных объектов, Web Coverage Service (WCS) — для покрытий. Стандартизация обеспечивает интероперабельность между геоинформационными системами различных производителей и архитектурных поколений; конкретные транспортные протоколы и механизмы безопасности относятся к компетенции реализационного проектирования.

В терминах двух моделей информационного обмена, введённых в §3.1.4, сервисный слой реализует запросно-ответную модель: потребитель формирует запрос с указанием требуемых данных, сервис возвращает ответ. Поточковая событийная модель применяется на других интерфейсах архитектуры — между бортовым и наземным уровнями (§3.2.3), при оповещениях об изменении обстановки.

### **3.4.1. Типология геоинформационных сервисов**

Состав сервисов наземного уровня определяется характером операций над геоинформационной моделью обстановки и потребностями ситуационного центра в её использовании. Выделяются четыре функциональные категории, каждая соотносится с конкретными задачами пространственно-временного анализа.

Сервисы доступа к эталонным данным обеспечивают получение справочной геоинформационной основы — цифровой модели рельефа, картографических слоёв, формуляров известных объектов, зон ограничений — и используются как опорная информация при геопривязке наблюдений, верификации обнаружений, формировании контекста принятия решений. Сервисы записи результатов реализуют обратное направление обмена с эталонной базой: уточнённые координаты известных объектов, обнаружения новых объектов, продукты обработки фиксируются с указанием источника и времени. Сервисы пространственного запроса выполняют выборку объектов по пространственным и атрибутивным критериям и составляют операциональную основу процедур верификации в цикле «обнаружение — сравнение с эталоном — формирование уточнённых сведений». Сервисы визуализации [80, 89] предоставляют картографические продукты и слои обстановки в стандартных OGC-форматах, поддерживаемые в актуальном состоянии на наземном уровне. Сводная типология приведена в Таблице 3.4-1.

Таблица 3.4-1 — Функциональные категории геоинформационных сервисов

<b>Категория</b>	<b>Содержание</b>	<b>Направление обмена с эталонной базой</b>	<b>Типовые потребители</b>
Доступ к эталонным данным	ЦМР, картоосновы, формуляры объектов, зоны ограничений	Чтение	Подсистемы наземного модуля, аналитические сервисы

Категория	Содержание	Направление обмена с эталонной базой	Типовые потребители
Запись результатов	Уточнённые координаты, обнаружения, продукты обработки	Запись	Подсистема интеграции, верификации
Пространственный запрос	Выборка объектов в области, сопоставление с эталонами	Чтение	Процедуры верификации, аналитические сервисы
Визуализация	Картографические продукты, слои обстановки в OGC-форматах	Формирование на стороне модуля	Ситуационный центр, внешние ГИС

Указанная типология не претендует на исчерпывающую классификацию всех возможных геоинформационных сервисов. Её роль — выделить минимальный функциональный каркас, замыкающий контур «получение эталонов — наблюдение — верификация — фиксация результатов — предоставление потребителям»; прочие сервисы — прогностические, аналитические, операторской поддержки — опираются на этот каркас.

### 3.4.2. Эталонная геоинформационная база как единая точка интеграции

Сервисному слою в распределённой геоинформационной инфраструктуре нужен компонент, на котором определяется истинность геопространственных сведений [3, 84, 109]: эталоны, подтверждённые результаты наблюдений, актуальное состояние модели объектов. В рассматриваемой архитектуре эту роль выполняет эталонная геоинформационная база — объектно-ориентированная база данных, играющая роль геоинформационной инфраструктуры общего доступа.

Эталонная база совмещает две функции. Первая — хранение карты объектов: справочной информации о территории, известных стационарных объектах, их геометрических и атрибутивных характеристиках, версии изменений. Вторая — предоставление сервисов: запросов объектов в заданной

области, построения маршрутов с учётом ограничений, верификации обнаружений методом «факт-эталон», получения картографических продуктов в стандартных форматах. Совмещение этих функций — необходимое архитектурное условие: пространственные операции инкапсулированы на уровне инфраструктуры, а не вынесены в подсистемы-потребители, что исключает дублирование пространственной логики в каждом потребителе.

Эталонная база развёртывается в двух экземплярах — наземном и бортовом. Наземный экземпляр содержит полное состояние базы: эталонные слои, формуляры всех известных объектов, накопленные результаты наблюдений и верификаций, реестр версий моделей, эпизоды решений. Бортовой экземпляр функционирует как локальный кэш с подмножеством данных, релевантным для автономной задачи носителя на текущей миссии — эталонные слои на район действий, формуляры ожидаемых объектов, актуальные версии моделей. Бортовой кэш доступен через локальный сокет без задержки межконтурного канала и без зависимости от его доступности, что согласовано с требованием автономности бортового уровня (§3.1.2): при потере связи подсистемы продолжают обращения к локальному кэшу. Синхронизация между экземплярами выполняется в фоновом режиме при доступной связи.

Эталонная база используется двояко. С одной стороны, она поставляет эталоны для верификации обнаружений: при поступлении нового наблюдения подсистема обработки запрашивает у базы объекты в окрестности его координат и сопоставляет наблюдение с возвращённым множеством. Возможны три исхода — отождествление с эталоном, идентификация как нового объекта или пометка как недостоверного. С другой стороны, эталонная база — хранилище подтверждённых результатов. Уточнённые координаты, новые обнаружения, продукты обработки записываются в неё после верификационных процедур, и через те же сервисные интерфейсы эти данные доступны другим потребителям инфраструктуры. На этом схема замыкается:

то, что одна подсистема получила и подтвердила в собственном локальном контуре, поступает в общий ресурс без отдельной процедуры передачи.

Транспорт обращений к сервисам базы дифференцирован по сценарию: локальный сокет внутри узла, лёгкий сетевой транспорт в пределах сегмента, транспорт с гарантированной доставкой и шифрованием между разнесёнными узлами. Выбор транспорта инкапсулирован на уровне сервисного интерфейса: подсистема-потребитель формирует запрос в одной и той же форме независимо от того, локальный кэш или удалённый экземпляр она запрашивает.

Эталонная база опосредует обмен между подсистемами-производителями и подсистемами-потребителями данных, разрывая их прямые связи: производитель записывает результат в базу, потребитель читает его оттуда. В распределённой инфраструктуре с динамически меняющимся составом потребителей альтернатива — связи «каждый с каждым» — приводит к комбинаторному росту числа интерфейсов; количественная оценка эффекта посредничества дана в §3.4.3.

Контролируемая верификация записываемых данных входит в функции эталонной базы как сервисного компонента. Не каждое сведение, поступающее на запись, автоматически становится эталоном: процедура записи может включать проверку соответствия существующим эталонам, разрешение конфликтов, версионирование. Сервис записи реализует политику обновления, определяемую характером данных. Для новых обнаружений выполняется добавление с маркировкой источника и времени. Для уточнений координат известных объектов — версионирование с сохранением истории. Для продуктов обработки — замещение или дополнение в зависимости от типа продукта.

### **3.4.3. Межведомственное взаимодействие через ИССГР**

Распределённая геоинформационная инфраструктура межведомственного назначения предполагает одновременное функционирование на единой территории субъектов различной

ведомственной принадлежности (органы управления движением, силовые структуры, гражданские операторы, подразделения экстренного реагирования) с несовпадающими требованиями к составу данных, точности, актуальности, уровню конфиденциальности. Контролируемую передачу данных между субъектами в рассматриваемой архитектуре обеспечивает интегрированная сетевая система геопространственных ресурсов [37, 71, 72] (ИССГР) — геоинформационная инфраструктура общего доступа, в которую ситуационный центр публикует данные и из которой внешние потребители читают их согласно своим правам доступа.

При прямых двусторонних связях между  $N$  подсистемами-производителями и  $M$  потребителями каждая пара требует собственного интерфейса с согласованным форматом, протоколом, политикой доступа; общее число интерфейсов составляет  $N \times M$ , и каждое изменение в одной подсистеме потенциально затрагивает все её прямые связи. При посредничестве ИССГР каждая подсистема поддерживает один интерфейс с инфраструктурой — на запись для производителей, на чтение для потребителей; общее число интерфейсов составляет  $N + M$ , и изменение в одной подсистеме затрагивает только её собственный интерфейс. При числе субъектов порядка десяти разница — 100 интерфейсов против 20, преимущество посредничества становится решающим.

Схемы прямого взаимодействия и посредничества через ИССГР сопоставлены на Рисунке Б.2 Приложения Б.

Межведомственное взаимодействие опирается на четыре принципа. Посредничество ИССГР: ситуационный центр не взаимодействует с потребителями напрямую — подсистема формирования внешних данных публикует обработанные и верифицированные сведения в ИССГР, потребители читают через стандартные интерфейсы, подключение нового потребителя требует только настройки прав. Двухуровневое разграничение доступа: на стороне центра — фильтр по профилю потребителя (типы данных,

набор атрибутов, допустимая точность, географический охват), на стороне ИССГР — стандартные механизмы авторизации; двухуровневость исключает ситуацию, при которой ошибка авторизации на стороне инфраструктуры открывает данные, формирование которых было ограничено на стороне центра. Стандартизированные OGC-интерфейсы: WFS для векторных объектов, WMS/WMTS для картографических продуктов. Универсальный формат обмена — GeoJSON Feature Collection [189], в котором каждый передаваемый объект представляется как элемент с геометрией и набором свойств.

Концептуальная схема передаваемого объекта представляет элемент с геометрией одного из типовых видов и набором свойств:

```
{
  "type": "Feature",
  "geometry": {
    "type": "Point",
    "coordinates": [lon, lat, alt]
  },
  "properties": {
    "object_class": "...",
    "coord_err_m": ...,
    "timestamp_utc": "...",
    "access_level": "..."
  }
}
```

Геометрия элемента варьируется по характеру объекта (Point — точечная локализация, Polygon — группировка, LineString — трек перемещения). Свойство `access_level` явно фиксирует уровень доступа, при котором сведение допустимо к раскрытию, и используется на стороне инфраструктуры для контроля чтения. Конкретный синтаксис, схемы валидации и кодовые таблицы относятся к уровню инженерной реализации.

Передача данных через ИССГР организуется в трёх режимах. Регламентный режим основан на периодической публикации с заданной частотой (термин выбран во избежание омонимии со сценарным анализом §2.4.5). Ситуационный режим инициируется по событию — при обнаружении значимого изменения обстановки, нарушении пространственных

ограничений, утрате связи с подвижной платформой. Режим по запросу выдаёт срез данных по конкретному району или объекту. Режимы не исключают друг друга и могут применяться к одному набору данных параллельно. Сводка режимов приведена в Таблице 3.4-2.

Таблица 3.4-2 — Режимы публикации данных в ИССГР

Режим	Триггер публикации	Характер данных	Назначение
Регламентный	Заданная частота	Текущие позиции, параметры группового движения	Поддержание актуальной картины
Ситуационный	Значимое событие	Параметры события и его пространственный контекст	Оповещение о критических изменениях
По запросу	Запрос потребителя	Срез данных по запрошенному району или объекту	Адресная выдача

#### 3.4.4. Сервисы операторской поддержки

Операторы и аналитики, работающие с геоинформационной моделью обстановки [40, 79, 93], — отдельная категория потребителей сервисного слоя. Адаптация данных к их задачам отличается от подготовки данных для автоматизированных подсистем: оператор работает с интегрированными визуальными и текстовыми формами, в которых пространственная информация сочетается с атрибутивной, текущее состояние — с прогнозным, наблюдаемые сведения — с оценками неопределённости.

Сервисы операторской поддержки формируют рабочие представления обстановки, дифференцированные по уровню управления: тактический уровень требует детального отображения отдельных объектов с быстрым доступом к их характеристикам, оперативный — обобщённых представлений с выделением критических элементов, стратегический — агрегированных показателей состояния территории. Адаптация к уровням реализуется через сервисные параметры запроса — пространственный охват, степень детализации, период актуализации, типы агрегатов: один и тот же

геоинформационный ресурс через различную параметризацию даёт детальную карту локального района или обобщённую схему всего театра действий.

Отображение неопределённости включается в состав сервисов операторской поддержки как самостоятельная функция. Позиционная неопределённость передаётся эллипсами ошибок и зонами вероятной локализации; атрибутивная — градиентами и интервальными подписями; структурная — степенью прозрачности объектов, пропорциональной вероятности их существования. Неопределённость не выносится в обособленный слой, а присутствует в самом представлении: оператор не получает возможности интерпретировать сведения как полностью достоверные в случаях, когда они таковыми не являются.

Различение фактических и прогнозных состояний обеспечивается графическими средствами: пунктирные обводки, особые маркеры, цветовая дифференциация. Сценарный анализ поддерживается режимами параллельного отображения альтернатив, последовательного переключения между сценариями, композитного представления зон совпадения и расхождения. Сервис предоставляет несколько режимов восприятия альтернатив; выбор между ними определяется характером задачи.

Интерактивность сервисов включает масштабирование, выборку объектов, измерение расстояний и площадей, временную навигацию по историческим и прогнозным срезам обстановки; дашборды объединяют картографическое представление с графиками временных рядов и индикаторами статусов, связанными перекрёстным обновлением. Производительность достигается распределением обработки между сервером и клиентом — серверным кэшированием тайлов, передачей только видимой области, инкрементальным обновлением — что обеспечивает работу с обширными геоинформационными ресурсами при ограничениях канала и вычислительных мощностей рабочих мест.

### **3.5. Контур адаптивной обратной связи в распределённой геоинформационной системе**

Методологические основания адаптивного контура — формула устойчивости, статистика инноваций, четыре уровня адаптации, управляемый горизонт памяти — раскрыты в §2.5. Здесь развёрнута их проекция на распределённую архитектуру §3.1–§3.4: размещение функций адаптации по уровням иерархии, согласование темпов и архитектурная поддержка устойчивости замкнутого контура.

#### **3.5.1. Формальная структура контура**

Замкнутый контур метода АИМТПО развёрнут по всем уровням распределённой архитектуры [20, 116, 167]. На каждый уровень приходится та доля адаптации, которая соответствует его положению в потоке данных, информационной полноте и допустимому темпу принятия решений; распределение этих функций между уровнями составляет содержание подраздела.

На бортовом уровне адаптация ограничена локальной фильтрацией наблюдений и компенсацией текущих условий регистрации: параметров шума, дрейфа сенсоров, частных смещений калибровки. Глобальные модели обстановки, прогнозы и статистика инноваций бортовому уровню недоступны. Замкнутый адаптивный контур здесь не образуется; бортовая обработка поставляет данные с метаданными качества, необходимыми для последующей оценки расхождений на вышестоящих уровнях. Локальная модель обстановки, поддерживаемая на бортовом уровне (§3.3.2), не подвергается самостоятельной адаптации — её обновление выполняется через нисходящие потоки от наземного уровня.

Уровень предварительной агрегации выполняет промежуточную нормализацию потоков от групп бортовых источников: сведение к единым пространственно-временным опорным системам, согласование частот, предварительный отсев аномалий. Адаптивная функция этого уровня сводится к корректировке весов источников в пределах группы и к локальному

перераспределению полосы передачи в зависимости от текущей информативности данных. Параметрические корректировки уровня агрегации согласованы с глобальной адаптацией наземного уровня и применяются в окне единиц — десятков секунд.

Основной контур замкнутой адаптации развёрнут на наземном уровне. Здесь сопоставляются прогнозные состояния с поступающими наблюдениями, вычисляется статистика нормализованных инноваций, выполняется параметрическая коррекция коэффициентов прогностических моделей, весов источников, порогов обнаружения и классификации. Объект адаптации — глобальная модель обстановки, формируемая на этом же уровне (§3.3.2). Темп параметрической адаптации соответствует темпу обновления модели обстановки и составляет единицы секунд. На том же уровне в окне десятков секунд выполняется структурная адаптация моделей: корректировка правил классификации, схем разрешения конфликтов, параметров темпорального согласования. Структурная адаптация инициируется паттернами расхождений, которые параметрической коррекцией не устраняются, и выполняется автоматически в пределах ограниченного множества допустимых модификаций.

Центр консолидации и обучения сосредоточивает функции, требующие длительного накопления статистики и доступа к полному историческому контексту. Здесь выполняется модельная адаптация: замена класса прогностической модели для отдельных типов объектов или районов, перенастройка ансамбля моделей, ввод в эксплуатацию новых моделей по результатам валидации на накопленных данных. Темп модельной адаптации — минуты и десятки минут. На этом же уровне реализуется мета-адаптация: пересмотр критериев устойчивости, границ применимости моделей, нормативных уровней значимости расхождений. Мета-адаптация затрагивает основания принятия решений, поэтому её применение возможно только при участии оператора с фиксацией обоснований в журнале конфигурации.

Структура контура непрерывного обучения показана на Рисунке Б.3 Приложения Б.

Привязка функций адаптации к конкретным уровням определяется двумя ограничениями. Информационное ограничение: уровень способен поддерживать ту адаптацию, для которой ему доступны данные требуемой полноты и глубины ретроспективы. Темповое ограничение: уровень не должен принимать решения медленнее, чем этого требует динамика обстановки на его горизонте. Функции, для которых оба ограничения выполняются на нескольких уровнях, размещаются вариативно в зависимости от конфигурации развёртывания. Соответствие уровней адаптации уровням архитектуры приведено в таблице 3.5-1.

Замкнутость контура в распределённой реализации поддерживается вертикальными потоками между уровнями. Восходящие потоки несут результаты верификации и накопленную статистику инноваций; нисходящие — обновлённые конфигурации параметров, моделей и обновления локальных моделей обстановки на бортовом уровне. Передача в восходящем направлении организована по потоковой событийной модели обмена, в нисходящем — преимущественно по запросно-ответной (см. §3.1.4): низлежащий уровень получает обновление при наступлении соответствующего цикла адаптации либо по запросу при инициализации.

Таблица 3.5-1 — Распределение уровней адаптации по уровням архитектуры

<b>Уровень адаптации</b>	<b>Уровень архитектуры</b>	<b>Темп применения</b>	<b>Степень автоматизации</b>
Параметрический	Наземный уровень	Единицы секунд	Полная
Структурный	Наземный уровень	Десятки секунд	Полная в пределах допустимых модификаций
Модельный	Наземный уровень или центр консолидации	Минуты — десятки минут	Полуавтоматическая, с подтверждением

Уровень адаптации	Уровень архитектуры	Темп применения	Степень автоматизации
Мета (пересмотр критериев)	Только центр консолидации	Часы и более	Только под контролем оператора

Таблица 3.5-1 фиксирует распределение четырёх основных уровней адаптации, сформулированных в §2.5.3, по архитектурным уровням. Бортовой уровень и уровень предварительной агрегации в таблице не выделены отдельной строкой, поскольку выполняемые на них локальные формы адаптации не образуют самостоятельных уровней замкнутого контура. Бортовой уровень обеспечивает локальную фильтрацию наблюдений и компенсацию текущих условий регистрации (см. выше); уровень агрегации — корректировку весов источников в пределах подгруппы. Эти операции подчинены параметрической адаптации наземного уровня, который остаётся основным местом замыкания контура.

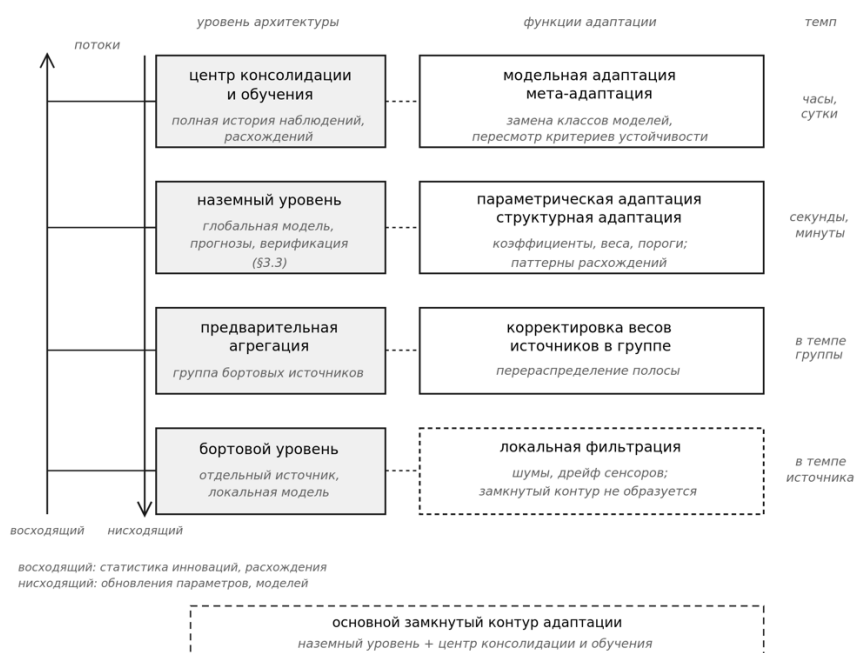


Рисунок 3.5-1 — Распределение уровней адаптации по уровням распределённой архитектуры

### 3.5.2. Темпоральная организация адаптации

Управляемый горизонт памяти и скользящее окно, обоснованные в §2.5.5, в распределённой архитектуре приобретают форму иерархии

темпоральных окон, привязанных к уровням иерархии (Рисунок 3.5-2). У каждого уровня адаптации своё окно наблюдения за инновациями и своё окно применения корректировок; именно согласованность этих окон между уровнями даёт темпоральную когерентность контура.

Параметрическая адаптация на наземном уровне работает на коротких окнах — единицы и десятки секунд. Выбор длины окна — компромисс. С одной стороны, в окне должно накапливаться достаточно инноваций для статистически устойчивой оценки текущих смещений. С другой — слишком длинное окно сгладит реальные изменения обстановки устаревшими наблюдениями, и оценка сместится. Окно скользит вместе с обновлением модели обстановки: каждая новая порция наблюдений вытесняет из расчётной выборки самые старые.

Средние окна — десятки секунд и минуты — обслуживают структурную адаптацию на том же наземном уровне. Окно этой длительности нужно для накопления повторяющихся паттернов расхождений: обнаружение паттерна требует наблюдения нескольких независимых эпизодов одного типа. Структурное окно вложено в параметрическое: в каждый момент его данные включают результаты уже выполненных параметрических корректировок, и структурная адаптация работает с теми смещениями, которые параметрическая не сняла.

Длинные окна — десятки минут и часы — закреплены за модельной адаптацией в центре консолидации. Горизонт памяти определяется здесь не темпом обстановки, а статистическими требованиями к объёму данных, необходимому для обоснованной замены модели. Длинное окно существует параллельно коротким, не вытесняя их, и накапливает результаты в более низком темпе, опираясь на полные истории прогнозов и расхождений, передаваемые с наземного уровня.

Сверхдлинные окна — сутки и более — поддерживают мета-адаптацию. На этом горизонте оцениваются устойчивые изменения характеристик предметной области: смена сезонных режимов, изменение состава активных

источников, накопленное расхождение фактической и нормативной точности. Решения, принимаемые на сверхдлинном окне, определяют рамки, в которых оперативные уровни могут действовать автоматически.

Согласование окон между уровнями опирается на два архитектурных механизма. Первый — иерархическая фильтрация: результаты, накопленные на коротком окне нижнего уровня, передаются на верхний уровень не как отдельные события, а как агрегированные сводки за интервал верхнего окна. Объём передаваемых данных снижается, устойчивые паттерны отделяются от шума. Второй — каузальное упорядочение: корректировка верхнего уровня применяется только после того, как на нижнем уровне завершилась обработка соответствующего временного интервала. Циркулярные зависимости между окнами разной длительности исключаются.

Иерархия окон совмещает в одном контуре разные требования к темпу адаптации. На коротком окне идёт быстрая адаптация, рассчитанная на оперативную точность; длинное окно отдано медленной адаптации, которая обеспечивает устойчивость структурных решений. Длина окна каждого уровня задаётся допустимым на этом окне классом изменений модели: чем глубже изменение, тем длиннее окно, на котором оно может быть обосновано.

Темпы адаптации согласуются с характерным периодом полураспада  $T_{1/2}$  класса обстановки (§2.2.4, Таблица 2.2-6). При  $T_{1/2}$  порядка минут адаптация работает на короткой шкале — секунды и десятки секунд; при  $T_{1/2}$  порядка часов шкала становится средней, от минут до десятков минут. Иерархия окон параметризуется значениями  $T_{1/2}$ ; в этом и состоит реализация принципа темповой адекватности обработки классам обстановок (Положение 5).

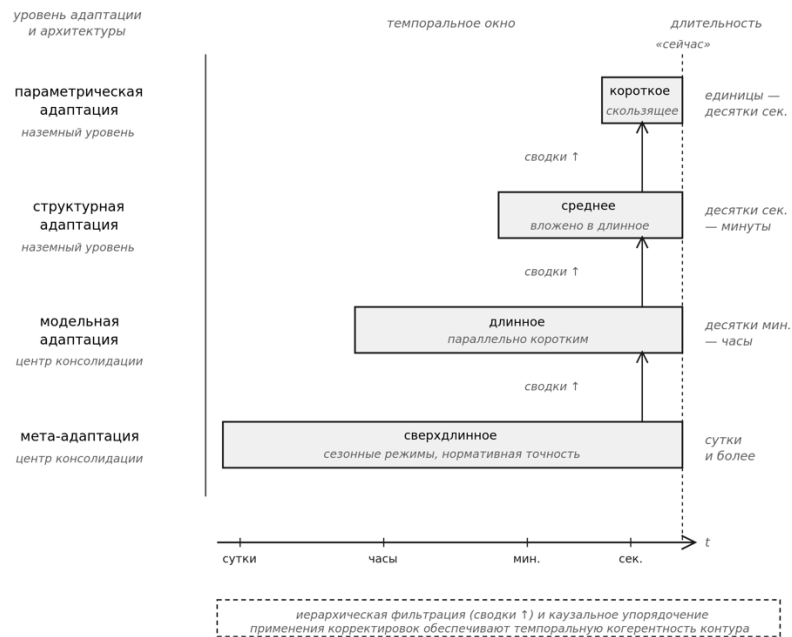


Рисунок 3.5-2 — Иерархия темпоральных окон адаптации в распределённой архитектуре

### 3.5.3. Ограничения и устойчивость

Условия устойчивости адаптации, ограничения на скорость и амплитуду корректировок, страховочный возврат к предыдущему состоянию обоснованы в §2.5.7. На уровне архитектуры решается другая задача: как распределить средства контроля по уровням иерархии и кто отвечает за их срабатывание.

Расхождения между прогнозом и наблюдением диагностируются на наземном уровне через статистику нормализованных инноваций. На этом же уровне ведётся первичный контроль устойчивости. Текущие значения статистики сравниваются с допустимыми диапазонами; накопленные распределения проверяются — не появилось ли систематическое смещение выше нормативного уровня. Срабатывание индикаторов на этом уровне ведёт либо к локальной коррекции параметров, либо к временной заморозке параметрической адаптации до выяснения причин — в зависимости от характера выявленной аномалии.

Мониторинг скорости и амплитуды изменения параметров, обоснованный в §2.5.7, размещён в центре консолидации. На этом уровне отслеживаются интегральные характеристики адаптивного процесса по всему

наземному контуру: суммарная величина параметрических сдвигов за интервал, частота переключений знака корректировок, амплитуда отклонений от исходных значений. Превышение пороговых уровней этих характеристик свидетельствует о возможной потере устойчивости и инициирует вмешательство: снижение темпа адаптации, ограничение амплитуды одиночной корректировки, расширение демпфирования. Размещение мониторинга в центре обусловлено необходимостью сводить статистику по всем компонентам наземного контура и сопоставлять текущие характеристики с исторической нормой.

Страховочный механизм возврата к предыдущей версии модели реализуется как координированная процедура, охватывающая наземный уровень и центр консолидации. Перед применением структурной или модельной адаптации сохраняется снимок конфигурации соответствующего уровня: на наземном уровне — в локальном версионизируемом хранилище, в центре консолидации — в каталоге моделей с полной историей. Откат инициируется при устойчивом росте статистики инноваций после адаптации, превышении мониторинговых порогов или эскалации со стороны оператора. На наземном уровне откат выполняется немедленно, с восстановлением предыдущей конфигурации; в центре консолидации — с фиксацией обстоятельств в журнале и анализом причин неудачной адаптации.

Распределение средств контроля устойчивости между уровнями определяется тем же информационно-темповым принципом, что и распределение функций адаптации. Локальная диагностика инноваций требует доступа к текущему потоку наблюдений и работает в темпе единиц секунд — её место наземный уровень. Интегральный мониторинг адаптивного процесса требует сводной статистики и работает в темпе минут — он отнесён к центру консолидации. Страховочный откат разделён по тому же признаку: оперативный откат параметрических конфигураций — на наземном уровне, откат моделей и пересмотр критериев — в центре с участием оператора.

Архитектурное разделение средств устойчивости означает, что ни один уровень иерархии не контролирует адаптацию изолированно. Локальная диагностика на наземном уровне боится от частных аномалий, не проявляющихся в интегральной статистике. Интегральный мониторинг в центре консолидации обнаруживает системный дрейф, не различимый в коротком окне. Контроль самих критериев устойчивости — мета-уровень — закреплён за оператором и боится от ошибок в основаниях принятия решений.

Обратимость параметрической адаптации, заявленная в Положении 3, обеспечивается ограничениями на скорость и амплитуду корректировок по §2.5.7 и сохранением журнала параметрических воздействий: каждое воздействие фиксируется с временной меткой и значением применённой дельты, что позволяет при срабатывании страховочного механизма восстановить параметры на величину  $W$  шагов назад, где  $W$  — размер скользящего окна параметрической адаптации. В отличие от обратимости модельной адаптации, опирающейся на снимки конфигурации, параметрическая обратимость реализуется через инкрементальное обратное применение зафиксированных дельт.

#### **3.5.4. Контур непрерывного обучения**

Модельная адаптация (§3.5.1), размещённая в центре консолидации [86, 104, 214], в темпе минут и десятков минут не сводится к локальной перенастройке параметров — она требует полноценного цикла обучения новых версий моделей, их валидации и контролируемого ввода в эксплуатацию на нижестоящих уровнях. Архитектурным выражением этого цикла служит контур непрерывного обучения, опирающийся на три функциональных блока: накопление обучающих данных, валидацию в защищённом окружении, поэтапное развёртывание с возможностью отката.

Накопление обучающих данных опирается на материал, регулярно поступающий из наземного контура в центр консолидации в составе восходящих потоков. Каждый прогноз, сформированный на наземном уровне,

сопровождается результатами его верификации при поступлении фактических наблюдений на целевой момент; пара «прогноз — фактическое состояние» с зафиксированной структурой расхождений составляет естественную обучающую запись. Накопленные записи формируют выборку, охватывающую устойчивые режимы обстановки и их эволюцию во времени; на этой выборке обучаются кандидаты в новые версии моделей. Объём накапливаемых данных и горизонт ретроспекции определяются темпом изменений предметной области и согласованы со сверхдлинным окном мета-адаптации (§3.5.2).

Валидация кандидата в защищённом окружении предшествует его развёртыванию. Окружение воспроизводит условия работы наземного контура — состав и характеристики источников, темп поступления данных, типичные сценарии обстановки — без воздействия на оперативную геоинформационную модель. Кандидат проверяется на отдельной выборке, не использовавшейся при обучении, и сопоставляется с действующей версией модели по критериям точности прогнозирования, устойчивости к деградации источников, качества прослеживаемости результатов. Валидация формирует оценку, по которой принимается решение о допуске кандидата к развёртыванию; кандидаты, не прошедшие валидацию, остаются в реестре с фиксацией причин отклонения.

Поэтапное развёртывание реализует контролируемый перенос валидированной модели в оперативный контур. Кандидат вводится в эксплуатацию параллельно с действующей версией: часть прогнозов формируется новой моделью, остальные — действующей; результаты обеих ветвей сопоставляются на реальном потоке данных в течение интервала, достаточного для статистически значимой оценки преимущества. Если кандидат подтверждает преимущество, доля его участия постепенно расширяется до полного замещения. Если кандидат показывает деградацию относительно действующей версии, развёртывание останавливается и иницируется откат к предыдущему состоянию. Откат опирается на снимки

конфигурации в реестре моделей (§3.5.3) и выполняется без перерыва работы оперативного контура.

Контур непрерывного обучения замыкает архитектурную проекцию методологии адаптации (§2.5) на верхнем уровне иерархии. Параметрический и структурный уровни адаптации работают с действующими моделями в темпе секунд и десятков секунд; модельный уровень обновляет сами модели в темпе минут — десятков минут, опираясь на накопленную статистику расхождений и валидацию на исторических данных; мета-уровень в темпе часов и более пересматривает критерии допуска кандидатов и нормативные уровни значимости расхождений.

### **3.6. Выводы по главе 3**

Глава 3 переводит методологические принципы метода АИМТПО, сформулированные в Главе 2, в распределённую архитектуру геоинформационной системы ситуационного центра. Методологическим требованиям Главы 2 в архитектуре сопоставлены пространственное размещение функций по уровням иерархии, темп работы каждого уровня и состав метаданных, сопровождающих данные в межуровневых потоках.

#### **3.6.1. Архитектурный синтез решений главы 3**

Архитектура, развёрнутая в §3.1–§3.5, опирается на пять взаимосвязанных решений.

Иерархия пространственно-временных контуров обработки (§3.1.2) охватывает четыре уровня — бортовой, предварительной агрегации, наземный, центр консолидации — и опирается на двойное количественное обоснование: вычислительный фактор (квадратичный рост попарных сопоставлений) и пропускной фактор (порядка гигабита в секунду на наземном узле при ста источниках). Допустимая задержка нарастает по иерархии — от миллисекунд на борту до часов в центре консолидации.

Адаптерная организация подсистемы приёма (§3.1.4) локализует гетерогенность источников в наборе адаптеров; ядро оперирует данными в едином внутреннем представлении (UTC, WGS-84, нормализованные

единицы). К адаптерному паттерну примыкает бортовой контур: три операции, выделенные критерием необратимости, — семантическое сжатие, оценка доверия источника, приведение сообщений к единому пространственно-временному базису — размещены на стороне источника, где исходная информация ещё доступна.

Двухуровневая модель обстановки — локальная на бортовом источнике для автономности при потере связи и глобальная на наземном уровне для агрегации данных от всех источников — реализует принцип структурной идентичности из §2.2.1: структура моделей идентична, различаются масштаб охвата и полнота состава, что обеспечивает технологическую совместимость уровней без структурных преобразований при обмене.

Сервисный слой и эталонная геоинформационная база (§3.4) — точка интеграции с межведомственным взаимодействием. Эталонная база развёрнута в двух экземплярах: наземном и бортовом. Бортовой экземпляр доступен через локальный сокет, без задержки межконтурного канала; благодаря этому при потере связи система не останавливается. Межведомственный обмен идёт через ИССГР со стандартизированными OGC-интерфейсами (WMS, WMTS, WFS, WCS). При числе субъектов порядка десяти посредническая схема снижает число поддерживаемых интерфейсов с  $N \times M$  до  $N + M$ . Каждый передаваемый объект несёт указание уровня доступа.

Контур адаптивной обратной связи (§3.5) реализует методологию Главы 2 в условиях распределённой архитектуры. Параметрический и структурный уровни адаптации работают на наземном узле в окне единиц и десятков секунд; модельный и мета-уровни — в центре консолидации, в окне минут и больше. Модельный уровень развёрнут как контур непрерывного обучения с обратимостью адаптационных воздействий на каждом этапе. Прослеживаемость поддерживается сквозными метаданными, идущими от бортового сообщения через граф происхождения агрегации к результатам верификации; по этой цепочке любое расхождение прогноза с фактом привязывается к конкретному источнику или преобразованию.

### 3.6.2. Соответствие положениям, выносимым на защиту

Глава 3 раскрывает архитектурную проекцию Положений 1, 3 и 5.

Положение 3 (распределённая геоинформационная архитектура ситуационного центра межведомственного назначения — формулировка см. Введение) обосновано в Главе 3 совокупностью пяти отличительных архитектурных признаков, перечисленных ниже.

Архитектурных отличительных признаков пять: двойное количественное основание иерархии — по вычислительной нагрузке и пропускной способности; двухэкземплярное развёртывание эталонной базы с автономным функционированием бортового контура при потере связи (§3.4.2); посредническая схема межведомственного обмена через ИССГР со снижением числа интерфейсов с  $N \times M$  до  $N + M$  (§3.4.3); контур непрерывного обучения с обратимостью адаптационных воздействий на каждом этапе развёртывания (§3.5.4); сквозная прослеживаемость операций согласования и адаптационных воздействий через распределённую обработку. Экспериментальное подтверждение преимущества по нагрузке на канал связи и допустимой задержке обработки приведено в §4.5.3.

Положение 1 (геоинформационный метод АИМТПО) получает в Главе 3 архитектурную развёртку: замкнутый контур, формализованный в Главе 2, разворачивается в распределённую обработку с сохранением методологических свойств — устойчивости рекуррентного процесса, монотонности накопления достоверности, обратимости адаптационных воздействий. Размещение уровней адаптации по иерархии распределённой архитектуры задано в §3.5.1.

Сквозная прослеживаемость происхождения данных обеспечена архитектурными средствами на всём пути от регистрации сенсором до выработки решения: идентификаторы носителя, сенсора, цикла обзора и алгоритма обработки в бортовом сообщении; граф происхождения на этапе агрегации; результаты верификации, сопровождающие прогнозные элементы; снимки конфигурации перед структурной и модельной адаптацией;

журналирование расхождений и применённых корректировок (см. §3.5). Откат возможен на любом уровне адаптации.

Без прослеживаемости расхождение фиксируется, но не атрибутируется, и замкнутый контур теряет диагностическую способность. Экспериментальное подтверждение полноты прослеживаемости — время восстановления цепочки происхождения данных 0,4 с — приведено в §4.5.4.

Положение 5 (методология адаптивно-интегрированного тактического прогнозирования обстановки — формулировка см. Введение) обосновывается распределённо в Главах 2, 3, 4. Вклад Главы 3 — архитектурная развёртка пяти принципов методологии и пяти переориентаций геоинформатики.

Принципы методологии получают в Главе 3 следующее архитектурное воплощение. Согласованность методологического, архитектурного и оценочного уровней — через прямое отображение преобразований замкнутого контура (Глава 2) в архитектурные контуры обработки: наблюдение — в бортовом контуре, интеграция — в наземном, прогнозирование и верификация — в подсистеме согласования, адаптация — в контуре непрерывного обучения (§3.5.4). Темповая адекватность обработки классам обстановок развёрнута через иерархию контуров с двойным количественным основанием. Замкнутость контура обработки на архитектурном уровне реализована через двухэкземплярное развёртывание эталонной базы и контур непрерывного обучения с обратимостью адаптационных воздействий. Прослеживаемость операций как условия адаптации поддержана сквозными метаданными источника, операций согласования и адаптационных воздействий. Эпистемологическая дифференциация состояний модели — через явное маркирование прогнозных состояний в модели обстановки. Переориентации Положения 5 получают архитектурное воплощение: встроенный прогностический контур — через подсистему согласования с интегрированной прогностической функцией; адаптивное управление источниками — через нисходящие потоки наземного уровня к бортовым;

атрибуция неопределённости каждого элемента модели — через сквозные метаданные распределённой обработки; темпово-зависимая обработка — через размещение уровней адаптации в соответствующих темповых окнах; методологический цикл — через контур непрерывного обучения с возвратом результатов верификации в адаптивные модули (§3.5.4).

## **ГЛАВА 4. МЕТОДИКА МНОГОФАКТОРНОЙ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ВЕРИФИКАЦИЯ**

Метод АИМТПО, методологически развёрнутый в Главе 2 и архитектурно реализованный в Главе 3, требует оценки эффективности в задачах пространственно-временного анализа. Глава 4 представляет методику многофакторной оценки эффективности, которая агрегирует частные метрики качества геопространственных данных, прогнозирования и сервисов поддержки принятия решений в иерархическую структуру с интегральным показателем *E*. Объект оценки — методологические основания Главы 2 и архитектурные решения Главы 3. Их экспериментальная верификация выполнена на имитационной среде распределённого мониторинга..

### **4.1. Метрики качества геопространственных данных в динамических условиях**

#### **4.1.1. Особенности оценки качества в распределённых геоинформационных системах**

Оценка качества геопространственных данных в распределённых геоинформационных системах [148, 150, 151, 152], реализующих метод АИМТПО, отличается от классических подходов, закреплённых в стандартах серии ISO 19100. Метрологическая ситуация определяется тремя взаимосвязанными факторами: собственный набор параметров качества каждого источника изменяется во времени в зависимости от условий функционирования (для бортовых сенсоров — высоты, скорости,

метеорологических условий, технического состояния); интеграция данных от множества источников порождает качественные характеристики, не сводимые к простой композиции исходных показателей, поскольку процедуры слияния, разрешения конфликтов и согласования вносят собственный вклад в результирующее качество; единый эталон для верификации в реальном времени отсутствует, что делает невозможным применение классических схем оценки точности через сопоставление с референсными данными.

Динамический характер обстановки порождает противоречие между требованием актуальности и необходимостью верификации: данные, прошедшие полный цикл контроля качества, могут утратить актуальность к моменту завершения проверки. Разрешение этого противоречия лежит в плоскости перехода от апостериорной оценки качества к априорным и оперативным механизмам, встроенным в процесс формирования и интеграции данных. Структура оценки качества в распределённой геоинформационной системе показана на рисунке 4.1-1.

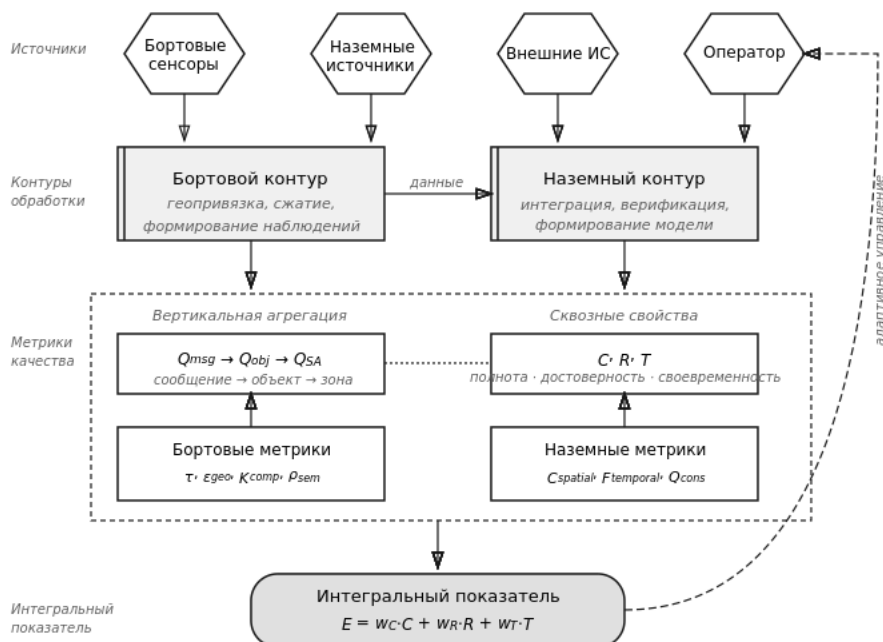


Рисунок 4.1-1 — Структура оценки качества в распределённой геоинформационной системе

В контексте метода АИМТПО качество геопространственных данных приобретает функциональную интерпретацию: данные считаются качественными в той мере, в какой они обеспечивают достоверное формирование модели обстановки и надёжное прогнозирование её состояния. Качество становится контекстно-зависимой величиной, формализуемой через многомерный вектор показателей:

$$Q(d, t, c) = \langle q_1(d, t, c), q_2(d, t, c), \dots, q_m(d, t, c) \rangle, \quad (4.1)$$

где  $d$  — элемент данных (наблюдение, объект модели обстановки, геопространственный слой);  $t$  — момент времени оценки;  $c$  — контекст использования (тип задачи, требования потребителя);  $q_i(d, t, c)$  —  $i$ -й частный показатель качества ( $i = 1, \dots, m$ ). Размерность  $m$  и состав компонент  $q_i$  определяются уровнем агрегации, на котором ведётся оценка. Прослеживаемость происхождения данных, введённая в архитектуре распределённой системы (глава 3), создаёт информационную основу для многоуровневой оценки: каждый элемент сопровождается метаданными, фиксирующими источник, условия формирования, применённые преобразования и результаты промежуточных проверок, что позволяет восстанавливать историю качества элемента и атрибутировать обнаруженные проблемы конкретным этапам обработки или источникам.

Иерархия метрик и сквозные свойства информационного обеспечения. В главе 4 принята трёхуровневая иерархия метрик. На компонентном уровне оцениваются характеристики отдельных алгоритмов и подсистем — точность геопривязки, эффективность семантического сжатия, задержки обработки в бортовом контуре, полнота пространственного покрытия и темпоральная актуальность в наземном контуре. На системном уровне частные характеристики агрегируются в три сквозных свойства: полноту  $S$  (способность системы охватить наблюдением все значимые объекты в зоне ответственности), достоверность  $R$  (корректность классификации и идентификации объектов), своевременность  $T$  (соответствие темпа обработки

динамике обстановки). Выбор именно этих свойств опирается на трёхуровневую модель ситуационной осведомлённости (восприятие, понимание, прогноз) и на специфику работы в распределённой среде с гетерогенными источниками; каждое из них критично самостоятельно, дефицит по любому не компенсируется качеством остальных. На интегральном уровне системные метрики сворачиваются в обобщённый показатель эффективности  $E$  как взвешенную функцию  $C, R, T$  с весами, обоснованными в §4.4 методом анализа иерархий.

Описанная иерархия «компонентный — системный — интегральный» задаёт агрегационную ось системы метрик. Параллельно ей в структуре главы действует функциональная ось — по подсистемам геоинформационной системы: метрики качества геопространственных данных, метрики пространственно-временного прогнозирования, метрики эффективности сервисов поддержки принятия решений, многофакторная оценка. Две оси ортогональны: каждой функциональной подсистеме соответствуют свои компонентные характеристики, входящие в системные свойства  $C, R, T$  и далее в интегральный показатель  $E$ . Положение 4, выносимое на защиту, опирается на агрегационную ось; структурное членение главы — на функциональную.

Вертикальная агрегация показателей качества. Параллельно покомпонентной структуре в главе 4 вводится агрегационная вертикаль, фиксирующая накопление качества вдоль информационной цепочки: от отдельного наблюдения через объект модели обстановки к ситуационной осведомлённости по зоне в целом. Вертикаль формализуется тремя связанными показателями:  $Q_{msg}$  для отдельного сообщения (§4.1.2),  $Q_{obj}$  для объекта модели обстановки и  $Q_{SA}(Z)$  для ситуационной осведомлённости в пределах зоны  $Z$ . Системные свойства  $C, R, T$  и вертикальная агрегация  $Q_{msg} \rightarrow Q_{obj} \rightarrow Q_{SA}(Z)$  задают две дополняющие проекции качества: горизонтальную, по сквозным свойствам информационного обеспечения, и вертикальную, по уровням интеграции данных.

#### 4.1.2. Метрики качества бортового контура

Бортовой контур пространственно-временной подготовки геопространственных данных [13, 14, 15], архитектура которого представлена в разделе 3.2, выполняет функции первичного формирования, нормализации и предобработки данных от бортовых сенсоров беспилотных авиационных систем в условиях ограниченности вычислительных ресурсов, требований реального времени и пропускной способности каналов связи. Система метрик качества бортового контура отражает эти особенности и охватывает темпоральную, информационную и пространственную составляющие.

Общая задержка  $\tau_{total}$  от регистрации сенсорных данных до их доступности в наземном контуре складывается из последовательных компонент:

$$\tau_{total} = \tau_{sense} + \tau_{proc} + \tau_{pack} + \tau_{comm} + \tau_{recv}, \quad (4.2)$$

где  $\tau_{sense}$  — задержка получения данных от сенсора;  $\tau_{proc}$  — время бортовой обработки;  $\tau_{pack}$  — время формирования пакета для передачи;  $\tau_{comm}$  — задержка передачи по каналу связи;  $\tau_{recv}$  — время приёма и распаковки в наземном контуре. На качество бортового контура влияют те компоненты, которыми он непосредственно управляет —  $\tau_{proc}$  и  $\tau_{pack}$ .

Бортовая интеллектуальная обработка снижает объём передаваемых данных, не теряя при этом информационной ценности. Её эффективность характеризуют три метрики. Коэффициент информационного сжатия:

$$K_{comp} = \frac{V_{raw}}{V_{sem}}, \quad (4.3)$$

где  $V_{raw}$  — объём исходных сенсорных данных;  $V_{sem}$  — объём структурированных данных после бортовой обработки. Сохранение информационной ценности:

$$\rho_{sem} = \frac{I_{sem}}{I_{raw}}, \quad (4.4)$$

где  $I_{\text{raw}}$  оценивается ретроспективно — полной обработкой сохранённых сырых данных на наземных вычислительных мощностях. Интегральный показатель эффективности семантического сжатия:

$$E_{\text{sem}} = \rho_{\text{sem}} \cdot \log K_{\text{comp}}. \quad (4.5)$$

Логарифмирование  $K_{\text{comp}}$  необходимо для того, чтобы коэффициент сжатия не доминировал в произведении при больших значениях; благодаря этому оценка  $E_{\text{sem}}$  остаётся устойчивой и при сильном сжатии, и при малых потерях информационной ценности.

Пространственная составляющая зависит от качества навигационного решения бортовой инерциально-навигационной системы (БИНС), параметров сенсора и корректности геометрических преобразований. Общая ошибка геопривязки точечного объекта при допущении некоррелированности составляющих:

$$\varepsilon_{\text{geo}} = \sqrt{\varepsilon_{\text{nav}}^2 + \varepsilon_{\text{sens}}^2 + \varepsilon_{\text{relief}}^2 + \varepsilon_{\text{alg}}^2}, \quad (4.6)$$

где  $\varepsilon_{\text{nav}}$  — ошибка навигационного решения;  $\varepsilon_{\text{sens}}$  — ошибка сенсора (геометрическое разрешение, оптическая дисторсия, точность внутреннего ориентирования);  $\varepsilon_{\text{relief}}$  — ошибка, связанная с неучтённым рельефом или ошибкой цифровой модели рельефа;  $\varepsilon_{\text{alg}}$  — ошибка фотограмметрической [85, 188] и геометрической обработки. При движении носителя навигационная ошибка зависит от времени:

$$\varepsilon_{\text{nav}}(t) = \varepsilon_{\text{nav}}(t_0) + v_{\text{drift}} \cdot (t - t_0) + \varepsilon_{\text{dyn}}(a, \omega), \quad (4.7)$$

где  $\varepsilon_{\text{nav}}(t_0)$  — начальная ошибка привязки;  $v_{\text{drift}}$  — скорость дрейфа инерциальных датчиков;  $\varepsilon_{\text{dyn}}(a, \omega)$  дополнительная ошибка от линейных ускорений  $a$  и угловых скоростей  $\omega$ . Качество геопривязки в реальном времени отслеживается через метрику согласованности последовательных наблюдений:

$$C_{geo} = \frac{1}{N} \cdot \sum_i \mathbb{1}[|p_{obs}(i) - p_{pred}(i)| \leq \delta], \quad (4.8)$$

где  $p_{obs}(i)$  — наблюдаемая позиция объекта;  $p_{pred}(i)$  — предсказанная позиция по модели движения и предыдущим наблюдениям;  $\delta$  — пороговое значение допустимого расхождения;  $\mathbb{1}[\cdot]$  — индикаторная функция;  $N$  — количество отслеживаемых объектов.  $C_{geo}$  это доля наблюдений, согласующихся с ожидаемой динамикой сцены, и одновременно индикатор устойчивости геопривязки: резкое падение  $C_{geo}$  указывает на сбой навигационной системы, потерю временной синхронизации или крупные ошибки сенсора. Связь этапов бортовой обработки с метриками качества показана на рисунке 4.1-2.

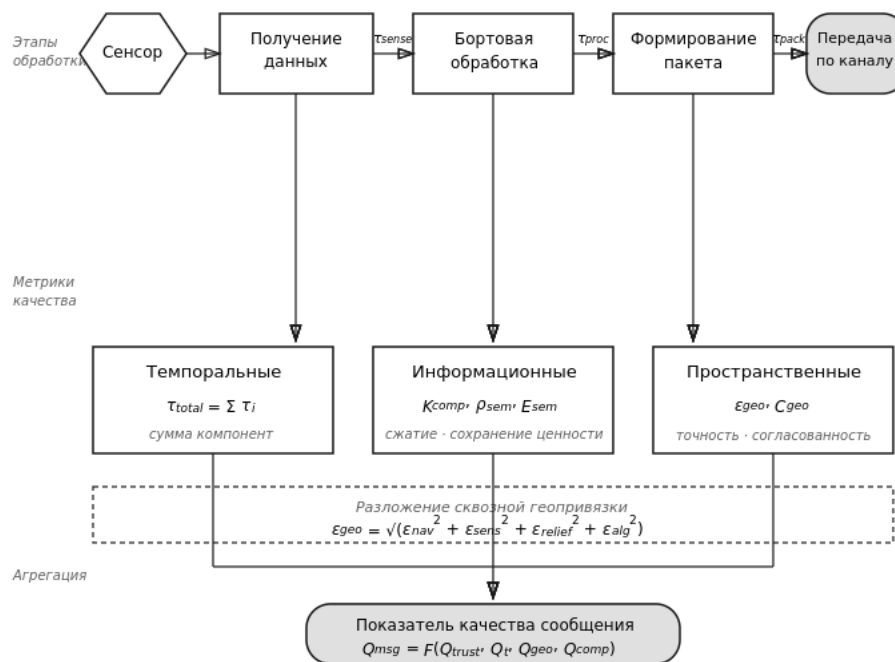


Рисунок 4.1-2 — Связь этапов бортовой обработки с метриками качества

Интегральный показатель качества отдельного сообщения. Введённые метрики характеризуют отдельные аспекты качества данных бортового контура: темпоральный ( $\tau_{total}$  с компонентами), информационный ( $E_{sem}$  с вкладками  $K_{comp}$  и  $\rho_{sem}$ ) и пространственный ( $\epsilon_{geo}$  с разложением на навигационную, сенсорную, рельефную и алгоритмическую составляющие). Для задач интеграции в наземном контуре требуется характеристика,

агрегирующая эти аспекты на уровне отдельного наблюдения — сообщения  $s$  от источника  $k$  об объекте  $j$ ; такой характеристикой служит показатель качества сообщения  $Q_{msg}$ , заданный в функциональной форме:

$$Q_{msg}(s, k, j) = F(P_{initial}, \varepsilon_{geo}, Q_t, \rho_{sem}), \quad (4.9)$$

где  $P_{initial} = K_{ист} \cdot K_{усл} \cdot P_{обн}$  — первичная оценка доверия с мультипликативной свёрткой коэффициентов априорной надёжности источника, условий наблюдения и оценки вероятности обнаружения;  $\varepsilon_{geo}$  — точность геопривязки;  $Q_t$  — нормированная своевременность сообщения;  $\rho_{sem}$  — сохранение информационной ценности. Операциональная форма построена как взвешенная сумма нормированных компонент:

$$Q_{msg} = w_1 \cdot Q_{trust} + w_2 \cdot Q_t + w_3 \cdot Q_{geo} + w_4 \cdot Q_{comp}, \quad (4.10)$$

где  $Q_{trust}$  — нормированная достоверность через  $P_{initial}$  с учётом категории условий наблюдения;  $Q_t$  — нормированная своевременность;  $Q_{geo}$  — нормированная точность геопривязки ( $Q_{geo} = 1 - \varepsilon_{geo}/\varepsilon_{geo, доп}$  при  $\varepsilon_{geo} \leq \varepsilon_{geo, доп}$ ;  $Q_{geo} = 0$  иначе);  $Q_{comp}$  — степень сохранения информационной полноты (на уровне сообщения совпадает с  $\rho_{sem}$ );  $w_i \in [0; 1]$  — веса при  $\sum w_i = 1$ , задаваемые по приоритету аспектов качества для класса задач (управление в реальном времени, аналитика, планирование).  $Q_{msg}$  не вводит новых первичных характеристик и агрегирует уже формализованные метрики геопривязки, сжатия и актуальности; на уровне сообщения он по содержанию эквивалентен расширенной форме первичной достоверности  $P_{initial}$  — при штатных условиях наблюдения и максимальном сохранении информационной ценности значения сходятся. Покомпонентное представление необходимо для построения адаптивных порогов категоризации при деградации отдельных составляющих и для последующей агрегации на уровне объекта (§4.1.3).

#### 4.1.3. Метрики качества наземного контура

Наземный контур интеграции геопространственных ресурсов (раздел 3.3) выполняет функции приёма, согласования и слияния данных от множества

источников с формированием интегрированной модели обстановки. Метрики качества наземного контура отражают результативность этих функций и характеризуют пригодность формируемых представлений для задач пространственно-временного анализа и прогнозирования.

Базовая метрика пространственного покрытия:

$$C_{\text{spatial}} = \frac{S_q}{S_{\text{ROI}}}, \quad (4.11)$$

где  $S_q$  — площадь территории, обеспеченной данными с интегральным показателем качества не ниже требуемого порога;  $S_{\text{ROI}}$  — общая площадь области интереса. Базовая метрика не учитывает неравномерности покрытия и приоритетов; для задач с различной детализацией в разных частях ROI применяется взвешенная метрика:

$$C_{\text{spatial}}^w = \frac{\int_{\text{ROI}} w(x) \cdot \mathbb{1}[Q(x) \geq Q_{\min}] dx}{\int_{\text{ROI}} w(x) dx}, \quad (4.12)$$

где  $w(x)$  — весовая функция, отражающая приоритетность точки  $x$ ;  $Q(x)$  — интегральный показатель качества данных в точке  $x$ ;  $Q_{\min}$  — требуемый минимальный уровень качества.

Метрика  $C_{\text{spatial}}^w$  операционализирует информационное покрытие  $\Gamma(x, y, t, \varphi)$ , введённое в §2.1.5 диссертации: весовая функция  $w(x)$  задаёт приоритетный контур  $\varphi$  информационных потребностей в точке  $(x, y)$ , а индикатор  $Q(x) \geq Q_{\min}$  — выполнение требования покрытия в моменте  $t$ . Эквивалентность  $\Gamma$  и  $C_{\text{spatial}}^w$  устанавливается переходом от непрерывного функционала покрытия к дискретной оценке на сетке точек области интереса.

Темпоральная свежесть характеризует соответствие данных текущему состоянию обстановки. Возраст данных в точке пространства:

$$\alpha(x, t) = t - t_{\text{last}}(x), \quad (4.13)$$

где  $t_{\text{last}}(x)$  — момент последнего наблюдения точки  $x$ . Темпоральная актуальность задаётся функцией экспоненциального затухания:

$$F_{\text{temporal}}(x, t) = \exp -\lambda \cdot \alpha(x, t), \quad (4.14)$$

где  $\lambda$  — параметр устаревания, зависящий от типа объекта и характерного времени изменения его состояния (Таблица 4.1-1).

Таблица 4.1-1 — Параметры устаревания для различных типов объектов

Тип объекта	Характерное время изменения	$\lambda$ , мин <sup>-1</sup>	Допустимый возраст (для $F_{\text{temporal}} > 0,9$ )
Динамические объекты (транспорт)	Секунды–минуты	0,01 – 0,1	1 – 10 мин
Оперативная инфраструктура	Часы	0,0003 – 0,002	1 – 6 часов
Стационарные объекты	Дни–недели	$1 \cdot 10^{-5} - 7 \cdot 10^{-5}$	1 – 7 суток
Рельеф, гидрография	Месяцы–годы	$\sim 10^{-6}$	Месяцы

Классификация Таблицы 4.1-1 укрупняет шесть классов из Таблицы 2.2-6 (§2.2.4) применительно к задачам оперативной оценки темпоральной актуальности. Класс «Динамические объекты (транспорт)» с  $\lambda \in [0,01; 0,1]$  мин<sup>-1</sup> объединяет подвижные наземные и медленно движущиеся объекты Таблицы 2.2-6 с  $T_{1/2}$  от единиц до десятков минут. Быстроподвижные воздушные объекты с  $T_{1/2}$  порядка десятков секунд требуют отдельной оперативной обработки и в обобщённую таблицу актуальности не включены. Классы «Оперативная инфраструктура» и «Стационарные объекты» соответствуют неподвижным природным и инфраструктурным объектам §2.2.4; класс «Рельеф, гидрография» — устойчивым природным образованиям с горизонтом изменений в месяцы и годы. Связь  $\lambda$  и  $T_{1/2}$  задана формулой (2.13):  $T_{1/2} = \ln 2 / \lambda$ ; диапазоны «Допустимый возраст» в Таблице 4.1-1 рассчитаны из условия  $F_{\text{temporal}}(\alpha) > 0,9$ .

Показатель качества по объекту. В наземном контуре, после интеграции наблюдений от множества бортовых источников, по каждому объекту модели обстановки складывается агрегированная оценка качества  $Q_{\text{obj}}$ . Этот

показатель относится к объекту целиком — со всеми наблюдениями и результатами согласования, накопленными к моменту оценки; в этом отличие  $Q_{obj}$  от  $Q_{msg}$ , который относится к отдельному сообщению. В операциональной форме показатель качества объекта  $j$  записывается как взвешенная сумма пяти компонент:

$$Q_{obj}(j) = w_1 \cdot Q_{trust}(j) + w_2 \cdot Q_t(j) + w_3 \cdot Q_{cons}(j) + w_4 \cdot Q_{comp}(j) + w_5 \cdot \left( \frac{\Delta H(j)}{H_0(j)} \right), \quad (4.15)$$

где  $Q_{trust}(j)$  — итоговая достоверность объекта после байесовского слияния наблюдений (§2.3.6);  $Q_t(j)$  — текущая темпоральная актуальность объекта через функцию убывания  $\alpha(xj, t)$ ;  $Q_{cons}(j)$  — согласованность наблюдений от разных источников по степени противоречивости альтернатив и величине расхождений между независимыми измерениями;  $Q_{comp}(j)$  — полнота описания объекта через операторскую шкалу полноты  $\gamma \in [0; 11]$ , введённую в §2.2.5;  $\frac{\Delta H(j)}{H_0(j)}$  — нормированная мера снятой неопределённости из энтропийно-вероятностной модели классификации ( $H_0(j)$  — априорная энтропия классификации,  $\Delta H(j) = H_0(j) - H_{апост}(j)$  — снятая неопределённость после обработки совокупности наблюдений);  $w_i$  — веса при условии  $\sum w_i = 1$ . Именно пятая компонента — нормированная энтропийная мера  $\frac{\Delta H(j)}{H_0(j)}$  — отличает  $Q_{obj}$  от  $Q_{msg}$  и от стандартных схем агрегации: к численной достоверности здесь добавлена интерпретируемая мера обоснованности классификации. Это необходимо в двух типичных ситуациях: при работе с противоречивыми данными от гетерогенных источников и в тех случаях, когда решение требуется объяснить оператору.

Показатель качества ситуационной осведомлённости по зоне. Для зоны интереса  $Z$ , охватывающей подмножество объектов  $\{j : j \in Z\}$ , качество осведомлённости получается агрегацией  $Q_{obj}$  по объектам зоны с поправками на пространственные и количественные характеристики самой зоны:

$$Q_{SA}(Z) = \langle Q_{obj}(j) \rangle_{j \in Z} \cdot \eta_{density}(Z) \cdot (1 - \eta_{critical}(Z)), \quad (4.16)$$

где  $\langle Q_{obj}(j) \rangle_{j \in Z}$  — среднее значение  $Q_{obj}$  по объектам зоны (с возможным взвешиванием по приоритетности);  $\eta_{density}(Z)$  — поправка на плотность покрывающих наблюдений;  $\eta_{critical}(Z)$  — доля объектов с  $Q_{obj}$  ниже допустимого порога  $Q_{доп}$ .  $Q_{SA}(Z)$  — вход для управляющих решений ситуационного центра. Когда значение  $Q_{SA}(Z)$  опускается ниже порогового, система реагирует одним из трёх способов: запускается доразведка, к зоне привлекаются дополнительные источники либо пересматривается состав распределённых средств наблюдения.  $Q_{SA}(Z)$  замыкает агрегационную вертикаль  $Q_{msg} \rightarrow Q_{obj} \rightarrow Q_{SA}(Z)$  на уровне поддержки принятия решений и обеспечивает прямую связь оценочного контура с адаптивным управлением источниками (§4.1.4). Каждый показатель агрегирует уже введённые частные характеристики и не вводит новых первичных метрик:  $Q_{msg}$  агрегирует метрики §4.1.2 на уровне отдельного сообщения;  $Q_{obj}$  агрегирует  $Q_{msg}$  всех наблюдений объекта вместе с энтропийной мерой согласованности;  $Q_{SA}(Z)$  агрегирует  $Q_{obj}$  по объектам зоны с учётом покрытия и критичности.

Системные метрики полноты, достоверности, своевременности. Параллельно вертикальной агрегации в главе 4 используется горизонтальная агрегация по трём сквозным свойствам информационного обеспечения, обоснованным в §4.1.1. Системные метрики  $C$ ,  $R$ ,  $T$  строятся как мультипликативные свёртки компонентных характеристик, относящихся к одному и тому же сквозному свойству на разных этапах обработки. Системная метрика полноты:

$$C = R_{det} \cdot R_{track} \cdot (1 - p_{comm}) \cdot R_{dedup}, \quad (4.17)$$

где  $R_{det}$  — доля корректных обнаружений в бортовом контуре;  $R_{track}$  — доля успешно отслеженных объектов;  $p_{comm}$  — вероятность потери сообщения в канале связи;  $R_{dedup}$  — доля корректных ассоциаций при

дедупликации в наземном контуре. Мультипликативная форма отражает последовательный характер информационной цепочки. Системная метрика достоверности:

$$R = P_{\text{det}} \cdot \text{Acc}_{\text{class}} \cdot (1 - \text{FPR}_{\text{dedup}}) \cdot \text{Acc}_{\text{trust}}, \quad (4.18)$$

где  $P_{\text{det}}$  — точность обнаружения;  $\text{Acc}_{\text{class}}$  — точность классификации;  $\text{FPR}_{\text{dedup}}$  — доля ложных ассоциаций при дедупликации;  $\text{Acc}_{\text{trust}}$  — точность оценки достоверности. Системная метрика своевременности:

$$T = \frac{N_{\text{total}} - N_{\text{late}}}{N_{\text{total}}}, \quad (4.19)$$

где  $N_{\text{total}}$  — общее число обработанных сообщений за интервал оценивания;  $N_{\text{late}}$  — число сообщений с задержкой выше целевого порога тдоп, задаваемого требованиями задачи. Целевые значения системных метрик для метода АИМТПО зафиксированы на уровне  $C \geq 0,85$ ,  $R \geq 0,83$ ,  $T \geq 0,90$ ; интегральный показатель эффективности  $E \geq 0,85$ . Обоснование значений и весов их свёртки методом анализа иерархий приведено в §4.4; экспериментальная верификация — в §4.5.

Двойственность представления. Показатели  $Q_{\text{msg}}$ ,  $Q_{\text{obj}}$ ,  $Q_{\text{SA}}(Z)$  образуют одну проекцию качества информационного обеспечения, системные метрики  $C$ ,  $R$ ,  $T$  — другую; вместе они задают двойственное описание. Первая проекция,  $Q_{\text{msg}} \rightarrow Q_{\text{obj}} \rightarrow Q_{\text{SA}}(Z)$  отслеживает, как качество накапливается вдоль информационной цепочки; она нужна в задачах управления составом наблюдений. Вторая,  $C$ ,  $R$ ,  $T$ , описывает качество по сквозным свойствам и работает на многофакторную оценку и сопоставление методов. Обе используются совместно: первая — во внутреннем контроле и в адаптивном контуре (§4.1.4); вторая — при построении интегрального показателя  $E$  (§4.4) и в экспериментальной верификации (§4.5). Метрики качества наземного контура и их связи показаны на рисунке 4.1-3.

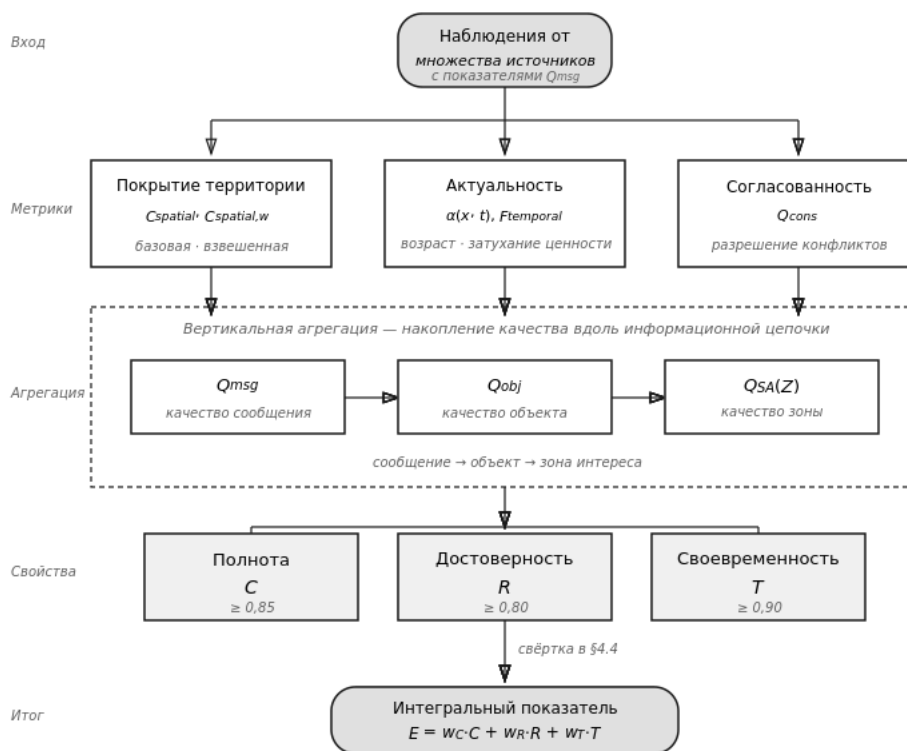


Рисунок 4.1-3 — Метрики качества наземного контура

#### 4.1.4. Влияние адаптивного управления источниками на качество данных

Контур адаптивной обратной связи, реализованный в архитектуре ситуационного центра (раздел 3.5), уточняет геоинформационные модели и адаптивно управляет источниками данных. Результаты анализа обстановки и верификации прогнозов превращаются в приоритеты наблюдений, и качество данных растёт там, где это значимо для текущей задачи: в выделенных районах и по конкретным объектам. Влияние адаптивного управления на качество данных оценивается косвенно: сравнивается динамика ранее введённых компонентных и системных метрик в двух режимах — при включённом и при отключённом адаптивном контуре.

Направленность управляющих воздействий проявляется как сдвиг распределения метрики  $C_{\text{spatial}}^w$  в пользу приоритетных районов: при включённом адаптивном контуре весовая функция  $w(x)$  перераспределяет ресурсы наблюдения в зоны с повышенной значимостью, и доля площади с

$Q(x) \geq Q_{\min}$  в этих зонах растёт быстрее, чем при равномерном наблюдении. Результативность управляющих воздействий проявляется как сокращение возраста данных  $\alpha(x, t)$  в приоритетных районах и рост темпоральной актуальности  $F_{\text{temporal}}$  в этих же районах; на уровне ситуационной осведомлённости — как повышение  $Q_{\text{SA}}(Z)$  для зон с критическими объектами. Количественное измерение этих эффектов опирается на сопоставление траекторий метрик в режиме АИМТПО и в режиме без замкнутого контура; формальная схема такого сопоставления — методика последовательного исключения компонентов §4.4.3, экспериментальное подтверждение — §4.5.

Сводная система метрик качества геопространственных данных приведена в таблице 4.1-2.

Таблица 4.1-2 — Сводная система метрик качества геопространственных данных

Контур	Аспект качества	Метрика	Тип
Бортовой	Оперативность	$\tau_{\text{total}}, \tau_{\text{proc}}, \tau_{\text{pack}}$	Темпоральный
Бортовой	Сжатие	$K_{\text{comp}}, \rho_{\text{sem}}, E_{\text{sem}}$	Информационный
Бортовой	Геопривязка	$\varepsilon_{\text{geo}}, C_{\text{geo}}$	Пространственный
Наземный	Покрытие	$C_{\text{spatial}}, C_{\text{spatial}}^w$	Пространственный
Наземный	Актуальность	$\alpha(x, t), F_{\text{temporal}}$	Темпоральный
Наземный	Согласованность	$Q_{\text{cons}}$	Интеграционный
Адаптивный	Направленность	сдвиг распределения $C_{\text{spatial}}^w$ по приоритетным районам	Управленческий
Адаптивный	Результативность	сокращение $\alpha(x, t)$ , рост $F_{\text{temporal}}$ и $Q_{\text{SA}}(Z)$ в приоритетных районах	Эффективный
Сводный	Качество сообщения	$Q_{\text{msg}}$	Агрегационный (уровень сообщения)

Контур	Аспект качества	Метрика	Тип
Сводный	Качество объекта	$Q_{obj}$	Агрегационный (уровень объекта)
Сводный	Качество зоны	$Q_{SA}(Z)$	Агрегационный (уровень зоны)
Сводный	Полнота информационного обеспечения	$C$	Системный
Сводный	Достоверность информационного обеспечения	$R$	Системный
Сводный	Своевременность информационного обеспечения	$T$	Системный

Метрики разных контуров образуют иерархическую структуру оценки качества, в которой показатели нижних уровней (бортовой контур) определяют достижимые значения показателей верхних уровней (наземный контур, адаптивное управление). Ограничения точности геопривязки на борту устанавливают предел точности пространственных представлений в интегрированной модели; задержки бортовой обработки сказываются на достижимой актуальности данных; полнота семантического сжатия определяет объём информации, доступной для интеграции в наземном контуре.

Системный подход к оценке качества рассматривает метрики во взаимосвязи, отражающей структуру распределённой геоинформационной системы и логику метода АИМТПО, а не их изолированную интерпретацию. Адаптивный контур замыкает систему оценки и реализует механизм направленного повышения качества в соответствии с потребностями пространственно-временного анализа и прогнозирования обстановки.

#### 4.2. Метрики качества прогнозирования

Параграф развивает положения §2.4 диссертации в количественную плоскость и формализует аппарат оценки прогностической функции метода АИМТПО. Метрики §4.2 организованы по четырём осям: точность прогноза

состояния, калибровка прогностической неопределённости, протяжённость допустимого горизонта, качество замкнутого контура верификации. Эти оси отвечают четырём содержательным аспектам прогностической задачи, введённым в Главе 2.

Метрики качества данных характеризуют систему обработки информации в целом через интегральные показатели полноты  $C$ , достоверности  $R$  и своевременности  $T$ . Метрики §4.2 относятся к одной функциональной подсистеме — прогностической, они служат входом для системных метрик. Точность классификации прогнозов входит слагаемым в  $R$ ; горизонт прогнозирования связан обратной зависимостью с  $T$ ; устойчивость контура верификации участвует в формировании  $\text{Acc}_{\text{trust}}$ .

#### 4.2.1. Метрики точности прогнозов

Прогноз состояния динамического объекта в методе АИМТПО формируется на основе модели [115, 122, 162] §2.4.2 и задаёт условную оценку вектора состояния  $\hat{x}(t+\Delta t|t)$ , формируемую в момент  $t$  на горизонт  $\Delta t$ . Точность прогноза оценивается по трём осям, отвечающим компонентам вектора состояния: положение, скорость, класс.

**(а) Позиционная точность.** Ошибка прогноза положения определяется как евклидово расстояние между прогнозным и фактическим положением:

$$e_{\text{pos}}(\Delta t) = \|\hat{x}(t + \Delta t|t) - x(t + \Delta t)\|, \quad (4.20)$$

где  $\hat{x}(t+\Delta t|t)$  — прогноз вектора положения, сформированный в момент  $t$ ;  $x(t+\Delta t)$  — фактическое положение в момент  $t+\Delta t$ ;  $\|\cdot\|$  — евклидова норма в пространстве координат геопространственной модели. Усреднённая по контрольной выборке среднеквадратическая ошибка:

$$\text{RMSE}_{\text{pos}}(\Delta t) = \sqrt{\langle e_{\text{pos}}^2(\Delta t) \rangle}, \quad (4.21)$$

где  $\langle \cdot \rangle$  обозначает усреднение по контрольному набору эпизодов прогнозирования.

**(б) Скоростная точность.** Аналогичная метрика для прогноза вектора скорости:

$$e_{\text{vel}}(\Delta t) = \|\hat{\mathbf{v}}(t + \Delta t|t) - \mathbf{v}(t + \Delta t)\|, \quad (4.22)$$

$$\text{RMSE}_{\text{vel}}(\Delta t) = \sqrt{\langle e_{\text{vel}}^2(\Delta t) \rangle}, \quad (4.23)$$

где  $\hat{\mathbf{v}}(t + \Delta t|t)$  — прогноз вектора скорости;  $\mathbf{v}(t + \Delta t)$  — фактический вектор скорости.

**(в) Классификационная точность.** Прогноз класса объекта — это распределение вероятностей  $\hat{P}(c|t + \Delta t)$  по множеству классов  $C$ . Качество такого распределения относительно фактического класса  $c^*$  оценивают через ожидаемую вероятность правильного класса:

$$\text{Acc}_{\text{class}}(\Delta t) = \langle \hat{P}(c^* | t + \Delta t) \rangle, \quad (4.24)$$

В альтернативной форме — точности top-1 — берётся доля случаев, в которых  $\text{argmax}_c \hat{P}(c | t + \Delta t) = c^*$ .

Чтобы прогнозы для разнородных классов объектов — стационарных, медленно движущихся, высокоманевренных в смысле §2.4.2 — можно было сравнивать между собой, позиционная ошибка предварительно приводится к безразмерной шкале. Соответствующая величина — относительная позиционная ошибка:

$$\text{RMSE}_{\text{pos}}^{\text{rel}}(\Delta t) = \frac{\text{RMSE}_{\text{pos}}(\Delta t)}{L_{\text{scale}}}, \quad (4.25)$$

где  $L_{\text{scale}}$  — характерный пространственный масштаб объекта или зоны интереса. Деление на  $L_{\text{scale}}$  устраняет масштабную зависимость, и метрики прогнозов для объектов разных классов оказываются на одной шкале.

Классификационная точность прогноза  $\text{Acc}_{\text{class}}$  — одно из слагаемых в формуле итоговой достоверности §4.1.3 (формула 4.18):

$$R = P_{\text{det}} \cdot \text{Acc}_{\text{class}} \cdot (1 - \text{FPR}_{\text{dedup}}) \cdot \text{Acc}_{\text{trust}}. \quad (4.26)$$

В §4.1.3  $Acc_{class}$  относится к точности классификации в текущий момент. В §4.2.1 та же функциональная форма применяется к прогнозу класса на горизонт  $\Delta t$ .

#### 4.2.2. Метрики неопределённости прогноза

Согласно §2.4.6, оценка неопределённости прогнозного состояния несамостоятельна по построению: в ней соединяются два вклада — неопределённость исходных данных, перенесённая на горизонт прогноза, и собственная неопределённость прогностической модели, поступающая через шум процесса. Для линейных гауссовских прогностических моделей §2.4 эта зависимость записывается формулой эволюции ковариации:

$$\hat{P}(t + \Delta t | t) = F \cdot P(t) \cdot F^T + Q \cdot \Delta t, \quad (4.27)$$

где  $F$  — матрица перехода прогностической модели;  $P(t)$  — ковариация состояния в момент  $t$ ;  $Q$  — матрица интенсивности шума процесса;  $\Delta t$  — горизонт прогноза. В правой части (4.27) первое слагаемое — это перенос исходной неопределённости через динамику модели, второе — её прирост из-за неполноты модели.

Метрика качества калибровки оценивает соответствие фактической ошибки прогноза заявленной ковариации  $\hat{P}$ . Базовой статистикой служит нормализованная инновация, введённая в §2.5.2 диссертации для диагностики расхождений «прогноз → факт»:

$$v_{\text{norm}}^2(t) = (\mathbf{z}(t) - \mathbf{H} \cdot \hat{\mathbf{x}}(t | t - \Delta t))^T \cdot \mathbf{S}^{-1} \cdot (\mathbf{z}(t) - \mathbf{H} \cdot \hat{\mathbf{x}}(t | t - \Delta t)), \quad (4.28)$$

где  $\mathbf{z}(t)$  — вектор наблюдения в момент  $t$ ;  $\mathbf{H}$  — матрица наблюдения;  $\hat{\mathbf{x}}(t | t - \Delta t)$  — прогноз состояния, сформированный в момент  $t - \Delta t$ ;  $\mathbf{S}$  — ковариация инновации, вычисляемая через  $\hat{P}$  и шум наблюдения по соотношениям §2.4.1.

При корректной калибровке прогностической модели статистика  $v_{\text{norm}}$  на контрольной выборке должна соответствовать распределению хи-квадрат с числом степеней свободы, равным размерности наблюдения  $m$ . Отклонение от ожидаемого распределения имеет диагностический смысл. Систематическое

занижение  $v_{\text{norm}}$  указывает на завышенную ковариацию прогноза, то есть на избыточную осторожность модели; систематическое завышение — на заниженную ковариацию и избыточную уверенность.

Сводная метрика согласованности прогностической неопределённости вводится как нормированное среднее:

$$\kappa_{\text{calib}} = \frac{\langle v_{\text{norm}}^2 \rangle}{m}, \quad (4.29)$$

Для корректно откалиброванной модели  $\kappa_{\text{calib}} \approx 1$ . Допустимый коридор:  $\kappa_{\text{calib}} \in [0,8; 1,2]$ . Выход за пределы коридора служит признаком необходимости адаптации параметров шума процесса  $Q$  через механизм §2.5.6 диссертации.

Метрики (4.21), (4.23) и (4.29) используют одно расхождение «прогноз — факт». Проекции на разные оси оценки различны: RMSE — на ось точечной ошибки,  $\kappa_{\text{calib}}$  — на ось согласованности заявленной неопределённости.

### 4.2.3. Метрики горизонта прогнозирования

Концепция допустимого горизонта прогнозирования из §2.4.7 диссертации формализуется через рост ошибки прогноза с увеличением  $\Delta t$ . Допустимый горизонт определяется как максимальное значение  $\Delta t$ , при котором ошибка прогноза остаётся ниже целевого порога:

$$\Delta t_{\text{max}} = \max \{ \Delta t : \text{RMSE}_{\text{pos}}(\Delta t) \leq \varepsilon_{\text{pos}} \wedge \text{RMSE}_{\text{vel}}(\Delta t) \leq \varepsilon_{\text{vel}} \}, \quad (4.30)$$

где  $\varepsilon_{\text{pos}}$  и  $\varepsilon_{\text{vel}}$  — пороговые значения позиционной и скоростной ошибок, определяемые требованиями прикладной задачи. Двойное условие отражает многомерность прогноза: горизонт ограничивается тем компонентом состояния, по которому пороговое требование нарушается раньше.

Для большинства классов прогностических моделей зависимость ошибки от горизонта аппроксимируется степенной функцией:

$$\text{RMSE}_{\text{pos}}(\Delta t) \approx \text{RMSE}_{\text{pos}}(0) + \alpha \cdot \Delta t^\beta, \quad (4.31)$$

где  $\alpha$  и  $\beta$  — параметры конкретной модели;  $\text{RMSE}_{\text{pos}}(0)$  — остаточная ошибка в момент формирования прогноза, обусловленная неопределённостью

текущей оценки состояния. Параметр  $\beta$  задаёт темп деградации точности. При  $\beta \approx 1$  рост ошибки линейный — типичная картина для прогноза по модели постоянной скорости. При  $\beta > 1$  рост суперлинейный; так ведут себя модели, в которых накапливается ошибка производных высокого порядка (например, при неопределённом ускорении).

Сравнение значений  $\beta$  для разных классов прогностических моделей помогает выбирать модель под конкретный класс объектов §2.4.2. На контрольной выборке для данного класса предпочтительна модель с меньшим  $\beta$ : она прогнозирует устойчивее на длительных горизонтах.

Горизонт прогнозирования и своевременность принятия решений  $T$  (§4.1.3) связаны обратно. Чем длиннее горизонт, тем больше времени остаётся на подготовку решения, но согласно (4.31) точность прогноза падает; короткий горизонт сохраняет точность ценой сокращения доступного времени реакции. Этот компромисс задаётся профилем сценария: пороги  $\varepsilon_{\text{pos}}$ ,  $\varepsilon_{\text{vel}}$  и целевая величина  $\Delta t_{\text{max}}$  выбираются под требования конкретной прикладной задачи.

#### 4.2.4. Метрики верификации замкнутого контура

Замкнутый контур §2.1.2 итеративно уточняет прогностические модели по результатам верификации, и это одно из отличий метода АИМТПО от существующих геоинформационных методов. В §4.2.4 контур описывается через количественные показатели его работы.

**(а) Метрика устойчивости адаптивного процесса.** Опирается на рекуррентную формулу накопления достоверности §2.5.7:

$$D_{i+1} = D_i + (1 - D_i) \cdot d_{i+1}, \quad (4.32)$$

где  $D_i$  — накопленное значение достоверности после  $i$  верификаций;  $d_{i+1}$  — индивидуальная достоверность  $(i+1)$ -го подтверждения,  $d_{i+1} \in [0; 1]$ . Метрика устойчивости — численное значение  $D_N$  после  $N$  верификаций. Из (4.32) следует, что  $D$  монотонно растёт при любом положительном  $d_{i+1}$  и не выходит из диапазона  $[D_1; 1]$ ; эти два свойства составляют формальную устойчивость метрики.

**(б) Скорость сходимости.** Численная характеристика эффективности накопления достоверности — минимальное число подтверждений, при котором достоверность достигает целевого уровня:

$$N_{\text{conv}}(D_1, D_{\text{target}}) = \min \{N : D_N \geq D_{\text{target}}\}, \quad (4.33)$$

Эмпирические данные модели §2.4.6: при начальном значении  $D_1 = 0,3$  и индивидуальных достоверностях подтверждений  $d_i \in [0,3; 0,5]$  достоверность достигает уровня  $D = 0,9$  за 4–7 подтверждений; при  $D_1 = 0,5$  — за 4–6 подтверждений. Чем меньше  $N_{\text{conv}}$ , тем информативнее отдельные подтверждения (выше  $d_i$ ) и эффективнее процесс верификации в целом

**(в) Метрика адаптивности контура.** Доля случаев своевременной коррекции прогностической модели при обнаружении систематического расхождения:

$$R_{\text{adapt}} = \frac{N_{\text{correct}}}{N_{\text{detected}}}, \quad (4.34)$$

где  $N_{\text{detected}}$  — число эпизодов, в которых статистика нормализованных инноваций §4.2.2 систематически выходила за коридор  $\kappa_{\text{calib}} \in [0,8; 1,2]$ ;  $N_{\text{correct}}$  — число эпизодов, в которых корректирующее действие (переключение уровня адаптации §2.5.3 диссертации) было выполнено в пределах целевого времени реакции. Целевое значение  $R_{\text{adapt}} \geq 0,90$ .

Метрика  $R_{\text{adapt}}$  связывает аппарат §4.2 с механизмом адаптации Главы 2. Статистика нормализованных инноваций играет роль диагностического сигнала, корректирующее действие — отклика. Значение  $R_{\text{adapt}}$  измеряет, насколько часто сигнал получает отклик в пределах целевого времени реакции. Система метрик качества прогнозирования метода АИМТПО систематизирована в таблице 4.2-1.

Таблица 4.2-1 — Система метрик качества прогнозирования метода АИМТПО

Группа	Метрика	Формула	Связь с §4.1 / §2
Точность	$RMSE_{\text{pos}}, RMSE_{\text{vel}}$	(4.21), (4.23)	§2.4.1–2.4.2

Группа	Метрика	Формула	Связь с §4.1 / §2
Точность	$Acc_{class}$	(4.24)	вход в $R$ (§4.1.3)
Точность	$RMSE_{pos\_rel}$	(4.25)	§2.4.2
Неопределённость	$v^2_{norm}$	(4.28)	§2.5.2
Неопределённость	$\kappa_{calib}$	(4.29)	§2.5.6
Горизонт	$\Delta t_{max}$	(4.30)	§2.4.7
Горизонт	$\beta$ (темп деградации)	(4.31)	§2.4.2
Контур верификации	$D_N$	(4.32)	§2.5.7
Контур верификации	$N_{conv}$	(4.33)	§2.4.6
Контур верификации	$R_{adapt}$	(4.34)	§2.5.3, §2.5.6

Четыре оси оценки прогностической функции — точность, неопределённость, горизонт, контур верификации — покрывают разные аспекты одной задачи. Точностные метрики характеризуют близость прогноза к фактическому состоянию; метрики неопределённости — согласованность заявленной точности с фактической; метрики горизонта — границу применимости прогноза; метрики контура верификации — способность модели реагировать на расхождения. Совместное использование этих метрик образует диагностический инструмент: расхождения по разным осям указывают на разные источники проблем — недостаточность данных, неполнота модели, превышение горизонта, отказ адаптации. На системном уровне результаты §4.2 входят в показатели §4.1 (через  $Acc_{class}$  в  $R$  и через горизонт в  $T$ ) и составляют основание для многофакторной оценки §4.4.

### **4.3. Оценка эффективности геоинформационных сервисов поддержки принятия решений**

#### **4.3.1. Критерии эффективности информационного обеспечения ситуационных центров**

Геоинформационные сервисы поддержки принятия решений [25, 26, 27, 29, 30] (раздел 3.4) замыкают цепочку преобразования геопространственных данных в информационные продукты, востребованные потребителями: накопленные данные и результаты анализа переводятся в форму, пригодную для принятия решений в ситуационном центре. Специфика ситуационных центров как потребителей определяется ограниченностью времени принятия решений, динамичностью и неопределённостью обстановки, пространственной распределённостью задач и разнородностью операторской подготовки.

Система критериев эффективности информационного обеспечения включает четыре базовых измерения. Оперативность отражает способность системы предоставлять информацию в сроки, обеспечивающие её полезность для принятия решений (ценность информации в динамической обстановке быстро убывает со временем). Полнота характеризует степень охвата информационными продуктами всех аспектов обстановки, релевантных для принятия решений, и имеет три измерения — пространственное, темпоральное и тематическое. Релевантность определяет соответствие предоставляемой информации актуальным потребностям задачи и конкретного потребителя; избыточная информация, не относящаяся к задаче, снижает эффективность работы оператора и маскирует критически важные сведения. Достоверность отражает степень соответствия представляемой информации действительному состоянию обстановки и связана с представлением неопределённости — потребитель должен понимать границы надёжности предоставляемых сведений. Система критериев эффективности информационного обеспечения изображена на рисунке 4.3-1.

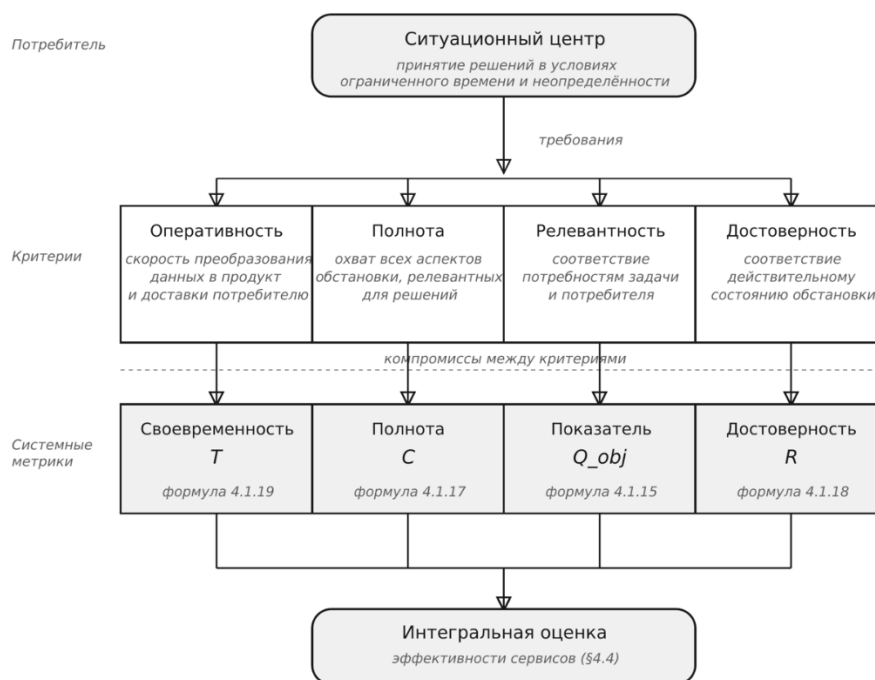


Рисунок 4.3-1 — Система критериев эффективности информационного обеспечения

Введённые критерии связаны с системой метрик §4.1 напрямую: они переводят её на язык требований потребителя. Своевременность  $T$  (формула 4.19) — это та же оперативность; полнота информационного обеспечения опирается на  $C$  (формула 4.17), а достоверность — на  $R$  (формула 4.18). Релевантность требует отдельного многоуровневого показателя  $Q_{obj}$ , который фиксирует пригодность данных в контексте решаемой задачи. Между критериями есть компромиссы. Оперативность повышается ценой полноты или достоверности; полнота наращивается ценой релевантности. Система оценки эффективности учитывает эти компромиссы и расставляет приоритеты под конкретную задачу

### 4.3.2. Метрики оперативности

Оперативность геоинформационных сервисов измеряется набором временных характеристик [18, 91]: насколько быстро данные превращаются в информационные продукты и доходят до потребителей. Метрики

оперативности привязаны к этапам информационного процесса в распределённой геоинформационной системе.

Время формирования оперативной картины характеризует период от поступления новых данных до их отражения в интегрированном представлении обстановки. Метрика складывается из времени приёма и нормализации данных, времени интеграции с существующей моделью обстановки и времени формирования визуального представления:

$$T_{\text{picture}} = t_{\text{receive}} + t_{\text{integrate}} + t_{\text{render}}, \quad (4.35)$$

где  $t_{\text{receive}}$  — время приёма и нормализации входных данных;  $t_{\text{integrate}}$  — время интеграции с действующей моделью обстановки;  $t_{\text{render}}$  — время формирования визуального представления.

Для систем реального времени требуется, чтобы  $T_{\text{picture}}$  не превышало характерного времени изменения обстановки. Иначе представляемая картина будет систематически отставать от действительности.

Задержка актуализации при изменениях отражает время реакции системы на значимые изменения обстановки. В отличие от времени формирования картины, которое характеризует регулярный процесс обновления, задержка актуализации измеряет скорость обработки событий — появления новых объектов, существенных изменений параметров, критических ситуаций. Для событий различной значимости устанавливаются различные требования к задержке:

Требования к задержке актуализации по категориям событий приведены в таблице 4.3-1.

Таблица 4.3-1 — Требования к задержке актуализации по категориям событий

Категория события	Характеристика	Допустимая задержка
Критическое	Непосредственная угроза, требующая немедленной реакции	Секунды

Категория события	Характеристика	Допустимая задержка
Срочное	Значимое изменение, влияющее на текущие решения	Десятки секунд
Оперативное	Стандартное обновление обстановки	Минуты
Фоновое	Изменения, не требующие немедленного внимания	Десятки минут

Время отклика на запросы характеризует продолжительность обработки интерактивных обращений оператора к системе. Запросы могут включать извлечение информации об объектах, выполнение пространственных запросов, формирование аналитических отчётов, построение прогнозов. Каждый тип запроса характеризуется собственным профилем трудоёмкости и соответствующими требованиями к времени отклика.

В интерактивной работе значимо субъективное восприятие отзывчивости системы. Исследования в области человеко-машинного взаимодействия устанавливают пороговые значения: задержка до 0,1 секунды воспринимается как мгновенная; до 1 секунды — как заметная, но без нарушения концентрации; до 10 секунд — как требующая индикации процесса; свыше 10 секунд — как прерывание рабочего процесса. Геоинформационные сервисы должны проектироваться с учётом этих порогов.

Метрика оперативной доступности сервисов характеризует долю времени, в течение которого сервисы способны обрабатывать запросы с нормативным временем отклика:

$$A_{\text{operational}} = \frac{T_{\text{available}}}{T_{\text{total}}}, \quad (4.36)$$

где  $T_{\text{available}}$  — время доступности сервисов с нормативными характеристиками;  $T_{\text{total}}$  — общее время оценки. Снижение доступности обусловлено техническими сбоями, перегрузкой при пиковых нагрузках или деградацией качества данных.

Производная метрика — устойчивость оперативности под нагрузкой — оценивает изменение времени отклика при увеличении интенсивности запросов. Линейная деградация свидетельствует о предсказуемом поведении системы; нелинейный рост задержек указывает на приближение к пределу производительности.

Связь с системной метрикой своевременности. Метрика  $A_{\text{operational}}$  и системная метрика  $T = \frac{N_{\text{total}} - N_{\text{late}}}{N_{\text{total}}}$  из §4.1.3 описывают одно сквозное свойство подсистемы с разных сторон:  $A_{\text{operational}}$  усредняет по времени,  $T$  — по сообщениям. Для полной оценки оперативности нужны обе характеристики. Экспериментальная верификация компонент времени реакции на имитационной среде (§4.5) подтверждает достижимость целевых значений. Измеренная сквозная задержка обработки события составила 265 мс при допустимом пороге для критических событий — единицы секунд.

### 4.3.3. Метрики полноты информационного обеспечения

На уровне подсистемы полнота формализована в §4.1.3 системной метрикой  $C$ . На уровне сервисов она раскрывается по трём измерениям — пространственному, темпоральному и тематическому. Метрики §4.3.3 задают сервисную развёртку системной полноты  $C$  по типам охвата.

Полнота информационного обеспечения характеризует степень, в которой предоставляемая информация охватывает все аспекты обстановки, необходимые для принятия обоснованных решений. Понятие полноты раскладывается на три составляющих: пространственную, темпоральную и тематическую.

Пространственная полнота оценивает охват территории интереса информационными продуктами. Базовая метрика — доля площади, обеспеченной актуальными данными с качеством не ниже требуемого (раздел 4.1.3). На уровне сервисов пространственная полнота выражается как способность отвечать на запросы относительно любой точки области интереса. Метрика пространственной полноты ответов:

$$P_{\text{spatial}} = \frac{N_{\text{answered}}}{N_{\text{queries}}}, \quad (4.37)$$

где  $N_{\text{answered}}$  — количество пространственных запросов, получивших содержательный ответ;  $N_{\text{queries}}$  — общее количество запросов. Запросы, на которые система отвечает «нет данных» или предоставляет данные с недопустимо низким качеством, не учитываются как успешные.

Дифференцированная оценка пространственной полноты учитывает приоритетность различных районов. Критически важные районы (зоны активных действий, ключевые объекты) должны обеспечиваться информацией с более высокой полнотой, чем периферийные территории. Взвешенная метрика пространственной полноты использует карту приоритетов аналогично метрикам покрытия (раздел 4.1.3).

Темпоральная полнота характеризует непрерывность информационного обеспечения во времени. Поддержка принятия решений опирается и на актуальную картину обстановки, и на её историю — на знание динамики изменений и закономерностей. Метрика темпоральной полноты:

$$P_{\text{temporal}} = \frac{\sum_{j=1}^M d_j \cdot \Delta t_j}{T_{\text{total}}}, \quad (4.38)$$

где  $M$  — количество временных интервалов в периоде оценки;  $d_j \in \{0, 1\}$  — наличие данных за интервал  $j$ ;  $\Delta t_j$  — длительность интервала;  $T_{\text{total}} = \sum_j \Delta t_j$ . Значения, близкие к единице, свидетельствуют о непрерывном информационном обеспечении.

Пробелы в темпоральной полноте (периоды отсутствия данных) различаются по критичности. Пробелы в периоды интенсивных изменений обстановки более значимы, чем пробелы в стабильные периоды. Взвешенная метрика темпоральной полноты учитывает динамику обстановки через коэффициенты значимости временных интервалов.

Тематическая полнота отражает охват информационными продуктами всех типов объектов и явлений, релевантных для решаемых задач. Номенклатура типов объектов определяется требованиями потребителей и

может включать транспортные средства различных классов, инфраструктурные объекты, природные явления, зоны с особыми характеристиками. Метрика тематической полноты:

$$P_{\text{thematic}} = \frac{|O_{\text{present}}|}{|O_{\text{required}}|}, \quad (4.39)$$

где  $O_{\text{present}}$  — множество типов объектов, представленных в информационных продуктах;  $O_{\text{required}}$  — множество типов, требуемых потребителями.

Более детальная оценка учитывает и факт представления типа объектов, и полноту охвата внутри типа. Для каждого типа вычисляется доля обнаруженных объектов от общего количества существующих (оцениваемого экспертно или через перекрёстную верификацию источников). Структура метрик полноты информационного обеспечения приведена на рисунке 4.3-2.



Рисунок 4.3-2 — Структура метрик полноты информационного обеспечения

Интегральная метрика полноты формируется как взвешенная комбинация составляющих:

$$P_{\text{total}} = w_s \cdot P_{\text{spatial}} + w_t \cdot P_{\text{temporal}} + w_{th} \cdot P_{\text{thematic}}, \quad (4.40)$$

где веса  $w_s$ ,  $w_t$ ,  $w_{th}$  ( $w_s + w_t + w_{th} = 1$ ) отражают относительную значимость измерений полноты для конкретного класса задач. Для задач мониторинга территории приоритетна пространственная полнота; для анализа динамики — темпоральная; для специализированных задач — тематическая.

#### 4.3.4. Метрики релевантности и достоверности

Релевантность информационного обеспечения определяет соответствие предоставляемой информации [78, 81, 95] потребностям конкретной задачи и конкретного потребителя. В отличие от полноты, которая оценивает охват, релевантность характеризует фокусировку — способность системы выделять значимое и отсеивать несущественное.

Метрика релевантности содержания оценивает долю предоставляемой информации, действительно используемой потребителем для принятия решений:

$$R_{\text{content}} = \frac{V_{\text{consumed}}}{V_{\text{provided}}}, \quad (4.41)$$

где  $V_{\text{consumed}}$  — объём информации, востребованной потребителем (просмотренной, запрошенной детально, использованной в решениях);  $V_{\text{provided}}$  — общий объём предоставленной информации. Низкие значения метрики указывают на информационный шум — избыточность предоставляемых сведений.

Оценка релевантности проводится объективными и субъективными методами. Объективные методы основываются на анализе поведения пользователей — фиксации просмотров, запросов, времени работы с различными информационными элементами. Субъективные методы предполагают экспертную оценку или анкетирование потребителей. Комбинация методов даёт наиболее полную картину.

Контекстная адаптивность характеризует способность системы модифицировать информационные продукты в соответствии с контекстом использования. Контекст включает тип решаемой задачи, роль пользователя, текущую фазу ситуации, историю предшествующих запросов. Адаптивная

система предоставляет разную информацию разным потребителям в разных ситуациях. Метрика контекстной адаптивности оценивается через сопоставление информационных продуктов с профилями контекстов и измерение степени их соответствия.

Приоритизация информационных элементов отражает способность системы ранжировать предоставляемую информацию по значимости. Существенные сведения должны выделяться и доводиться раньше остальных; второстепенные — предоставляться по запросу. Качество приоритизации оценивается через корреляцию между назначенными приоритетами и экспертными оценками значимости или через анализ последовательности обращений пользователей к информационным элементам.

Достоверность на сервисном уровне — операционная развёртка показателя качества по объекту  $Q_{obj}$ , формализованного в §4.1.3 как взвешенная сумма  $Q_{trust}$ ,  $Q_t$ ,  $Q_{cons}$ ,  $Q_{comp}$ ,  $(\Delta H/H_0)$ . Соответствие компонентов прямое. Точность данных из таблицы 4.3-2 отвечает  $Q_{trust}$ ; актуальность —  $Q_t$ ; непротиворечивость —  $Q_{cons}$ ; верифицированность — нормированной мере снятой неопределённости  $(\Delta H/H_0)$ . Метрика  $V_{info}$  уточняет компонент верифицированности через долю элементов, прошедших процедуры подтверждения.

Достоверность информационного обеспечения характеризует степень соответствия предоставляемой информации действительному состоянию обстановки. На уровне сервисов достоверность — интегральная характеристика, зависящая от качества исходных данных, корректности их обработки и адекватности представления.

Компоненты достоверности информационного обеспечения систематизированы в таблице 4.3-2.

Таблица 4.3-2 — Компоненты достоверности информационного обеспечения

Компонент	Источник	Метод оценки
Точность данных	Качество источников, геопривязки	Сопоставление с эталонами
Актуальность	Возраст данных относительно динамики обстановки	Метрики темпоральной свежести
Непротиворечивость	Согласованность данных от разных источников	Анализ конфликтов
Верифицированность	Прохождение проверок качества	Доля верифицированных элементов

Метрика верифицированности информации определяет долю информационных элементов, прошедших процедуры подтверждения:

$$V_{\text{info}} = \frac{N_{\text{verified}}}{N_{\text{total}}}, \quad (4.42)$$

где  $N_{\text{verified}}$  — количество верифицированных элементов (объектов, атрибутов, отношений);  $N_{\text{total}}$  — общее количество элементов в информационном продукте. Верификация осуществляется через подтверждение множественными источниками, сопоставление с эталонными данными, экспертную оценку.

Представление неопределённости — критический аспект достоверного информационного обеспечения. Потребитель должен понимать границы надёжности предоставляемых сведений для корректной интерпретации и учёта при принятии решений. Качество представления неопределённости оценивается через полноту (все элементы с неопределённостью маркированы), адекватность (оценки неопределённости соответствуют фактическим ошибкам) и понятность (представление доступно для восприятия пользователем).

Эффект кросс-верификации согласуется с формулой байесовского слияния (§2.3.6) и подтверждён экспериментально в §4.5.6.

#### 4.3.5. Оценка эффективности визуализации динамической обстановки

Визуализация динамической обстановки — отдельный класс геоинформационных сервисов [62, 66, 69]: она переводит пространственно-временные данные в наглядные представления для оператора. Качество визуализации напрямую сказывается на том, какую ментальную модель обстановки строит оператор и какие решения он на её основе принимает. Эффективность визуализации оценивается по пяти аспектам: читаемость, корректность передачи динамики, корректность передачи неопределённости, адаптивность и когнитивная нагрузка.

Читаемость отвечает за то, чтобы информация дошла до оператора без искажений и потерь. На неё влияют плотность отображаемых объектов, контрастность символов, масштабная адекватность и минимизация перекрытий. Метрика читаемости — доля корректно воспринятой информации:

$$L_{\text{viz}} = \frac{N_{\text{correct}}}{N_{\text{elements}}}, \quad (4.43)$$

где  $N_{\text{correct}}$  — количество элементов, воспринятых и интерпретированных пользователем правильно;  $N_{\text{elements}}$  — общее количество представленных элементов.

Корректность передачи динамики оценивает способность визуализации (Рисунок 4.3-3) отображать временную составляющую обстановки — изменения, тренды, события — с использованием специальных приёмов: анимации, временных срезов, индикаторов направления движения, отображения траекторий. Корректность передачи неопределённости — специфическое требование систем тактического прогнозирования: прогнозные состояния, данные с ограниченной достоверностью и объекты с неточной локализацией должны отображаться так, чтобы пользователь корректно воспринимал степень уверенности (приёмы размытия границ, изменения насыщенности, штриховки, прозрачности, отображения областей возможных положений). Корректность определяется соответствием субъективных оценок пользователей объективным характеристикам

неопределённости; систематическое расхождение указывает на неэффективность выбранных визуальных приёмов.

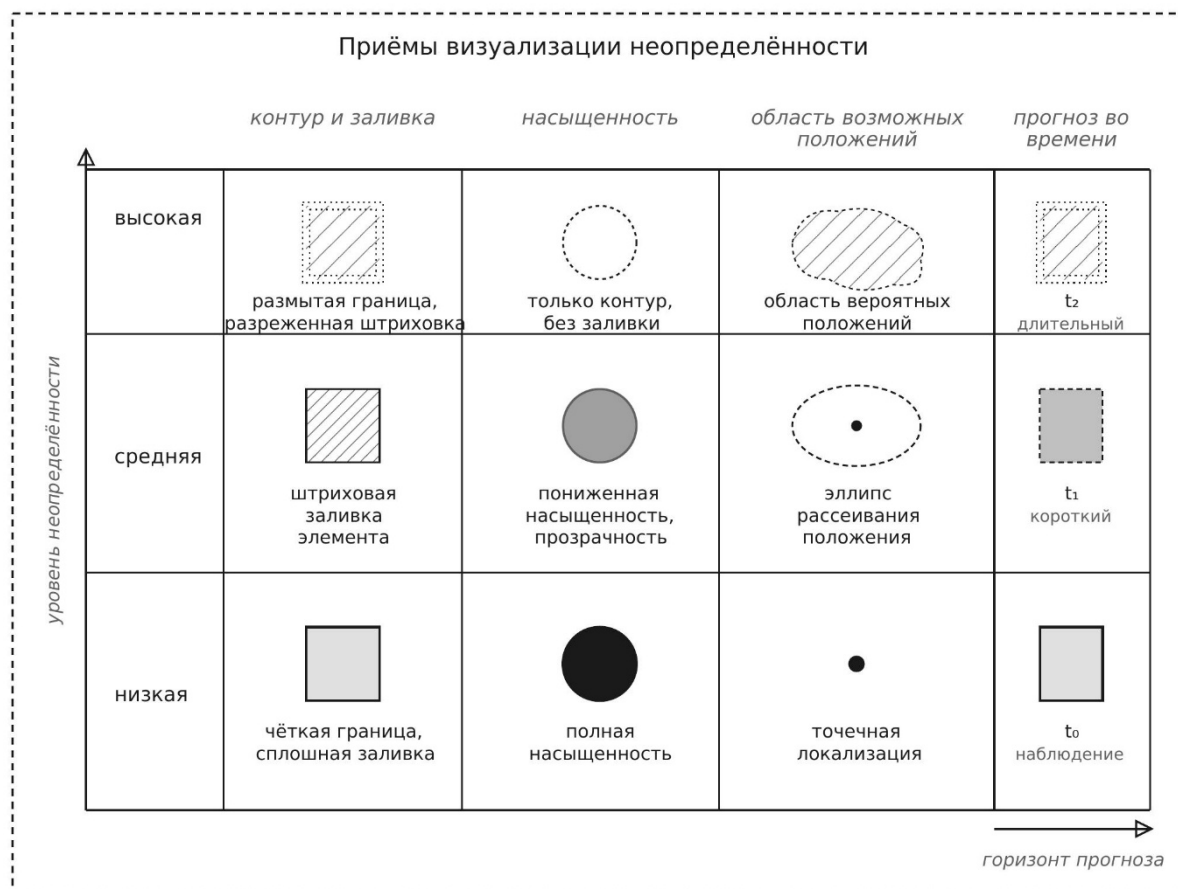


Рисунок 4.3-3 — Визуализация уровней неопределённости

Адаптивность характеризует способность представления подстраиваться под контекст использования — масштаб просмотра, тип устройства, характер задачи, индивидуальные предпочтения пользователя. Когнитивная нагрузка отражает ментальные усилия, требуемые для восприятия и интерпретации визуализации; её оценка проводится через измерение физиологических показателей, анализ времени выполнения задач и субъективные оценки. Проектная задача — минимизировать когнитивную нагрузку при заданном уровне информационной полноты. Состав метрик эффективности визуализации сведён в Таблицу 4.3-3.

Таблица 4.3-3 — Метрики эффективности визуализации динамической обстановки

Аспект	Метрика	Метод оценки
Читаемость	Доля корректно воспринятых элементов	Эксперимент с пользователями
Передача динамики	Точность прогноза положений пользователями	Задачи на экстраполяцию
Передача неопределённости	Соответствие оценок пользователей фактической неопределённости	Эксперимент на оценку достоверности
Когнитивная нагрузка	Время выполнения типовых задач	Хронометраж
Адаптивность	Сохранение читаемости при смене контекста	Тестирование сценариев

В имитационной среде (§4.5) показатели визуализации измерялись по трём характеристикам: частоте обновления интерфейса (30 кадров в секунду), сквозной задержке от получения данных до отображения (70–100 мс), времени восстановления цепочки происхождения данных по запросу оператора (0,4 с). Полученные значения подтверждают, что целевые уровни метрики  $L_{viz}$  и метрик когнитивной нагрузки в работе оператора достижимы.

#### 4.3.6. Интерфейсы с внешними геоинформационными системами

Архитектура взаимодействия с внешними системами описана в §3.4.3: межведомственный обмен идёт через ИССГР как через общую геоинформационную инфраструктуру. Для оценочного уровня вводятся метрики технической и семантической интероперабельности. Множество  $S_{required}$  поддерживаемых проектируемой системой стандартов определено консорциумом OGC: для векторных пространственных объектов — Web Feature Service (WFS); для картографических продуктов — Web Map Service (WMS) и Web Map Tile Service (WMTS); формат обмена данными — GeoJSON Feature Collection. На уровне реализации это означает, что система не

привязана к одному поставщику геоинформационного ПО и взаимодействует с любыми внешними системами, придерживающимися тех же стандартов.

Интероперабельность включает три уровня: техническую совместимость (поддержка стандартных протоколов и форматов), семантическую совместимость (согласованность интерпретации данных) и организационную совместимость (соответствие регламентам обмена). Метрика технической интероперабельности — доля поддерживаемых стандартных интерфейсов:

$$I_{\text{technical}} = \frac{|S_{\text{supported}}|}{|S_{\text{required}}|}, \quad (4.44)$$

где  $S_{\text{supported}}$  — множество поддерживаемых стандартов и протоколов;  $S_{\text{required}}$  — множество стандартов, требуемых для взаимодействия с релевантными внешними системами. Семантическая интероперабельность оценивается через полноту и корректность преобразования данных при обмене:

$$I_{\text{semantic}} = \frac{|A_{\text{preserved}}|}{|A_{\text{original}}|}, \quad (4.45)$$

где  $A_{\text{preserved}}$  — множество атрибутов и отношений, сохраняющихся при обмене;  $A_{\text{original}}$  — множество исходных атрибутов и отношений. При экспорте данных во внешние системы часть семантики может теряться из-за различий в моделях данных, при импорте данные требуют интерпретации и преобразования. Качество экспорта характеризуется полнотой (все релевантные данные экспортируются), своевременностью (без критичных задержек) и соответствием формату (экспортируемые данные корректно интерпретируются получателем).

Связь с инфраструктурой пространственных данных обеспечивает доступ к эталонным геопространственным ресурсам — базовым пространственным данным, цифровым моделям рельефа, административным границам, адресным реестрам, от которых зависят качество геопривязки и

возможности пространственного анализа. Взаимодействие с системами планирования и управления замыкает контур от информационного обеспечения к принятию решений: геоинформационные сервисы и предоставляют информацию, и воспринимают обратную связь — приоритеты наблюдений, запросы на детализацию, результаты верификации.

Эффективность интерфейсов с внешними геоинформационными системами не входит в системные метрики  $C$ ,  $R$ ,  $T$  напрямую, однако является необходимым условием их достижимости в распределённой межведомственной среде. Ограничения интероперабельности транслируются в практические потери полноты (часть данных недоступна для обмена), достоверности (искажения при семантическом преобразовании) и оперативности (задержки на конвертации и согласовании форматов). Метрики  $I_{technical}$  и  $I_{semantic}$  включаются в общую оценку эффективности как индикаторы граничных условий применимости системы.

#### **4.4. Многофакторная оценка эффективности метода АИМТПО**

##### **4.4.1. Методика многофакторной оценки**

Системы метрик, разработанные в предшествующих разделах, характеризуют отдельные аспекты функционирования геоинформационной системы тактического прогнозирования обстановки: качество геопространственных данных, точность прогнозирования, эффективность сервисов поддержки принятия решений. Многофакторная оценка эффективности метода АИМТПО требует синтеза частных показателей и сопоставления их с границами применимости подхода.

В основе многофакторной оценки — иерархическая структура критериев (рисунок 4.4-1.). Нижний уровень составляют метрики качества геопространственных данных; они задают исходный материал, без которого ни прогнозирование, ни поддержка решений не дают воспроизводимых результатов. Метрики прогнозирования располагаются на среднем уровне и характеризуют способность системы предвидеть эволюцию обстановки.

Верхний уровень — метрики эффективности сервисов, отражающие конечную ценность системы для потребителей.

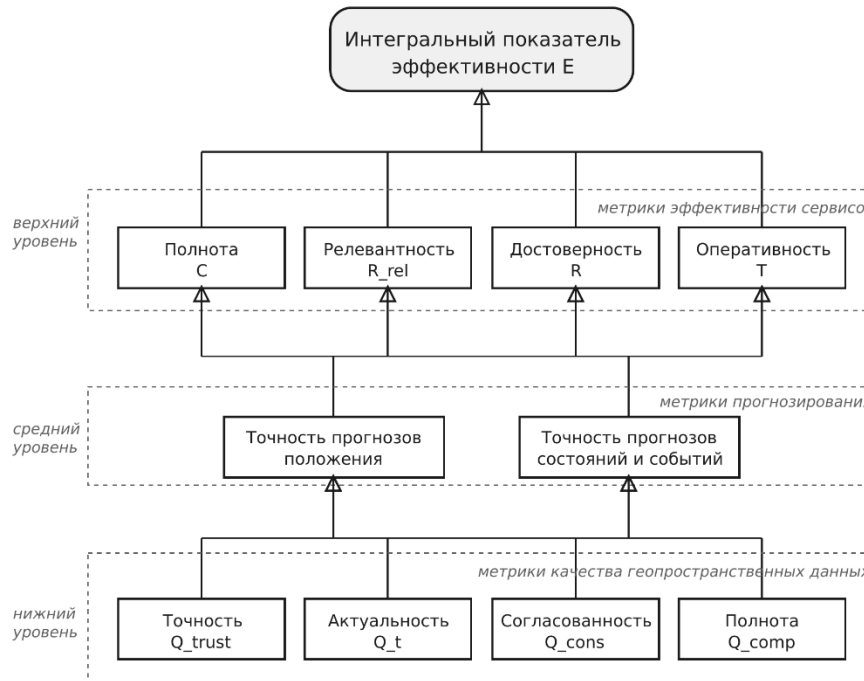


Рисунок 4.4-1 — Иерархическая структура многофакторной оценки

Свёртка частных метрик в интегральный показатель производится через взвешенное агрегирование. Для каждого уровня иерархии формируется агрегированный показатель, который затем используется в агрегировании следующего уровня. Общая схема свёртки:

$$E_{\text{level}} = \sum_{i=1}^n w_i \cdot q_i, \quad \sum_{i=1}^n w_i = 1, \quad (4.46)$$

где  $q_i$  — нормированное значение  $i$ -й метрики, приведённое к диапазону  $[0; 1]$ ;  $w_i$  — весовой коэффициент  $i$ -й метрики;  $n$  — количество метрик уровня. Нормирование обеспечивает сопоставимость метрик различной размерности; весовые коэффициенты задают относительную значимость метрик для целей оценки.

Обоснование весовых коэффициентов. Значения весов зависят от контекста применения. Для задач оперативного реагирования приоритетна своевременность; для задач планирования — полнота и достоверность; для задач мониторинга — пространственный охват. Методика предусматривает

несколько профилей весовых коэффициентов, соответствующих типовым классам задач (Таблица 4.4-1).

Базовый профиль соответствует сквозным свойствам геоинформационного обеспечения, формализованным в §4.1.3 в виде системных метрик: полноты  $C$ , достоверности  $R$ , своевременности  $T$ . Веса базового профиля получены сочетанием трёх независимых методов.

**Метод анализа иерархий (АНР).** Эксперты предметной области попарно сравнивают значимость свойств [118, 134, 190] для конкретного класса задач. Из матрицы попарных сравнений вычисляется собственный вектор; после нормировки он даёт весовые коэффициенты. Согласованность матрицы контролируется отношением консистентности  $CR < 0,1$ . Для базового профиля собственный вектор получается равным (0,333; 0,466; 0,201); после округления до операциональных значений —  $w_C = 0,35$ ;  $w_R = 0,45$ ;  $w_T = 0,20$ .

**Метод Swing Weighting.** Независимая проверка через прямое ранжирование улучшений. Эксперты оценивают прирост полезности при изменении каждой метрики на её полном размахе — между минимально приемлемым и максимально достижимым значениями. Полученные оценки нормируются и сравниваются с результатами АНР. Расхождения в пределах 2–3 процентных пунктов считаются согласованными.

**Анализ чувствительности по Соболю.** Численное исследование чувствительности интегрального показателя  $E$  к вариациям компонент  $C$ ,  $R$ ,  $T$ . Для базового профиля доли вклада каждой компоненты в дисперсию  $E$  (индексы Соболя) составили:  $S_R \approx 0,52$ ,  $S_C \approx 0,33$ ,  $S_T \approx 0,15$ . Эти доли согласуются с результатами АНР по доминированию  $R$  и по общему ранжированию  $R > C > T$ . По построению численные значения индексов Соболя и весов АНР не совпадают [101, 194]: АНР отражает экспертную оценку относительной значимости свойств, тогда как индексы Соболя дают фактический вклад в дисперсию интегрального показателя при варьировании компонент в допустимых диапазонах. Ранжирование, однако, сохраняется в обеих моделях, и именно это означает, что выбранные веса робастны.

Совокупность трёх независимых методов даёт устойчивые весовые коэффициенты для базового профиля. Базовый профиль для трёх системных метрик  $C$ ,  $R$ ,  $T$  развёртывается до пятикомпонентного профиля по типам задач путём дополнительного выделения релевантности и точности прогнозов из контекстных требований. Соответствие метрик: оперативность  $\leftrightarrow T$ ; полнота  $\leftrightarrow C$ ; достоверность  $\leftrightarrow R$ . Веса в Таблице 4.4-1 относятся к специализированным профилям и не совпадают численно с базовыми для ( $C$ ,  $R$ ,  $T$ ). Профили специализированных классов задач (Таблица 4.4-1) формируются аналогичной процедурой с учётом приоритетов соответствующих задач.

Таблица 4.4-1 — Профили весовых коэффициентов для различных классов задач

Метрика	Оперативное реагирование	Планирование	Мониторинг
Оперативность	0,35	0,15	0,20
Полнота	0,15	0,25	0,35
Релевантность	0,20	0,20	0,15
Достоверность	0,15	0,25	0,20
Точность прогнозов	0,15	0,15	0,10

Целевые значения системных метрик метода АИМТПО, согласованные с требованиями динамического геоинформационного обеспечения:  $C \geq 0,85$ ,  $R \geq 0,83$ ,  $T \geq 0,90$ . Целевое значение интегрального показателя для базового профиля:  $E = 0,35 \cdot C + 0,45 \cdot R + 0,20 \cdot T \geq 0,85$ . Аналитическое обоснование достижимости этих значений приведено в §4.4.2, сравнительное — в §4.4.3.

Альтернативный подход — принцип «слабого звена»: интегральная оценка определяется минимумом нормированных показателей и применяется в критичных приложениях, где недопустима деградация любого аспекта качества ниже порогового уровня.

$$E_{\min} = \min_i q_i, \quad (4.47)$$

Комбинированная методика сочетает оба подхода:

$$E_{\text{combined}} = \alpha \cdot E_{\text{weighted}} + (1 - \alpha) \cdot E_{\text{min}}, \quad (4.48)$$

где  $\alpha$  — параметр баланса между средним качеством и качеством худшего компонента. Для большинства практических применений  $\alpha = 0,7$ .

#### 4.4.2. Аналитическое обоснование

Аналитическое обоснование эффективности метода АИМТПО опирается на теоретический анализ [193, 169] свойств предложенных решений и их сопоставление с характеристиками традиционных подходов. Оно дополняет экспериментальную оценку и выявляет преимущества метода, инвариантные к условиям конкретного эксперимента.

Преимущество замкнутого контура анализируется через динамику ошибок в системах с обратной связью и без неё. В традиционных геоинформационных системах ошибки прогнозирования накапливаются — механизм их систематической коррекции отсутствует. Модели, откалиброванные на исторических данных, постепенно теряют адекватность при дрейфе характеристик обстановки. В методе АИМТПО верификация прогнозов и адаптивная корректировка реализуют отрицательную обратную связь. Ошибка стабилизируется на уровне неустранимой неопределённости обстановки.

Формально, для системы с адаптивной обратной связью ошибка прогнозирования стремится к стационарному значению:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \varepsilon(t) = \varepsilon_{\text{irr}}, \quad (4.49)$$

где  $\varepsilon_{\text{irr}}$  — неустранимая ошибка, обусловленная принципиальной непредсказуемостью части факторов. Для системы без обратной связи ошибка может неограниченно возрастать при дрейфе характеристик обстановки.

Эффект интеграции множественных источников обосновывается теорией оценивания. При наличии  $n$  независимых источников с дисперсиями ошибок  $\sigma_1^2, \dots, \sigma_n^2$  оптимальное взвешенное усреднение даёт дисперсию результата:

$$\sigma_{\text{int}}^2 = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \sigma_i^{-2}}, \quad (4.50)$$

Из выражения видно, что интегрированная оценка точнее любого отдельного источника, причём выигрыш растёт с увеличением числа источников. К оптимальной интеграции метод АИМТПО приближается за счёт адаптивного определения весов источников по их фактической точности.

Адаптивное управление источниками опирается на теорию информации [136, 137]. Информационная ценность наблюдения зависит от текущей неопределённости: наблюдение района с высокой неопределённостью потенциально более информативно, чем повторное наблюдение хорошо известного района. Адаптивное управление перенаправляет ресурсы наблюдения в районы максимальной неопределённости, чем максимизирует информационный выигрыш на единицу затраченных ресурсов.

Нагрузка на канал интеграции растёт нелинейно с увеличением числа источников при централизованной обработке сырых сенсорных потоков и линейно — при распределённой обработке с передачей структурированных результатов. Формальное выражение нагрузки и условия достижимости пропускной способности канала формализованы в §2.3.2 диссертации; экспериментальное сопоставление двух режимов на ограниченном составе платформ приведено в §4.5.3.

Оценка вычислительной сложности показывает реализуемость метода АИМТПО в условиях реального времени. Основные вычислительные операции цикла обработки — интеграция данных (линейная сложность по количеству источников), прогнозирование (типично линейная или логлинейная по количеству объектов), верификация и адаптация (линейная по количеству прогнозов). Общая сложность цикла:

$$O(T_{\text{cycle}}) = O(n_{\text{sources}} + n_{\text{objects}} \cdot \log n_{\text{objects}} + n_{\text{forecasts}}), \quad (4.51)$$

При типичных значениях параметров (десятки источников, тысячи объектов, сотни прогнозов) время цикла составляет единицы секунд на

современном вычислительном оборудовании, чего достаточно для функционирования в реальном времени.

Сходимость адаптации требует анализа устойчивости адаптивного контура. При выполнении условий ограниченности коэффициентов адаптации и достаточной информативности наблюдений адаптивный процесс сходится к окрестности оптимальных параметров модели. Формальные условия сходимости:

— коэффициент адаптации  $\gamma$  удовлетворяет условию  $0 < \gamma < \gamma_{\max}$ , где  $\gamma_{\max}$  определяется характеристиками модели;

— последовательность наблюдений обеспечивает персистентное возбуждение, при котором все параметры модели идентифицируются по данным наблюдений;

— неопределённость обстановки ограничена — существует конечная дисперсия возмущений.

При выполнении этих условий среднеквадратическая ошибка параметров модели сходится к ограниченному значению, заданному уровнем шума и интенсивностью изменений обстановки.

Доказательство сходимости адаптации формализовано в §2.5.7 диссертации через рекуррентное накопление достоверности  $D_{i+1} = D_i + (1 - D_i) \cdot d_{i+1}$  с монотонным ростом в диапазоне  $[D_1; 1]$ . Перечисленные выше условия — ограниченность коэффициента адаптации, персистентное возбуждение и ограниченность неопределённости обстановки — достаточны для того, чтобы рекуррентная формула была применима, а адаптивный контур метода АИМТПО устойчив.

#### **4.4.3. Сравнительный анализ с базовыми подходами**

Эффективность метода АИМТПО оценивается сравнением с базовыми подходами [191, 192] — традиционными методами геоинформационного обеспечения. Базовые подходы получаются последовательным исключением ключевых компонентов метода АИМТПО; этим сравнением измеряется вклад каждого компонента в общую эффективность (рисунок 4.4-2).

Базовый подход 1 (статическая модель) исключает адаптивный контур: модели прогнозирования работают на фиксированных параметрах, заданных на этапе настройки. Сопоставление с АИМТПО выявляет эффект адаптации.

Базовый подход 2 (разомкнутый контур) исключает верификацию прогнозов: прогнозы формируются, но не сопоставляются с фактическими наблюдениями. На этой паре виден вклад замыкания контура.

Базовый подход 3 (изолированные источники) исключает интеграцию: данные каждого источника обрабатываются независимо, без слияния. Сопоставление с АИМТПО выявляет эффект интеграции.

Базовый подход 4 (равномерное наблюдение) исключает адаптивное управление источниками: наблюдательные ресурсы распределяются равномерно, без учёта приоритетов. На этой паре виден вклад адаптивного управления.

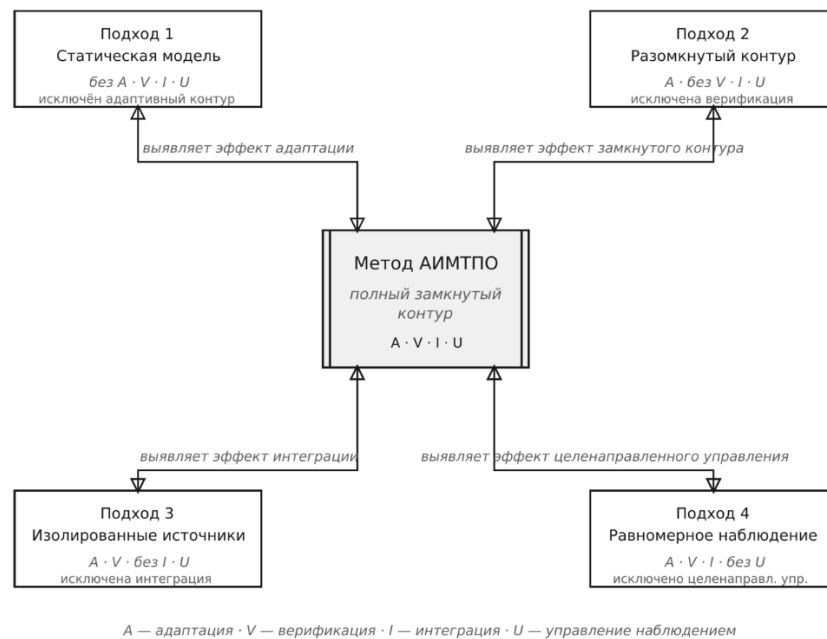


Рисунок 4.4-2 — Схема сравнительного анализа с базовыми подходами

Методика сравнительного анализа предусматривает оценку в идентичных условиях: на одних и тех же наборах данных, для одних и тех же сценариев обстановки, с использованием одних и тех же метрик. Этим достигается корректность сопоставления и нейтрализуется влияние

случайных факторов. Сравнительные характеристики метода АИМТПО и базовых подходов приведены в таблице 4.4-2.

Таблица 4.4-2 — Сравнительные характеристики метода АИМТПО и базовых подходов

Характеристика	АИМТПО	Подход 1	Подход 2	Подход 3	Подход 4
Адаптация моделей	Да	Нет	Да	Да	Да
Верификация прогнозов	Да	Да	Нет	Да	Да
Интеграция источников	Да	Да	Да	Нет	Да
Адаптивное управление	Да	Да	Да	Да	Нет
Замкнутый контур	Полный	Частичный	Разомкнут	Частичный	Частичный

Ожидаемые результаты сравнительного анализа выводятся из теоретических свойств метода. Они формулируются как проверяемые утверждения, по одному на каждый базовый подход.

Утверждение 1. Ошибка прогнозирования у АИМТПО меньше, чем у базового подхода 1; при нестационарной обстановке разрыв увеличивается.

Утверждение 2. Калибровка оценок неопределённости у АИМТПО лучше, чем у базового подхода 2: оценки достоверности корректируются по результатам верификации.

Утверждение 3. Пространственное покрытие и согласованность данных у АИМТПО выше, чем у базового подхода 3, благодаря комплементарности источников — различным ракурсам и зонам видимости.

Утверждение 4. Ресурсы наблюдения у АИМТПО используются эффективнее, чем у базового подхода 4: то же качество данных достигается меньшими ресурсами. Количественной мерой преимущества служит относительный показатель улучшения:

$$\Delta_{\text{metric}} = \frac{M_{\text{АИМТПО}} - M_{\text{базовый}}}{M_{\text{базовый}}} \cdot 100 \%, \quad (4.52)$$

где  $M_{\text{АИМТПО}}$  — значение метрики для метода АИМТПО,  $M_{\text{базовый}}$  — значение для соответствующего базового подхода. Для метрик, где большие значения лучше (полнота, точность), положительные  $\Delta$  указывают на преимущество АИМТПО. Для метрик, где меньшие значения лучше (ошибка, задержка), преимущество выражается отрицательным  $\Delta$ .

В §4.5 на имитационной среде выполнена экспериментальная верификация двух базовых подходов: распределённой обработки данных от множественных источников и централизованной обработки сырых потоков. Результаты согласуются с теоретическими предсказаниями: распределённая обработка снижает нагрузку на канал связи на порядок без потери точности обнаружения. На следующем этапе исследования предполагается провести полную экспериментальную верификацию всех четырёх утверждений на целевом сценарии воздушной мультидоменной группировки.

#### 4.4.4. Результаты оценки эффективности

Из результатов оценки по предложенной методике следует ряд выводов об эффективности метода АИМТПО в работе геоинформационной системы тактического прогнозирования обстановки [97, 98, 99].

Метрики качества данных (§4.1) фиксируют те преимущества метода АИМТПО, которые связаны с интеграцией множественных источников и адаптивным управлением наблюдениями. Пространственное покрытие растёт: источники координируются между собой, пробелы заполняются адресно. Актуальность данных повышается за счёт приоритизации наблюдений в районах с устаревающей информацией. Согласованность интегрированных данных поддерживается процедурами разрешения конфликтов с учётом динамически оцениваемой достоверности источников.

Экспериментальная верификация на имитационной среде подтвердила основные механизмы метода (таблица 4.4-3). При интеграции наблюдений от двух источников среднеквадратическая ошибка локализации сокращается с 1,8 м до 0,9 м. Это значение согласуется с информационной формой оптимальной интеграции  $P_{\text{int}}^{-1} = \sum_{i=1}^N P_i^{-1}$  (формула (2.21), §2.3.6) для случая

анизотропных ковариаций наблюдений двух платформ, разнесённых по ракурсу. Скалярная форма  $\sigma_{\text{int}}^2 = \frac{1}{\sum_{i=1}^N \sigma_i^{-2}}$  (§4.4.2) — частный случай для изотропных ковариаций. Точность ассоциации наблюдений составляет 97 % при перекрытии зон видимости двух источников.

Таблица 4.4-3 — Обобщённые результаты оценки по метрикам качества данных

Метрика	Характер эффекта	Основной механизм	Обоснование
Пространственное покрытие	Существенное увеличение	Координация источников и адаптивное управление	Аналитически — оптимальная интеграция (§4.4.2); экспериментально — рост доли покрытой площади при увеличении числа источников (§4.5)
Актуальность данных	Сокращение среднего возраста	Адаптивное управление приоритетами наблюдений	Аналитически — информационно-теоретическое обоснование (§4.4.2); связь с метрикой темпоральной актуальности (§4.1.3)
Согласованность данных	Существенное снижение конфликтов	Взвешенная интеграция с учётом достоверности источников	Аналитически — оптимальная интеграция в информационной форме (формула (2.21), §2.3.6) при анизотропных ковариациях ракурсно разнесённых источников; экспериментально — снижение СКО локализации с 1,8 м до 0,9 м при интеграции двух источников.

Метрика	Характер эффекта	Основной механизм	Обоснование
Прослеживаемость	Полная	Архитектурное решение	Положение 1 (§2.3.7); экспериментально — время восстановления цепочки происхождения 0,4 с (§4.5)

Метрики прогнозирования (§4.2) выявляют эффект адаптации: точность прогнозов улучшается по мере накопления статистики верификации и корректировки моделей. На начальном этапе функционирования, до накопления достаточной статистики, АИМТПО даёт характеристики, сопоставимые с базовыми подходами; с накоплением циклов обновления моделей разрыв растёт и выходит на устойчивый уровень. Динамика этого процесса измеряется метрикой устойчивости  $DN$  и скоростью сходимости  $N_{conv}$ ; согласованность заявленной и фактической неопределённости — метрикой  $K_{calib}$ ; реактивность контура на расхождения — метрикой  $R_{adapt}$ .

Деградация точности с увеличением горизонта прогнозирования сохраняется для всех подходов и характеризуется метрикой  $\Delta t_{max}$  и параметром темпа деградации  $\beta$  (§4.2.3). На коротких и средних горизонтах АИМТПО даёт более медленную деградацию: оценка текущего состояния точнее за счёт интеграции, модели динамики адекватнее за счёт адаптации. На длинных горизонтах преимущество нивелируется — накопление неопределённости определяется принципиальной непредсказуемостью обстановки и от метода не зависит.

Метрики эффективности сервисов (§4.3) производны от качества нижележащих уровней — данных и прогнозов. Оперативность определяется архитектурными решениями распределённой системы; при сопоставимой вычислительной инфраструктуре существенных различий между АИМТПО и базовыми подходами здесь не наблюдается. Полнота и достоверность

информационного обеспечения следуют тенденциям соответствующих метрик качества данных (рисунок 4.4-3).

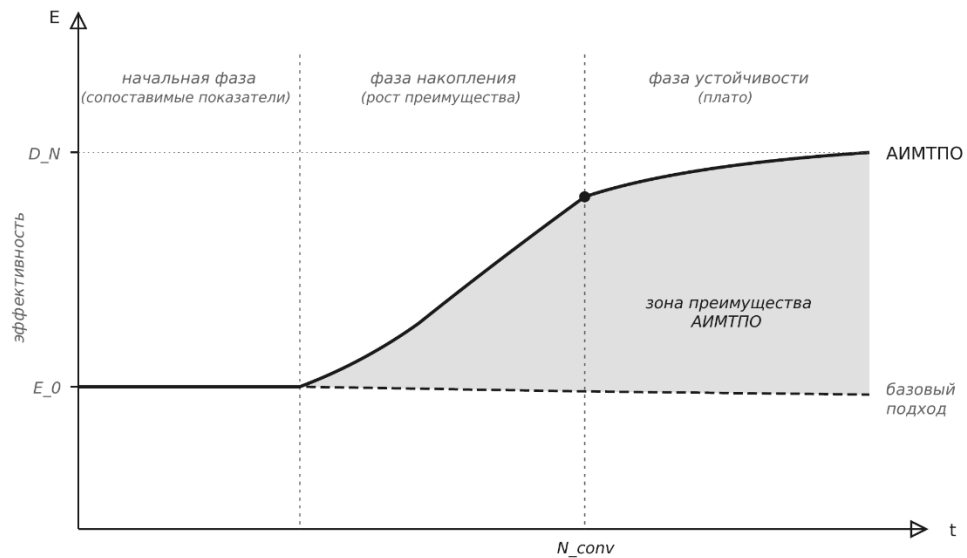


Рисунок 4.4-3 — Динамика эффективности метода АИМТПО во времени

Эффективность метода АИМТПО зависит от характеристик обстановки. При статической обстановке адаптация избыточна — статические модели достаточно адекватны. При хаотической обстановке без устойчивых закономерностей предел точности задаётся принципиальной непредсказуемостью, и адаптация существенного выигрыша не даёт. Оптимальный режим — умеренно динамичная обстановка с выраженными закономерностями: система успевает адаптироваться к изменениям, извлекая пользу из обнаруженных паттернов; именно в этом режиме реализуется максимальное преимущество метода.

#### 4.4.5. Границы применимости метода

Корректное позиционирование метода АИМТПО требует определения границ его применимости [56, 57]. Границы задаются двумя группами факторов: условиями максимальной эффективности и ограничениями, при которых преимущества метода снижаются.

Условия максимальной эффективности метода АИМТПО:

— наличие множественных разнородных источников геопространственных данных. Метод ориентирован на интеграцию данных от распределённых источников с различными характеристиками. При единственном источнике преимущества интеграции не реализуются, хотя адаптивный контур сохраняет ценность;

— динамичность обстановки с выраженными закономерностями. Обстановка должна изменяться достаточно быстро, чтобы статические модели теряли адекватность, но при этом обладать достаточной регулярностью для выявления и использования паттернов. Оптимальный диапазон — изменения на временах от минут до часов с воспроизводимыми моделями поведения объектов;

— достаточный объём верификационных данных. Адаптация требует накопления статистики расхождений между прогнозами и наблюдениями. При редких наблюдениях или коротких сценариях адаптация не успевает реализоваться в полной мере;

— возможность управления ресурсами наблюдения. Адаптивное управление источниками предполагает возможность перенацеливания или изменения режимов работы. При фиксированных траекториях и режимах работы источников этот компонент метода не реализуется.

Условия применимости метода АИМТПО систематизированы в таблице 4.4-4.

Таблица 4.4-4 — Условия применимости метода АИМТПО

<b>Условие</b>	<b>Оптимальный диапазон</b>	<b>Ограничение эффективности</b>
Количество источников	5–50	Менее 3 — ограниченная интеграция
Динамика обстановки	Изменения за минуты–часы	Статика — избыточность адаптации
Объём данных	Тысячи наблюдений в час	Менее 100 — недостаточно для адаптации

Условие	Оптимальный диапазон	Ограничение эффективности
Горизонт прогноза	1–60 минут	Более 2 часов — принципиальная неопределённость
Управляемость источников	Полная или частичная	Отсутствует — нет адаптивного управления

Ограничения метода АИМТПО определяются как внутренними характеристиками подхода, так и внешними условиями применения:

— вычислительные требования. Замкнутый контур обработки с интеграцией, прогнозированием, верификацией и адаптацией требует существенных вычислительных ресурсов. Для функционирования в реальном времени необходима инфраструктура, обеспечивающая обработку потоков данных без критичных задержек;

— период начальной адаптации. До накопления достаточной статистики верификации метод не демонстрирует преимуществ перед базовыми подходами. Длительность периода адаптации зависит от сложности обстановки и интенсивности наблюдений; типичные значения — от десятков минут до нескольких часов;

— требования к прослеживаемости. Архитектура метода предполагает сохранение метаданных происхождения для всех элементов данных. Это увеличивает объёмы хранения и требования к пропускной способности каналов связи;

— зависимость от качества исходных данных. При систематических ошибках источников (смещения геопривязки, ошибки классификации) адаптивный контур может усиливать эти ошибки вместо их компенсации. Необходимы начальная калибровка источников и мониторинг качества;

— чувствительность к нестационарности. Резкие изменения характеристик обстановки (смена типов объектов, изменение правил поведения) требуют переадаптации моделей. В переходный период точность прогнозирования временно снижается.

Метод АИМТПО применим к любым задачам пространственно-временного анализа динамических обстановок — от мониторинга транспортных потоков до наблюдения за природными процессами — при соблюдении условий наличия множественных источников, достаточной динамики и возможности верификации. В пределах перечисленных ограничений инвариантность метода относительно предметной области сохраняется, без существенной модификации в распределённых геоинформационных системах с разнородными источниками и потребителями данных.

#### **4.5. Экспериментальная верификация архитектурных решений на имитационной среде**

##### **4.5.1. Постановка экспериментального исследования и его границы**

Экспериментальное исследование направлено на верификацию архитектурных решений и работоспособности подсистем геоинформационного обеспечения, формирующих контур приёма и нормализации разнотипных потоков данных, синхронизации и геопривязки наблюдений, интеграции данных от множества источников, формирования и визуализации модели обстановки, межагентного обмена и обработки нештатных событий. Сценарий исследования — динамический мониторинг ограниченной территории с реагированием на контролируемые события — выбран как содержательная задача, операционально воспроизводящая замкнутый контур, формализованный в §2.1.2: наблюдение, интеграция, верификация, выработка действия.

В рамках эксперимента проверяется работоспособность бортового контура обработки в части приёма и нормализации данных от разнородных сенсоров мобильной платформы и формирования структурированных описаний наблюдений с метаданными качества (§3.2). На уровне наземного контура верификация охватывает интеграцию наблюдений от нескольких источников, формирование агрегированной модели обстановки и согласование данных от платформ с пересекающимися зонами наблюдения.

Для сервисного слоя контролируется корректность представления неопределённости в продуктах оперативной обработки и согласованность представлений у разных потребителей. В адаптивном контуре проверяется реакция на расхождения между прогнозом и фактом через сценарий кросс-источниковой верификации; вопрос корректировки коэффициентов слияния и обновления оценок надёжности отнесён к этапу полной верификации (§4.5.7).

Эксперимент не предназначен для оценки интегрального показателя эффективности  $E$  на целевом сценарии метода АИМТПО. Этому препятствуют четыре обстоятельства, требующие специальной оговорки. Состав платформ ограничен наземной робототехникой; характеристики наземных платформ принципиально отличаются от характеристик воздушных по скоростям движения, точности навигационной привязки, моделям накопления ошибок ориентации и профилям условий наблюдения. Предметная задача сводится к одному классу сценариев — мониторингу и реагированию, тогда как целевое применение метода предполагает множество сценариев в разных предметных областях. Группировка содержит три платформы при целевой архитектуре, рассчитанной на десятки источников. Среда эксперимента — имитационная: реальные условия эксплуатации содержат факторы, не воспроизводимые в полной мере на виртуальном полигоне (помехи навигационным каналам, нестабильность связи, метеорологические условия).

Указанное разграничение методологически принципиально. Компонентная верификация выполнена в настоящем эксперименте: подтверждена работоспособность отдельных подсистем и архитектурных решений на ограниченном сценарии. Системная верификация — подтверждение целевых значений интегрального показателя  $E$  на полном сценарии — отнесена к последующему этапу исследования.

#### **4.5.2. Имитационная среда и состав группировки**

Виртуальный полигон развёрнут в открытой среде имитационного моделирования робототехники [87, 155, 160, 161, 166, 185] и воспроизводит

трёхмерную модель участка городской застройки площадью около 0,25 км<sup>2</sup>. В составе полигона — статические объекты (здания, дороги, элементы инфраструктуры) и динамические объекты: подвижные фигуры людей и имитируемые контролируемые события различной интенсивности. Геометрия и состав выбраны так, чтобы воспроизвести характерные ограничения наблюдения в городской среде — экранирование обзора зданиями и перекрытие зон видимости платформ. Общий вид полигона приведён на рисунке 4.5-1.



Рисунок 4.5-1 — Имитационный полигон: трёхмерная модель участка городской застройки

В эксперименте задействованы три мобильные платформы с однотипным сенсорным оснащением. Состав сенсоров одной платформы включает двумерный лазерный сканер с дальностью 16 м и угловым разрешением 0,5°; видеокамеру оптического диапазона с частотой 30 Гц; приёмник глобальной навигационной спутниковой системы с частотой 5 Гц; одометрический модуль на основе колёсных датчиков с частотой 100 Гц; бортовую систему диагностики состояния платформы. Платформы обмениваются между собой через стандартные интерфейсы сенсорных данных

и сообщений о состоянии. Подсистемы геоинформационного обеспечения подключены к среде моделирования через программный мост, который транслирует потоки данных в форматы внутреннего представления. Условия наблюдения мобильной платформы в городской среде с подвижными объектами показаны на рисунке 4.5-2.



Рисунок 4.5-2 — Мобильная платформа в среде имитационного моделирования с подвижными объектами наблюдения

Количественные характеристики входных потоков данных, зафиксированные в эксперименте, приведены в таблице 4.5-1.

Таблица 4.5-1 — Характеристики входных потоков от одной мобильной платформы

Источник данных	Тип сообщения	Частота, Гц	Объём, байт
Двумерное лазерное сканирование	Скан окружающего пространства	10	~35 000
Одометрические данные	Позиция, ориентация, ковариации	100	~400
Навигационные данные	Координаты, оценка точности	5	~120

Источник данных	Тип сообщения	Частота, Гц	Объём, байт
Видеоданные оптического диапазона	Кадр изображения 640×480	30	~921 600
Состояние подсистем платформы	Агрегированный отчёт	1	~1 200
Обнаружения объектов	Идентификатор, класс, координаты	10	~800
Межагентный обмен	Состояние, обнаружения, статус	2	~3 500

Суммарный входящий трафик от одной платформы при передаче полных сенсорных потоков составил около 28 Мбит/с (преимущественно за счёт видеоданных). При включении в группировку трёх платформ с активацией обработки данных на стороне источника суммарный входящий трафик в подсистему интеграции снижался до примерно 8 Мбит/с в расчёте на платформу; в эту величину входят как структурированные обнаружения после бортовой обработки, так и сопутствующий межагентный обмен (состояния, координационные сообщения). Чистое сравнение нагрузки между централизованным и распределённым режимами обработки — без межагентного трафика — приведено в §4.5.3 и даёт снижение с 28,5 до 2,1 Мбит/с от одной платформы (более чем на порядок).

#### 4.5.3. Сравнение архитектурных вариантов организации обработки

В эксперименте (таблица 4.5-2) сопоставлены два принципиально различающихся подхода к организации обработки данных от распределённых мобильных источников [109, 132].

**Вариант 1 — централизованная обработка.** Каждый источник передаёт в подсистему интеграции полные сенсорные потоки без локальной обработки. Все вычислительно ёмкие операции — распознавание объектов, формирование локальной модели окружения, ассоциация наблюдений — выполняются на стороне принимающей подсистемы.

**Вариант 2 — распределённая обработка с предобработкой на источнике.** На каждой мобильной платформе работает подсистема предварительной обработки: из сенсорных потоков она выделяет объекты интереса с метаданными качества (координаты, класс, оценка достоверности). В подсистему интеграции передаются только структурированные результаты обработки и сжатые локальные представления окружения. Полные сенсорные потоки сохраняются на источнике и передаются по запросу оператора.

Таблица 4.5-2 — Сопоставление архитектурных вариантов организации обработки

Параметр	Централизованная обработка	Распределённая обработка
Трафик от одной платформы, Мбит/с	28,5	2,1
Нагрузка на принимающую подсистему, %	45	8
Задержка от наблюдения до доступности данных, мс	180–220	350–400
Точность распознавания контролируемого объекта	0,92	0,89
Устойчивость к деградации канала связи	низкая	высокая
Возможность ретроспективного анализа сырых данных	полная	ограниченная (полные данные сохраняются на источнике)

Сопоставление в рамках настоящего эксперимента подтверждает теоретическое преимущество распределённой архитектуры, обоснованное в Положении 3. Распределённая обработка снижает нагрузку на канал связи на порядок при сопоставимой точности распознавания. При этом возникает дополнительная задержка порядка 150 мс — следствие обработки на стороне источника. Эта задержка приемлема в задачах, где главное — устойчивость связи; при ограниченной пропускной способности именно устойчивость становится приоритетным свойством системы.

Эти данные согласуются с аналитическим выводом §4.4.2: при централизованной обработке нагрузка на канал интеграции растёт нелинейно

(формальное выражение нагрузки приведено в §2.3.2). Уже на трёх источниках различие между вариантами существенно. Для целевой группировки в десятки источников разрыв вырастет в разы. Распределённая схема пригодна для оперативного мониторинга при ограниченных каналах связи; централизованная остаётся как дополнение — для детального разбора отдельных эпизодов по запросу оператора.

#### **4.5.4. Результаты верификации подсистем**

В эксперименте [102, 103, 105, 133, 186] измерены характеристики подсистем геоинформационного обеспечения. Ниже они представлены по функциональным блокам.

**Подсистема приёма и нормализации данных.** Подсистема принимала данные от 89 источников одновременно — с учётом множественных каналов от каждой платформы. Средняя задержка нормализации входного сообщения зависела от типа данных: 1,8 мс для двумерного лазерного сканирования (объём около 35 000 байт), 0,9 мс для сжатого изображения оптического диапазона, 0,3 мс для одометрических данных. Пропускная способность подсистемы — до 6200 сообщений в секунду при пиковой нагрузке без потерь.

**Подсистема синхронизации и геопривязки.** Временные метки привязывались к универсальной шкале UTC с расхождением не более 1 мс. Привязка велась через сервер сетевой синхронизации, развёрнутый на хосте моделирования. Алгоритм пересчёта координат из локальных систем отдельных платформ в единую глобальную систему отработал корректно: треки наблюдаемых объектов оставались непрерывными при переходе между зонами ответственности платформ.

**Подсистема интеграции данных.** Зафиксировано одновременное сопровождение до 15 динамических объектов и 3 статических контролируемых событий. Среднее время ассоциации нового наблюдения с существующим объектом модели обстановки — 8 мс. Доля корректных ассоциаций при перекрытии зон видимости двух платформ — 97%.

Подсистема визуализации. Частота обновления экрана — 30 кадров в секунду. Задержка от поступления данных в подсистему до отображения в интерфейсе оператора — 70–100 мс. Интерфейс одновременно отображает трёхмерную модель полигона, положения всех платформ с цветовой индикацией состояния, прореженное облако точек лазерного сканирования, рамки границ обнаруженных объектов и маршруты движения. Совместная работа подсистем визуализации модели обстановки и формирования карты занятости пространства показана на рисунке 4.5-3.

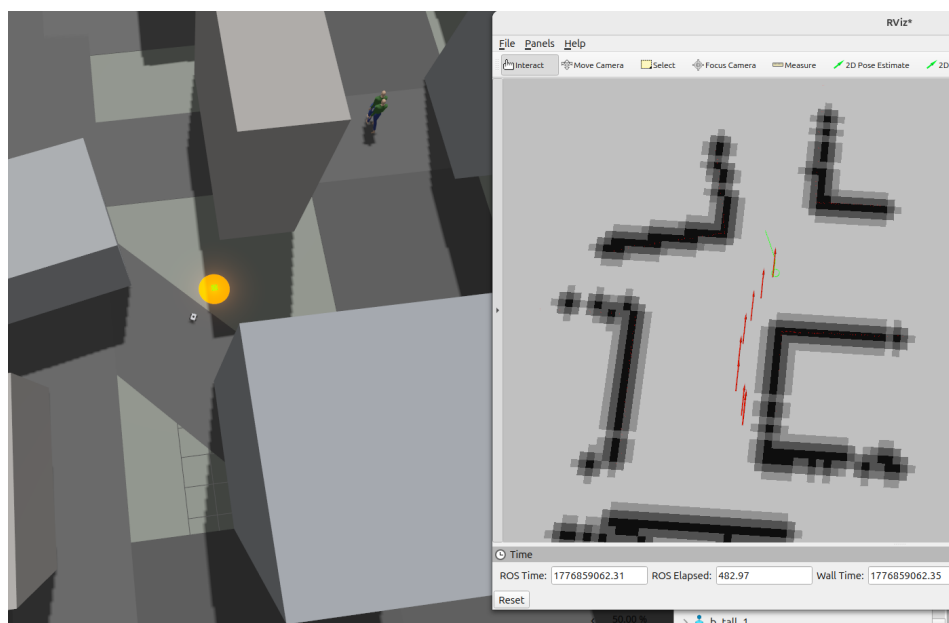


Рисунок 4.5-3 — Совместная работа подсистем визуализации и навигации в интерфейсе оператора

Подсистема журналирования и трассировки. Все события миссии сохранены в полном объёме. Время восстановления цепочки происхождения данных «источник → наблюдение → интегрированное представление → решение» по запросу оператора — 0,4 секунды.

Приведённые показатели соответствуют формальным метрикам, введённым в §4.1 и §4.3. В системную метрику своевременности  $T$  попадают задержка нормализации, пропускная способность подсистемы приёма и частота обновления интерфейса. Доля корректных ассоциаций входит в системную метрику достоверности  $R$  как множитель  $(1 - FPRdedup)$  согласно формуле 4.18. Времени восстановления цепочки происхождения данных

отвечает метрика сквозной прослеживаемости, введённая в Положении 1 и архитектурно развёрнутая в Главе 3.

#### **4.5.5. Сценарий обнаружения и подтверждения объекта как пример прохождения данных через метод АИМТПО**

Сценарий межагентной кросс-верификации [38, 53] обнаружения операционально воспроизводит замкнутый контур метода АИМТПО на содержательном примере. Прохождение данных через ключевые подсистемы зафиксировано с указанием задержек на каждом этапе.

*Первичное обнаружение на одной платформе.* Подсистема технического зрения первой платформы фиксирует объект класса «контролируемое событие» на расстоянии 6,2 м с показателем достоверности 0,87. Координаты объекта в локальной системе координат платформы пересчитываются в глобальную систему координат WGS-84 по одометрическим и навигационным данным. Сформированное наблюдение публикуется в общую шину данных с временной меткой и метаданными качества. Задержка от регистрации сенсорными данными до публикации наблюдения на стороне источника — 85 мс. Условия первичного обнаружения показаны на рисунке 4.5-4.



Рисунок 4.5-4 — Первичное обнаружение контролируемого события на одной мобильной платформе

*Передача в подсистему интеграции.* Сообщение о наблюдении транслируется в подсистему наземного контура через программный мост, нормализуется в формат внутреннего представления, маршрутизируется в модуль ассоциации. Задержка передачи и нормализации — 35 мс.

*Межагентное взаимодействие.* Параллельно с передачей в наземную подсистему первая платформа транслирует информацию о новом обнаружении в межагентный канал связи. Соседняя платформа, находящаяся в 15 м от первой, получает сообщение и корректирует локальный маршрут для подхода к зоне с целью кросс-верификации.

Кросс-верификация на второй платформе. Подсистема технического зрения второй платформы независимо обнаруживает объект со своего ракурса. Это наблюдение публикуется в шину данных и поступает в подсистему ассоциации.

Интеграция наблюдений от двух источников. Подсистема интеграции выявляет совпадение координат с учётом ковариационных матриц обоих наблюдений и связывает их с одним объектом модели обстановки. Через байесовское слияние независимых наблюдений (§2.3.6) показатель достоверности повышается с 0,87 до 0,94. Так на уровне подсистем реализуется принцип кросс-источниковой верификации, формализованный в §2.5.

Выработка решения. Подсистема ситуационного анализа фиксирует подтверждённую достоверность объекта и формирует рекомендацию о реагировании. Подсистема выдачи решений формирует команду третьей платформе на перемещение к зоне. Задержка обработки в наземном контуре от поступления первого наблюдения до формирования рекомендации составила 95 мс.

Доставка решения. Команда передаётся через интерфейсы внешнего управления соответствующей платформе. Задержка доставки и подтверждения — 50 мс.

Совокупная задержка от регистрации сенсорными данными первой платформы до начала движения третьей платформы — около 265 мс. Это значительно меньше допустимого времени реакции для критических событий, измеряемого единицами секунд. Сценарий воспроизводит замкнутый контур метода АИМТПО (§2.1.2). Первичное наблюдение поступает с первой платформы. Наземная подсистема интегрирует наблюдения. Верификация выполняется при подтверждении от второго источника. Адаптивный отклик реализуется перенаправлением третьей платформы. Цепочка происхождения данных — от источника до решения — восстанавливается за ~0,4 с; такое время восстановления делает прослеживаемость работоспособной в реальном времени.

#### **4.5.6. Точность локализации и пространственное покрытие**

Условия эксперимента: имитационный полигон 500×500 м [44, 46, 52] с городской застройкой, на которой размещены 20 зданий, 8 подвижных фигур людей и 3 контролируемых события различной интенсивности. Три мобильных платформы согласованно сканировали территорию.

Пространственное покрытие. За один цикл сканирования продолжительностью 12 минут группировка обследовала около 85 % площади полигона. Главное ограничение — экранирование обзора зданиями. Это значение соответствует расчётному уровню покрытия для трёх платформ при данной геометрии полигона.

Точность локализации контролируемых объектов. Среднеквадратическая ошибка определения координат объектов в глобальной системе координат составила: 1,8 м по данным одной платформы (лазерный сканер, одометрия, навигация) и 0,9 м при интеграции наблюдений двух платформ с пересекающимися ракурсами.

Полученный результат подтверждает эффект интеграции, формализованный аналитически в §4.4.2. Снижение СКО в 2 раза при добавлении второго источника превышает теоретическое значение для оптимальной интеграции независимых наблюдений  $\sigma_{\text{int}}^2 = 1 / \sum_i \sigma_i^{-2}$ : для двух источников с равными дисперсиями  $\sigma_1 = \sigma_2$  итоговая дисперсия  $\sigma_{\text{int}}^2 = \frac{\sigma^2}{2}$ , то есть СКО снижается в  $\sqrt{2} \approx 1,41$  раза. Эмпирически зафиксированный коэффициент снижения 2,0 объясняется анизотропией ковариационных матриц наблюдений при ракурсном разнесении источников. Скалярная форма  $\sigma_{\text{int}}^2 = 1 / \sum_i \sigma_i^{-2}$  применима лишь к изотропным ковариациям одинаковой ориентации; в общем случае справедлива её матричная форма — информационный фильтр (2.21):  $P_{\text{int}}^{-1} = \sum_i P_i^{-1}$ . При наблюдении объекта с разных ракурсов главные оси эллипсов ошибок  $P_1, P_2$  ориентированы различно: каждая платформа имеет наибольшую неопределённость вдоль линии визирования и наименьшую — поперёк неё. Слияние таких анизотропных матриц компенсирует слабые направления одного источника сильными направлениями другого, что даёт более существенное снижение СКО локализации в инерциальной системе координат, чем  $\sqrt{2}$  для скалярных дисперсий. Двукратное снижение СКО (с 1,8 до 0,9 м) согласовано с формулой (2.21) при подстановке анизотропных  $P_1, P_2$  с маргинальной СКО 1,8 м по линии визирования и существенно меньшей СКО поперёк неё.

*Точность распознавания и эффект кросс-верификации.* На тестовой выборке полигона зафиксированы следующие показатели: для контролируемых событий — точность распознавания 0,91, полнота 0,88; для динамических объектов — точность 0,96, полнота 0,94 с поправкой на частичное экранирование зданиями. После кросс-верификации в подсистеме интеграции достоверность объектов, подтверждённых независимыми наблюдениями двух платформ, возросла в среднем с 0,87 до 0,95. Полученное значение согласуется с формулой байесовского слияния независимых источников (§2.3.6).

*Скорость консолидации модели.* Каждая платформа поддерживает локальную карту занятости пространства размером 200×200 м с разрешением 5 см. Полная консолидация локальных карт в единую глобальную карту полигона по завершении миссии — 3,2 секунды. Полученное время позволяет использовать консолидированную карту для оперативного планирования последующих действий. Локальная карта занятости пространства, формируемая на каждой платформе и доступная оператору в реальном времени, показана на рисунке 4.5-5.

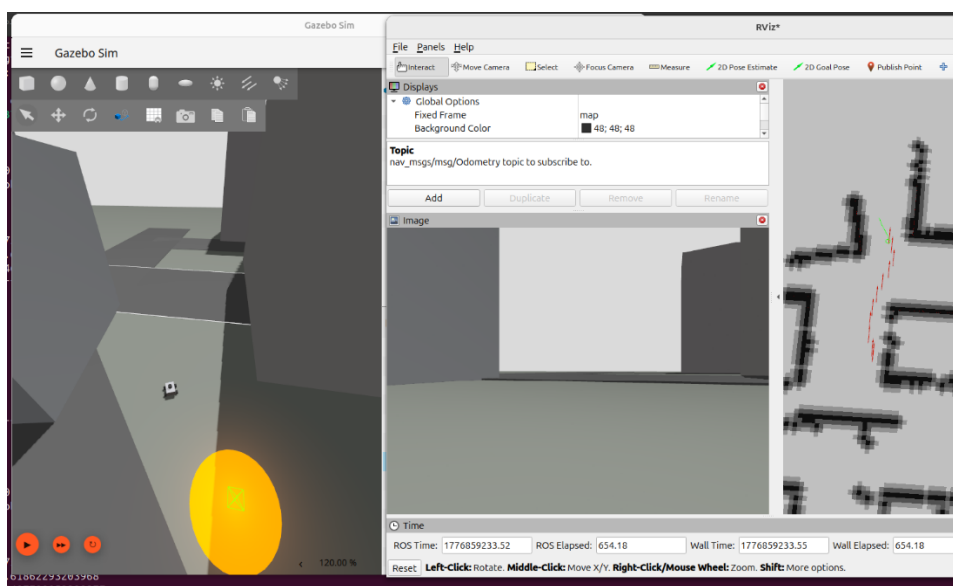


Рисунок 4.5-5 — Локальная карта занятости пространства, формируемая в реальном времени

#### 4.5.7. Границы обобщения и переход к полевой верификации

В пределах ограниченного сценария экспериментально подтверждены [50, 51, 54]: работоспособность всех подсистем геоинформационного обеспечения, включая приём и нормализацию, синхронизацию и геопривязку, интеграцию, визуализацию, журналирование и межагентный обмен; преимущество распределённой архитектуры обработки относительно централизованной по совокупности параметров нагрузки и задержек; эффект интеграции наблюдений от множественных источников, выраженный в двукратном снижении СКО локализации; работоспособность кросс-источниковой верификации обнаружений с повышением достоверности с 0,87

до 0,94–0,95; сквозная работоспособность замкнутого контура «наблюдение → интеграция → верификация → решение» с задержкой 265 мс на содержательном сценарии; полная прослеживаемость данных с временем восстановления цепочки происхождения 0,4 секунды.

Полученные результаты не могут быть прямо обобщены на целевое применение метода АИМТПО без дополнительных исследований. Характеристики бортовой навигации воздушных платформ принципиально отличаются от характеристик наземной робототехники: модели накопления ошибок ориентации, влияние угловых скоростей и линейных ускорений на точность инерциальной навигации требуют отдельной верификации. Имитационная среда не воспроизводит в полной мере характеристики каналов связи в реальной эксплуатации, включая помехи, нестабильность и многошаговую ретрансляцию. При переходе от трёх источников к десяткам платформ изменяются вычислительная нагрузка и топология межагентного обмена, что также требует отдельного исследования. Численный состав группировки в эксперименте — три платформы — находится ниже оптимального диапазона 5–50, зафиксированного в Таблице 4.4-4 как условие реализации полных преимуществ метода; это согласовано с методологическим разграничением между компонентной верификацией (выполняется при ограниченном составе и подтверждает работоспособность отдельных подсистем) и системной верификацией интегрального показателя  $E$  (требует целевого диапазона). Класс предметных задач шире сценария мониторинга и реагирования: он включает целеуказание, картографирование, контроль воздушного пространства; верификация для каждого такого класса должна проводиться самостоятельно.

Полная верификация интегрального показателя  $E$  на целевом сценарии метода АИМТПО относится к последующим этапам исследования. План полной верификации предусматривает: эксперимент с группировкой воздушных платформ в реальных условиях эксплуатации; расширение состава предметных сценариев; увеличение числа источников до целевого диапазона;

интеграцию с инфраструктурой пространственных данных общего доступа (ИССГР) для верификации интерфейсов межведомственного взаимодействия.

Применительно к настоящему эксперименту полученные результаты подтверждают работоспособность архитектурных решений и операциональность замкнутого контура. Зафиксированные значения частных метрик дают эмпирическое подкрепление компонентов, на которых строится расчётная оценка интегрального показателя  $E$ . Полное обоснование  $E$  на целевом сценарии — за пределами настоящего эксперимента и составляет предмет последующего этапа.

#### **4.6. Выводы по главе 4**

Четвёртая глава содержит систему метрик и методику оценки эффективности метода АИМТПО в задачах пространственно-временного анализа. Логика построения главы — движение от частных метрик качества отдельных компонентов системы к интегральной оценке эффективности метода в целом.

##### **4.6.1. Обобщение результатов оценки эффективности**

В систему оценки [82, 83, 142, 212] входят три уровня, по числу функциональных уровней геоинформационной системы: метрики качества геопространственных данных (бортовой и наземный контуры), метрики эффективности геоинформационных сервисов поддержки принятия решений, многофакторная оценка эффективности метода в целом. В §4.4.3 эффективность метода сопоставляется с базовыми подходами, которые получены последовательным исключением компонентов метода — от лёгких базовых конфигураций к более полным.

В §4.1 введена агрегационная вертикаль показателей качества данных  $Q_{msg} \rightarrow Q_{obj} \rightarrow Q_{SA}(Z)$ .  $Q_{msg}$  описывает качество отдельного сообщения,  $Q_{obj}$  — качество описания объекта,  $Q_{SA}(Z)$  — качество ситуационной осведомлённости по зоне. Помимо этой вертикали действуют системные метрики  $C, R, T$ ; в них объединены компонентные показатели по сквозным свойствам информационного обеспечения.

Динамическая обстановка требует, чтобы оценка учитывала временную составляющую качества. Для этого в системе оценки используются четыре класса временных метрик: актуальность данных с экспоненциальным затуханием; деградация точности прогнозирования с ростом горизонта ( $\Delta t_{max}$  и  $\beta$ ); временные характеристики формирования модели обстановки; устойчивость адаптивного контура ( $D_N, N_{conv}, R_{adapt}$ ).

Аналитическое обоснование преимуществ метода (§4.4.2) опирается на формальные свойства предложенных решений — предельную ошибку адаптивного контура  $\lim_{t \rightarrow \infty} \varepsilon(t) = \varepsilon_{irr}$ , оптимальную интеграцию независимых источников  $\sigma_{int}^2 = 1 / \sum_i \sigma_i^{-2}$ , информационно-теоретическое обоснование адаптивного управления наблюдениями. Экспериментальная верификация архитектурных решений подтверждает работоспособность подсистем геоинформационного обеспечения на имитационной среде распределённого мониторинга. Разработанные метрики дают количественное покрытие задач оценки на трёх уровнях; полная экспериментальная верификация интегрального показателя  $E$  на целевом сценарии воздушной мультидоменной группировки запланирована к следующему этапу исследования.

#### 4.6.2. Научная новизна результатов оценки

Шесть результатов, полученных в четвёртой главе, обладают новизной по отношению к существующим подходам [191, 203] к оценке эффективности геоинформационных систем.

**Научный результат 1.** Система метрик качества геопространственных данных для распределённых геоинформационных систем в динамических условиях. В отличие от моделей качества, ориентированных на статические наборы, она учитывает специфику непрерывных потоков, разделена на метрики бортового и наземного контуров, включает иерархическую агрегацию  $Q_{msg} \rightarrow Q_{obj} \rightarrow Q_{SA}(Z)$  и системные свойства  $C, R, T$ .

**Научный результат 2.** Система метрик пространственно-временного прогнозирования с учётом многомерности прогнозируемых характеристик. Включает позиционную ( $RMSE_{pos}$ ), скоростную ( $RMSE_{vel}$ ) и классификационную ( $Acc_{class}$ ) точность, метрики неопределённости ( $\kappa_{calib}$ ), метрики горизонта прогнозирования ( $t_{max}, \beta$ ) и метрики контура верификации ( $D_N, N_{conv}, R_{adapt}$ ).

**Научный результат 3.** Методика оценки эффекта адаптивной корректировки прогностических моделей в замкнутом контуре через четыре связанные метрики — устойчивость  $D_N$  (с опорой на рекуррентное накопление достоверности §2.5.7), скорость сходимости  $N_{conv}$ , эффект адаптации  $R_{adapt}$  и точность калибровки  $\kappa_{calib}$ .

**Научный результат 4.** Система критериев и метрик эффективности геоинформационных сервисов поддержки принятия решений с четырьмя базовыми критериями — оперативность, полнота, релевантность, достоверность — и метриками интероперабельности  $I_{technical}, I_{semantic}$  для оценки интерфейсов с внешними геоинформационными системами.

**Научный результат 5.** Методика многофакторной оценки эффективности метода АИМТПО, выполняющая синтез частных метрик в обобщённую характеристику результативности. Включает иерархическую структуру агрегирования, профили весовых коэффициентов с тройным обоснованием (АНР, swing weighting, анализ чувствительности по Соболю) и комбинированную свёртку метрик.

**Научный результат 6.** Экспериментальное подтверждение работоспособности архитектурных решений и сквозного контура «наблюдение → интеграция → верификация → решение» на имитационной среде распределённого мониторинга с тремя мобильными платформами. Подтверждены: преимущество распределённой архитектуры по нагрузке на канал связи (снижение на порядок), эффект интеграции наблюдений от множественных источников (двукратное снижение СКО локализации), кросс-

источниковая верификация (рост достоверности  $0,87 \rightarrow 0,94-0,95$ ), прослеживаемость происхождения данных (0,4 с).

Шесть результатов раскрывают пункты 6 и 7 раздела «Научная новизна» Введения применительно к оценочному уровню и экспериментальной верификации.

Соотнесение научных результатов с проблемами оценки эффективности приведено в таблице 4.6-1.

Таблица 4.6-1 — Соотнесение научных результатов с проблемами оценки эффективности

Проблема оценки	Научный результат
Неприменимость статических моделей качества к потоковым данным от распределённых источников	Система метрик качества данных для динамических условий с двойной проекцией $Q_{msg} \rightarrow Q_{obj} \rightarrow Q_{SA}$ и системными свойствами $C, R, T$ (результат 1)
Многомерность прогнозируемых характеристик и неопределённость прогноза в геоинформационном контексте	Система метрик пространственно-временного прогнозирования с точностью, неопределённостью, горизонтом и метриками контура верификации (результат 2)
Отсутствие методик оценки эффекта адаптации в замкнутом контуре	Методика оценки адаптивной корректировки через $D_N, N_{conv}, R_{adapt}, K_{calib}$ (результат 3)
Специфика оценки сервисов поддержки решений в условиях неопределённости и распределённой межведомственной среды	Система критериев и метрик эффективности сервисов с оценкой передачи неопределённости и интероперабельности $I_{technical}, I_{semantic}$ (результат 4)
Необходимость синтеза разнородных частных метрик в интегральную оценку	Методика многофакторной оценки с иерархическим агрегированием, тройным обоснованием весов и комбинированной свёрткой (результат 5)
Необходимость экспериментального подтверждения архитектурных решений и работоспособности замкнутого контура	Экспериментальная верификация подсистем геоинформационного обеспечения на имитационной среде с эмпирическим подтверждением эффекта интеграции и кросс-источниковой верификации (результат 6)

### 4.6.3. Положения, выносимые на защиту (по главе 4)

На основании проведённого исследования формулируются следующие положения, выносимые на защиту по материалам четвёртой главы.

Положение 4 (методика многофакторной оценки эффективности метода АИМТПО — формулировка см. Введение) обосновано в Главе 4 полным объёмом её содержания.

Обоснование опирается на всю совокупность результатов Главы 4 (§4.1–§4.5): систему метрик качества геопространственных данных для бортового, наземного и адаптивного контуров; систему метрик пространственно-временного прогнозирования (точностные, неопределённости  $\kappa_{calib}$ , горизонта  $\Delta t_{max}$ , контура верификации  $D_N, N_{conv}, R_{adapt}$ ); критерии и метрики эффективности геоинформационных сервисов с метриками интероперабельности  $I_{technical}, I_{semantic}$ ; методику многофакторной оценки с иерархическим агрегированием, тройным обоснованием весов через АНР, swing weighting и анализ чувствительности по Соболю; экспериментальную верификацию на имитационной среде с подтверждением эффекта интеграции и операциональности замкнутого контура «наблюдение → интеграция → верификация → решение».

Положение 5 (методология адаптивно-интегрированного тактического прогнозирования обстановки — формулировка см. Введение) обосновывается распределённо в Главах 2, 3, 4. Вклад Главы 4 — оценочная развёртка методологии и её экспериментальная верификация.

Глава 4 обосновывает Положение 5 на оценочном уровне. Вместе с Главами 2 и 3 она даёт согласованность всех трёх уровней — методологического, архитектурного, оценочного. Принцип согласованности уровней реализуется в прямом соответствии компонентов методики многофакторной оценки (§4.4) методологическим основаниям Главы 2 и архитектурным решениям Главы 3: методологические принципы получают

своё воплощение как системы метрик, архитектурные решения — оценочную проверку.

Остальные четыре принципа методологии АИМТПО получают экспериментальное подтверждение по отдельности.

— Принцип замкнутости пространственно-временного контура — через демонстрацию работоспособности всех преобразований контура и измеренную сквозную задержку «наблюдение → интеграция → верификация → решение».

— Принцип прослеживаемости — через измерение времени восстановления цепочки происхождения данных.

— Принцип эпистемологической дифференциации — через две взаимодополняющие группы метрик: шестикатегорийная таксономия достоверности даёт категориальное различие факт/прогноз/гипотеза, а метрики калибровки прогностической неопределённости проверяют численное соответствие декларируемой и наблюдаемой надёжности прогнозных состояний.

— Принцип темповой адекватности — через согласованность эксперимента с темповыми требованиями архитектурных контуров.

Пять переориентаций Положения 5 получают экспериментальное подтверждение в виде конкретных численных результатов.

— Встроенный прогностический контур — операциональным замыканием цикла «наблюдение → интеграция → верификация → решение» с измеренной сквозной задержкой 265 мс.

— Адаптивное управление источниками — двукратным снижением СКО локализации при интеграции наблюдений.

— Атрибуция неопределённости каждого элемента модели — ростом показателя достоверности с 0,87 до 0,94–0,95 при кросс-источниковой верификации.

— Темпово-зависимая обработка — снижением нагрузки на канал связи на порядок при сохранении точности распознавания.

— Методологический цикл — подтверждением работоспособности замкнутого контура на сценарии межагентной кросс-верификации, в котором результаты верификации возвращаются в адаптивные модули.

#### **4.6.4. Достижение цели и решение задач исследования**

Результаты четвёртой главы позволяют охарактеризовать достижение цели исследования — разработку методологии адаптивно-интегрированного тактического прогнозирования обстановки в задачах пространственно-временного анализа и реализующего её геоинформационного метода (метод АИМТПО), обеспечивающих замкнутый контур формирования и верификации модели обстановки в распределённых геоинформационных системах ситуационных центров межведомственного назначения. Содержательно достижение цели проявляется в повышении достоверности формирования модели обстановки и точности краткосрочного прогнозирования её эволюции.

Аналитическое обоснование подтверждает преимущества метода АИМТПО на уровне формальных свойств:

— замкнутый контур обработки с верификацией и адаптацией стабилизирует ошибку прогнозирования на уровне неустранимой неопределённости, тогда как в разомкнутых системах ошибка может неограниченно возрастать при дрейфе характеристик обстановки;

— интеграция множественных источников с оптимальным взвешиванием даёт точность, превышающую точность любого отдельного источника;

— адаптивное управление наблюдениями максимизирует информационный выигрыш на единицу затраченных ресурсов.

Экспериментальная верификация архитектурных решений на имитационной среде (§4.5) даёт эмпирическое подтверждение по компонентным показателям метода:

— интеграция наблюдений от множественных источников: двукратное снижение среднеквадратической ошибки локализации контролируемых объектов при добавлении второго источника к одиночному;

— кросс-источниковая верификация: повышение показателя достоверности объекта с 0,87 до 0,94–0,95 при подтверждении наблюдения независимым источником, согласованное с формулой байесовского слияния независимых наблюдений;

— преимущество распределённой архитектуры обработки: снижение нагрузки на канал связи на порядок (с 28,5 до 2,1 Мбит/с от одной платформы) при сопоставимой точности распознавания;

— работа замкнутого контура: сквозная задержка от регистрации сенсорными данными до выработки решения составила около 265 мс на сценарии межагентной кросс-верификации, что существенно меньше допустимого порога времени реакции для критических событий;

— прослеживаемость данных: время восстановления цепочки происхождения «источник → наблюдение → интегрированное представление → решение» составило 0,4 с, что достаточно для прослеживаемости в реальном времени.

Часть эффектов метода АИМТПО носит долгосрочный характер и не может быть полностью оценена в рамках ограниченного эксперимента. К таким эффектам относятся систематическое улучшение точности прогнозирования после периода адаптации модели, более медленная деградация точности на коротких и средних горизонтах, улучшение калибровки вероятностных оценок и эффект адаптивного управления источниками в части перенаправления ресурсов наблюдения в районы максимальной неопределённости. Эти эффекты обоснованы аналитически и качественно поддержаны результатами экспериментальной верификации архитектурных решений; количественная оценка требует расширенного экспериментального исследования на целевом сценарии.

Условия достижения эффекта определены через анализ границ применимости: метод АИМТПО демонстрирует максимальное преимущество при наличии множественных источников, умеренно динамичной обстановке с выраженными закономерностями, достаточном объёме верификационных данных и возможности управления ресурсами наблюдения. При выходе за пределы этих условий преимущество сокращается или нивелируется.

Цель исследования достигнута в пределах установленных границ применимости: метод АИМТПО обеспечивает повышение достоверности и точности прогнозирования при выполнении условий, типичных для задач пространственно-временного анализа динамической обстановки в распределённой геоинформационной среде ситуационных центров. Достижение цели опирается на двойное основание — аналитическое обоснование преимуществ через формальные свойства метода и эмпирическую верификацию архитектурных решений и компонентных показателей на имитационной среде.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В диссертационной работе разработана методология адаптивно-интегрированного тактического прогнозирования обстановки в задачах пространственно-временного анализа и реализующий её геоинформационный метод (метод АИМТПО). Метод замыкает пространственно-временной контур «наблюдение — интеграция — прогнозирование — верификация — адаптация» для распределённых гетерогенных источников геопространственных данных. В состав методологии входят метод АИМТПО, геоинформационная модель обстановки с прогнозными состояниями, распределённая геоинформационная архитектура ситуационного центра межведомственного назначения и методика многофакторной оценки эффективности. Методология опирается на пять принципов, обоснованных в Главах 2–4.

## Основные научные результаты

В ходе исследования получены следующие научные результаты.

**1. Систематизация ограничений существующих геоинформационных подходов** к обеспечению задач пространственно-временного анализа в условиях распределённых источников и динамической обстановки. Систематизация проведена по концептуальному, методологическому и архитектурному уровням, охватывает четыре составляющих неопределённости в геопространственных данных, выделяет факторы критического и высокого влияния при низкой и средней проработанности существующих решений, формирует количественную типологию рассогласований источников. От существующих обзорных работ результат отличается комплексным охватом четырёх типов неопределённости, построением сравнительной типологии классов геоинформационных платформ и количественным обоснованием разрывов через параметры пространственного, темпорального и семантического рассогласования. Результат опирается на §1.3, §1.5 и соответствует п. 1, 7 паспорта специальности 1.6.20.

**2. Обоснование комплексного методологического разрыва существующих геоинформационных моделей** в части представления прогнозных состояний и формализации эпистемологической маркировки знания. Разрыв охватывает четыре связанных уровня: модели данных, источники, методы прогнозирования, архитектурные решения. На концептуальном уровне в традиционных моделях ГИС нет онтологического места для прогнозов. На методологическом уровне теряется прослеживаемость при интеграции, и расхождения невозможно атрибутировать. На архитектурном уровне прогнозирование остаётся внешней функцией, а верификация и адаптация архитектурно не предусмотрены. От существующих анализов разрывов результат отличается одновременным охватом четырёх уровней с фиксацией их взаимосвязанности: ни один из

уровней не преодолевается изолированно. Результат опирается на §1.2, §1.4, §1.6 и соответствует п. 1, 2 паспорта.

**3. Геоинформационный метод адаптивно-интегрированного тактического прогнозирования обстановки** (метод АИМТПО), формализующий замкнутый пространственно-временной контур «наблюдение — интеграция — прогнозирование — верификация — адаптация» с эксплицитной формализацией всех преобразований. Контур задан четырьмя преобразованиями: формирование прогнозного состояния, регистрация факта, вычисление расхождения в пространстве состояний с учётом ковариационной структуры, адаптация модели по параметру, структуре или классу. Контур операционализирован через формулу состояния обстановки и формулу прогнозного состояния, введённые в §2.1.2. От существующих геоинформационных методов результат отличается включением прогнозных состояний в модель как полноправных элементов с эпистемологической маркировкой и обеспечением прослеживаемой адаптации в едином операциональном контуре. Результат опирается на §2.1, §2.5 и соответствует п. 1, 7 паспорта.

**4. Геоинформационная модель динамической обстановки с шестикатегорийной таксономией достоверности** (достоверные, вероятные, сомнительные, противоречивые, маловероятные, ложные сведения), экспоненциальной моделью темпоральной актуальности с класс-зависимым коэффициентом затухания  $\lambda$  и периодом полураспада  $T_{1/2}$ , операторской шкалой полноты данных  $\gamma \in \{0, \dots, 11\}$ , агрегируемой в четыре категории. Онтологическая основа модели — четырёхэлементная схема «объекты — состояния — события — процессы», в которой прогнозное состояние включено в онтологию как равноправный элемент наряду с наблюдаемым. От существующих ГИС-моделей результат отличается полноправным включением прогнозных состояний наряду с фактическими и операциональной формализацией неопределённости как атрибута каждого

элемента модели, а не свойства набора данных в целом. Результат опирается на §2.2 и соответствует п. 2 паспорта.

**5. Распределённая четырёхуровневая архитектура геоинформационной системы ситуационного центра межведомственного назначения:** бортовой уровень, уровень предварительной агрегации, наземный уровень, центр консолидации и обучения. Архитектура использует адаптерный принцип нормализации источников, двухэкземплярное развёртывание эталонной геоинформационной базы и реализует межведомственное взаимодействие через инфраструктуру пространственных данных по стандартам OGC с применением формата GeoJSON Feature Collection. От существующих архитектурных решений результат отличается двойным количественным обоснованием иерархии — по вычислительной нагрузке и пропускной способности канала связи; посреднической схемой межведомственного обмена со снижением числа поддерживаемых интерфейсов с  $N \times M$  до  $N + M$  при числе субъектов порядка десяти; автономным функционированием бортового контура при потере связи; сквозной прослеживаемостью операций согласования через распределённую обработку. Результат опирается на §3.1, §3.4 и соответствует п. 6, 11, 16 паспорта.

**6. Методика многофакторной оценки эффективности метода АИМТПО с трёхуровневой иерархией метрик «компонентный — системный — интегральный».** Компонентный уровень включает метрики качества геопространственных данных (бортовой контур: семантическое сжатие, точность геопривязки, вариативность задержек; наземный контур: пространственное покрытие, темпоральная актуальность, согласованность интеграции) и метрики прогнозирования ( $RMSE_{pos}$ ,  $RMSE_{vel}$ ,  $Acc_{class}$ ; калибровка  $\kappa_{calib}$  через нормализованную инновацию  $v_{norm}$ ; горизонт  $\Delta t_{max}$  и темп деградации  $\beta$ ; контур верификации  $D_N$ ,  $N_{conv}$ ,  $R_{adapt}$ ). Системный уровень охватывает сквозные свойства информационного обеспечения — полноту  $S$ , достоверность  $R$ , своевременность  $T$ ; их сервисная развёртка

раскрыта через метрики оперативности, полноты, релевантности и достоверности сервисов поддержки принятия решений, а взаимодействие с внешними системами — через метрики интероперабельности  $I_{technical}$ ,  $I_{semantic}$ . Интегральный уровень — обобщённый показатель эффективности  $E$  как взвешенная свёртка  $C, R, T$  с обоснованными весами и комбинированная свёртка, одновременно учитывающая среднее качество компонентов и качество наиболее слабого компонента. Весовые коэффициенты обоснованы методом анализа иерархий (АНР) с подтверждённым отношением консистентности, swing weighting и анализом чувствительности по Соболю. От существующих подходов к оценке геоинформационных систем результат отличается формальным обоснованием весов через три независимых метода и комбинированной свёрткой, реализующей принцип «слабого звена». Результат опирается на §4.1, §4.4 и соответствует п. 7, 11 паспорта.

**7. Экспериментальная верификация архитектурных решений и сквозной работоспособности замкнутого контура метода АИМТПО** на имитационной среде распределённого мониторинга с тремя мобильными платформами. Эффект интеграции наблюдений от двух источников выразился в двукратном снижении среднеквадратической ошибки локализации (с 1,8 м до 0,9 м), согласованном с информационной формой оптимальной интеграции (формула (2.21), §2.3.6) при анизотропных ковариациях ракурсно разнесённых наблюдений. Кросс-источниковая верификация повысила показатель достоверности объекта с 0,87 до 0,94–0,95 при подтверждении независимым источником, согласованно с формулой байесовского слияния. Распределённая архитектура снизила нагрузку на канал связи на порядок (с 28,5 до 2,1 Мбит/с от одной платформы) при сопоставимой точности. Сквозная задержка замкнутого контура составила около 265 мс на сценарии межагентной кросс-верификации; время восстановления цепочки происхождения данных — 0,4 с. От существующих апробаций результат отличается операциональной демонстрацией кросс-источниковой верификации, эмпирическим подтверждением преимущества распределённой архитектуры и

согласованностью наблюдаемых эффектов с теоретическими предсказаниями метода. Результат опирается на §4.5 и соответствует п. 11 паспорта.

**8. Формальный аппарат метода АИМТПО** как сквозной результат, объединяющий компоненты метода в единой операциональной логике. В состав аппарата входит критерий устойчивости адаптивного процесса через рекуррентное накопление достоверности  $D_N$  с доказуемой монотонностью при согласованных наблюдениях и ограниченностью сверху (§2.5.7); аппарат байесовской интеграции с информационным фильтром для подтверждённо независимых источников и ковариационным пересечением (Covariance Intersection) при неизвестной корреляции; динамическая калибровка надёжности источников  $K_{ист}$  на основе истории расхождений; три формальных критерия конфликтов между наблюдениями — расстояние Махаланобиса в пространственных координатах с порогом  $\chi_{0,99}^2(m)$ , дивергенция Бхаттачарьи в пространстве классификационных гипотез, темпоральная несогласованность по интервалу актуальности. От существующих формальных подходов к геоинформационной интеграции результат отличается согласованностью компонентов в едином замкнутом контуре. Критерии конфликтов используют те же ковариационные структуры, что и процедуры слияния. Диагностика расхождений опирается на тот же аппарат нормализованных инноваций, что и критерий устойчивости. Калибровка надёжности замыкается на адаптацию через прослеживаемые метаданные. Результат опирается на §2.3, §2.5.7 и соответствует п. 7, 19 паспорта.

### **Положения, выносимые на защиту**

На защиту выносятся следующие положения.

**Положение 1.** Геоинформационный метод адаптивно-интегрированного тактического прогнозирования обстановки (метод АИМТПО), реализующий замкнутый пространственно-временной контур «наблюдение — интеграция — прогнозирование — верификация — адаптация», отличающийся от

существующих геоинформационных методов целостностью контура, включением прогнозных состояний в модель обстановки и сквозной прослеживаемостью происхождения данных и преобразований как условием адаптации.

**Положение 2.** Геоинформационная модель обстановки, включающая прогнозные состояния как равноправный элемент онтологии и эпистемологическую маркировку знания на основе шестикатегорийной таксономии достоверности и темпоральной модели актуальности.

**Положение 3.** Архитектура распределённой геоинформационной системы ситуационного центра **межведомственного назначения**, реализующая метод АИМТПО на архитектурном уровне, отличающаяся двойным количественным основанием иерархии пространственно-временных контуров обработки — по вычислительной нагрузке и пропускной способности канала связи, двухэкземплярным развёртыванием эталонной геоинформационной базы с автономным функционированием бортового контура при потере связи с наземным уровнем, посреднической схемой межведомственного информационного обмена через геоинформационную инфраструктуру общего доступа со снижением числа поддерживаемых интерфейсов с  $N \times M$  до  $N + M$ , контуром непрерывного обучения с обратимостью адаптационных воздействий на каждом этапе развёртывания и сквозной прослеживаемостью операций согласования и адаптационных воздействий через распределённую обработку.

**Положение 4.** Методика многофакторной оценки эффективности метода АИМТПО в задачах пространственно-временного анализа, отличающаяся учётом специфики распределённых источников через метрики семантического сжатия бортового контура и согласованности интеграции наземного контура, метриками эффекта адаптации в замкнутом контуре через сопоставление с базовыми подходами при последовательном исключении компонентов метода, оценкой деградации точности прогнозирования на различных горизонтах и калибровки прогностической неопределённости,

оценкой корректности представления неопределённости в сервисах поддержки принятия решений и метриками интероперабельности с внешними геоинформационными системами.

**Положение 5.** Методология адаптивно-интегрированного тактического прогнозирования обстановки в задачах пространственно-временного анализа, базирующаяся на принципах замкнутости пространственно-временного контура обработки, эпистемологической дифференциации состояний модели, прослеживаемости операций как условия адаптации, согласованности методологического, архитектурного и оценочного уровней и темповой адекватности обработки классам обстановок. Методология формулирует переориентации геоинформатики применительно к задачам обеспечения распределённых ситуационных центров **межведомственного назначения**: от внешней схемы прогнозирования — к встроенному прогностическому контуру с пространственно-временной верификацией; от постфактумной оценки качества данных — к адаптивному управлению источниками в реальном времени; от метаданных набора — к атрибуции неопределённости каждого элемента геоинформационной модели; от регулярного режима публикации данных — к темпово-зависимой обработке с явным согласованием классов обстановок и архитектурных режимов; от метода как разовой процедуры — к методологическому циклу, в котором результаты прогнозирования возвращаются в систему как материал адаптации. Методология объединяет метод АИМТПО (Положение 1), геоинформационную модель обстановки (Положение 2), распределённую геоинформационную архитектуру (Положение 3) и методику многофакторной оценки эффективности (Положение 4) в замкнутый пространственно-временной контур «наблюдение — интеграция — прогнозирование — верификация — адаптация», опираясь на выявленные в Главе 1 ограничения существующих методологий пространственно-временного анализа в распределённых геоинформационных системах.

**Достижение цели и решение задач исследования**

В соответствии с поставленной целью исследования — разработкой методологии адаптивно-интегрированного тактического прогнозирования обстановки в задачах пространственно-временного анализа и реализующего её геоинформационного метода (метод АИМТПО), обеспечивающих замкнутый контур формирования и верификации модели обстановки в распределённых геоинформационных системах ситуационных центров межведомственного назначения — получены аналитические и экспериментальные результаты, подтверждающие достижение цели в пределах установленных границ применимости метода АИМТПО.

Достижение цели подтверждается следующим. Аналитическое обоснование (§4.4.2) показывает, что замкнутый контур обработки с верификацией и адаптацией стабилизирует ошибку прогнозирования на уровне неустранимой неопределённости  $\varepsilon_{\text{итг}}$ , тогда как в разомкнутых системах ошибка может неограниченно возрастать при дрейфе характеристик обстановки; интеграция множественных источников с оптимальным взвешиванием даёт точность, превышающую точность любого отдельного источника. Экспериментальная верификация (§4.5) подтверждает компонентные показатели: двукратное снижение среднеквадратической ошибки локализации при интеграции наблюдений от двух источников; повышение показателя достоверности объекта с 0,87 до 0,94–0,95 при кросс-источниковой верификации; снижение нагрузки на канал связи на порядок при сохранении точности распознавания.

Полученные результаты — метод АИМТПО, геоинформационная модель обстановки с эпистемологической маркировкой знания, распределённая геоинформационная архитектура ситуационного центра межведомственного назначения и методика многофакторной оценки эффективности — составляют методологию адаптивно-интегрированного тактического прогнозирования обстановки в задачах пространственно-временного анализа. На их основе сформулированы пять переориентаций

геоинформатики, приведённых в Положении 5. Аналитическое обоснование замкнутого контура согласуется с его экспериментальной верификацией.

Достижение цели обеспечено решением шести исследовательских задач. Содержание полученных результатов в разрезе задач сводится к следующему.

**Задача 1** — анализ существующих подходов к геоинформационному обеспечению задач пространственно-временного анализа в условиях распределённых источников и динамической обстановки, выявление методологических разрывов и обоснование необходимости разработки нового метода — решена в Главе 1. Проанализированы пространственно-временные модели данных, источники и методы прогнозирования в действующих геоинформационных системах (§1.2–§1.4); установлены ограничения распределённых архитектур ситуационных центров (§1.5); зафиксирован трёхуровневый методологический разрыв на концептуальном, методологическом и архитектурном уровнях, охватывающий четыре связанных области геоинформатики — модели данных, источники, методы прогнозирования и архитектурные решения (§1.6).

**Задача 2** — разработка методологических оснований метода АИМТПО — решена в Главе 2. Введены принцип замкнутого пространственно-временного контура и его формальная развёртка через систему преобразований (§2.1); разработана геоинформационная модель динамической обстановки с шестикатегорийной таксономией достоверности, экспоненциальной моделью темпоральной актуальности и операторской шкалой полноты (§2.2); сформирован формальный аппарат пространственно-временной интеграции с тремя критериями конфликтов и процедурами байесовского слияния (§2.3); построена классификация прогностических моделей (§2.4); формализованы механизмы адаптации в замкнутом контуре с обоснованием устойчивости рекуррентного процесса накопления достоверности (§2.5).

**Задача 3** — разработка архитектурных решений распределённой геоинформационной системы, реализующей метод АИМТПО, — решена в

Главе 3. Обоснована четырёхуровневая иерархия пространственно-временных контуров обработки с двойным количественным основанием — по вычислительной нагрузке и пропускной способности канала связи (§3.1); раскрыта адаптерная архитектура нормализации источников (§3.1.4); описаны бортовой и наземный контуры обработки с разграничением функций по принципу необратимости преобразований (§3.2, §3.3); разработана посредническая схема межведомственного взаимодействия через геоинформационную инфраструктуру общего доступа по стандартам OGC со снижением числа поддерживаемых интерфейсов с  $N \times M$  до  $N + M$  (§3.4); сформирован контур адаптивной обратной связи с обратимостью на каждом этапе развёртывания моделей (§3.5).

**Задача 4** — разработка методики многофакторной оценки эффективности метода АИМТПО — решена в подразделах 4.1–4.4. Сформирована система метрик качества геопространственных данных в бортовом и наземном контурах с двойной проекцией качества (§4.1); разработана система метрик пространственно-временного прогнозирования по четырём осям — точность, неопределённость, горизонт, контур верификации (§4.2); определены критерии и метрики эффективности геоинформационных сервисов поддержки принятия решений (§4.3); построена методика многофакторной оценки с трёхуровневой иерархией агрегирования и обоснованием весовых коэффициентов сочетанием трёх независимых методов — анализа иерархий, swing weighting и анализа чувствительности по Соболю (§4.4).

**Задача 5** — экспериментальная верификация архитектурных решений и сквозной работоспособности замкнутого контура метода АИМТПО — решена в §4.5 в части компонентной верификации на имитационной среде распределённого мониторинга с тремя мобильными платформами. Подтверждены работоспособность подсистем геоинформационного обеспечения, эффект интеграции наблюдений от множественных источников, преимущество распределённой архитектуры по нагрузке на канал связи и

сквозная работоспособность замкнутого контура «наблюдение — интеграция — верификация — решение». Системная верификация интегрального показателя эффективности на целевом сценарии воздушной мультидоменной группировки отнесена к последующему этапу исследования (см. перспективное направление 1).

**Задача 6** — обобщение результатов в методологию адаптивно-интегрированного тактического прогнозирования обстановки — решена распределённо в Главах 2–4 и зафиксирована в настоящем Заключение. По результатам задач 2–5 сформулированы пять принципов методологии: замкнутости пространственно-временного контура обработки; эпистемологической дифференциации состояний модели; прослеживаемости операций как условия адаптации; согласованности методологического, архитектурного и оценочного уровней; темповой адекватности обработки классам обстановок. Сформулированы пять переориентаций геоинформатики, описывающих переход от внешней схемы прогнозирования к встроенному прогностическому контуру; от постфактумной оценки качества данных к адаптивному управлению источниками; от метаданных набора к атрибуции неопределённости каждого элемента модели; от регулярного режима публикации данных к темпово-зависимой обработке; от метода как разовой процедуры к методологическому циклу с возвратом результатов прогнозирования в систему как материала адаптации. Полученная методология объединяет метод АИМТПО, геоинформационную модель обстановки, распределённую геоинформационную архитектуру и методику многофакторной оценки эффективности в замкнутый пространственно-временной контур.

### **Теоретическая и практическая значимость**

#### **Теоретическая значимость работы.**

1. Развитие геоинформатики в части формализации замкнутого пространственно-временного контура с прослеживаемой адаптацией:

введение прогнозного состояния как равноправного элемента онтологии модели обстановки, эпистемологическая маркировка знания через шестикатегорийную таксономию достоверности.

2. Формальный аппарат интеграции и адаптации, применимый к широкому классу задач пространственно-временного анализа в геоинформатике — анализу изменений во времени, движения, событий, процессов, обнаружению пространственно-временных аномалий, прогнозированию пространственно-временных закономерностей, сценарному анализу, верификации модели обстановки, геопространственной свёртке и агрегации данных.

3. Расширение системы метрик качества геоинформационного обеспечения трёхуровневой иерархией «компонентный — системный — интегральный» с интегральным показателем эффективности  $E$  и обоснованием весовых коэффициентов сочетанием трёх независимых методов.

4. Формализация прослеживаемости данных как методологического условия адаптации в замкнутом контуре и архитектурного условия атрибуции расхождений в распределённой обработке.

### **Практическая значимость работы.**

1. Результаты применимы к задачам мониторинга, реагирования, контроля территории, картографирования и поддержки принятия решений в распределённых геоинформационных системах **межведомственного назначения** с использованием мобильных сенсорных платформ как источников геопространственных данных.

2. Архитектурные решения совместимы со стандартами консорциума OGC (WFS, WMS, WMTS, WCS) и форматом GeoJSON Feature Collection, что обеспечивает интеграцию в действующие инфраструктуры пространственных данных и взаимодействие с геоинформационными системами различных производителей и архитектурных поколений.

3. Методика многофакторной оценки эффективности применима для сравнения и приоритизации архитектурных решений в распределённых

геоинформационных системах при разработке и модернизации ситуационных центров.

4. Посредническая схема межведомственного обмена через инфраструктуру пространственных данных снижает число поддерживаемых интерфейсов с  $N \times M$  до  $N + M$  и применима в средах с гетерогенным составом ведомственных потребителей.

5. Двухэкземплярное развёртывание эталонной геоинформационной базы с автономным функционированием бортового контура при потере связи применимо в системах с нестабильной связностью каналов передачи.

6. Адаптерный принцип нормализации источников применим при интеграции действующих геоинформационных платформ в распределённую инфраструктуру без перепроектирования внутренних форматов и протоколов.

### **Перспективные направления дальнейших исследований**

1. Полная экспериментальная верификация интегрального показателя эффективности на целевом сценарии воздушной мультидоменной группировки. Расширение экспериментальной программы за пределы компонентной верификации §4.5 даст количественную оценку всей иерархии метрик в условиях, приближённых к целевому применению.

2. Расширение метода АИМТПО на задачи прогнозирования социальных, экономических и природных пространственно-распределённых процессов. Структура метода инвариантна к предметной области; адаптация к новым классам процессов сводится к параметризации моделей динамики, периодов полураспада достоверности и порогов конфликтов.

3. Развитие формального аппарата мульти-агентной адаптации в условиях ограниченной связности и интермиттентного обмена данными между распределёнными узлами. Случай, в котором замкнутый контур работает на нескольких независимо адаптирующихся узлах с эпизодическим обменом, требует дополнительных условий согласованности адаптации.

4. Сопряжение метода АИМТПО с системами поддержки принятия решений на основе технологий управления знаниями и онтологического моделирования. Связь шестикатегорийной таксономии достоверности с предметными онтологиями расширит выразительные возможности модели обстановки.

5. Разработка формальных условий гарантированной устойчивости адаптивного процесса при нестационарной обстановке. Свойства монотонности и ограниченности рекуррентного соотношения накопления достоверности §2.5.7 установлены при определённых допущениях о согласованности наблюдений; ослабление этих допущений ставит задачу доказательства устойчивости в более общих условиях.

6. Адаптация архитектурных решений к перспективным стандартам инфраструктур пространственных данных — OGC API, STAC, INSPIRE. Переход на следующее поколение спецификаций OGC расширит интероперабельность с современными геоинформационными платформами; принципы посреднической схемы и адаптерной нормализации при таком переходе сохраняются.

## **СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Балдина, Е. А. Дешифрирование аэрокосмических снимков : учебник / Е. А. Балдина, И. А. Лабутина. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : КДУ : Добросвет, 2021. – 269 с. – DOI 10.31453/kdu.ru.978-5-7913-1163-4-2021-269. – ISBN 978-5-7913-1163-4. – Текст : непосредственный.
2. Бельшева, Ю. В. Проблема оценки качества пространственно-временных данных, получаемых от системы метеорологических наблюдений / Ю. В. Бельшева, А. В. Матерухин // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъёмка. – 2020. – № 11. – С. 149–151. – Текст : непосредственный.
3. Берлянт, А. М. Геоиконика / А. М. Берлянт. – Москва : Астрей, 1996. – 207 с. – Текст : непосредственный.

4. Берлянт, А. М. Геоинформационное картографирование / А. М. Берлянт. – Москва : МГУ, РАЕН, 1997. – 218 с. – Текст : непосредственный.
5. Берлянт, А. М. Картография : учебник для вузов / А. М. Берлянт. – Москва : Аспект Пресс, 2002. – 336 с. – ISBN 5-7567-0142-7. – Текст : непосредственный.
6. Биденко, С. И. Аэромобильные киберфизические платформы как инструмент геоинформационной поддержки управления арктической территориальной активностью / С. И. Биденко, Е. Л. Бородин, А. А. Бенгерт [и др.] // Информация и Космос. – 2021. – № 4. – С. 126–136. – Текст : непосредственный.
7. Биденко, С. И. Геоинформационная процедура оценки региональной ситуации на основе оперативного ИНС-анализа гидрометеорологической и экологической информации (на примере Обской губы) / С. И. Биденко, И. С. Храмов, А. А. Бенгерт, И. С. Мучкаева // Гидрометеорология и экология. – 2022. – № 68. – С. 508–524. – Текст : непосредственный.
8. Биденко, С. И. Топологизация картографической модели района территориальной активности как элемент оценки обстановки / С. И. Биденко, Е. Л. Бородин, К. В. Захаров [и др.] // Информация и Космос. – 2021. – № 1. – С. 152–158. – Текст : непосредственный.
9. Броневиц, А. Г. Принятие решений, основанное на неточных вероятностях, и агрегирование источников информации / А. Г. Броневиц, И. Н. Розенберг // Нечёткие системы и мягкие вычисления. – 2023. – Т. 18, № 1. – С. 5–27. – Текст : непосредственный.
10. Булгаков, С. В. Геоинформационное моделирование : учебное пособие / С. В. Булгаков. – Москва : МАКС Пресс, 2019. – 68 с. – Текст : непосредственный.
11. Булгаков, С. В. Информационное визуальное моделирование / С. В. Булгаков // Конструкторское бюро. – 2018. – № 2 (133). – С. 47–53. – Текст : непосредственный.

12. Булгаков, С. В. Прикладная геоинформатика : учебное пособие / С. В. Булгаков. – Москва : МАКС Пресс, 2019. – 71 с. – Текст : непосредственный.
13. Вагизов, М. Р. Автономное картирование лесной растительности группировкой беспилотных воздушных судов (часть 1) / М. Р. Вагизов, П. И. Кузин, Н. С. Жовнеров, Г. С. Иванов, Я. А. Петров // Геоинформатика. – 2025. – № 4. – С. 37–44. – ISSN 1609-364X. – Текст : непосредственный.
14. Вагизов, М. Р. Введение в геоинформационное управление : учебное пособие / М. Р. Вагизов, Е. П. Истомин, О. Н. Колбина, С. П. Присяжнюк, А. Г. Соколов, Н. В. Яготинцева. – Санкт-Петербург : НП «БИУ», 2021. – 352 с. – Текст : непосредственный.
15. Вагизов, М. Р. Методика дешифрирования и инвентаризации лесных насаждений средствами ГИС AutoCAD MAP / М. Р. Вагизов, С. Ю. Степанов, Я. А. Петров, А. Ю. Сидоренко // Геоинформатика. – 2020. – № 4. – С. 20–27. – ISSN 1609-364X. – Текст : непосредственный.
16. Вагизов, М. Р. Технология и метод геоинформационного моделирования и управления лесными экосистемами : диссертация на соискание учёной степени доктора технических наук : специальность 1.6.20 — Геоинформатика, картография / Вагизов Марсель Равильевич ; Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С. М. Кирова. – Санкт-Петербург, 2023. – Текст : непосредственный.
17. Вагизов, М. Р. Технология и метод геоинформационного моделирования и управления лесными экосистемами : автореферат диссертации на соискание учёной степени доктора технических наук : специальность 1.6.20 — Геоинформатика, картография / Вагизов Марсель Равильевич ; Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С. М. Кирова, Институт леса и природопользования, Кафедра информационных систем и технологий. – Санкт-Петербург, 2023. – 45 с. – Библиогр.: с. 41–45. – Текст : непосредственный.

18. Верхова, Г. В. Метод многоаспектного геоинформационного моделирования географического района / Г. В. Верхова, С. В. Акимов, С. П. Присяжнюк // Информация и Космос. – 2021. – № 4. – С. 123–129. – Текст : непосредственный.
19. Волкова, В. Н. Теория систем и системный анализ : учебник для академического бакалавриата / В. Н. Волкова, А. А. Денисов. – 2-е изд. – Москва : Юрайт, 2014. – 616 с. – Текст : непосредственный.
20. Гайдук, А. Р. Адаптивные системы управления : учебное пособие / А. Р. Гайдук, Е. А. Плаксиенко. – Ростов-на-Дону ; Таганрог : Изд-во Южного федерального университета, 2018. – 120 с. – ISBN 978-5-9275-2882-0. – Текст : непосредственный.
21. Геоинформатика : толковый словарь основных терминов / под редакцией А. М. Берлянта и А. В. Кошкарева. – Москва : ГИС-Ассоциация, 1999. – 204 с. – Текст : непосредственный.
22. Геоинформатика : учебник для студентов высших учебных заведений : в 2 кн. Кн. 2 / Е. Г. Капралов, А. В. Кошкарев, В. С. Тикунов [и др.] ; под редакцией В. С. Тикунова. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва : Академия, 2010. – 432 с. – ISBN 978-5-7695-6823-7. – Текст : непосредственный.
23. Глубокое обучение / Я. Гудфеллоу, И. Бенджио, А. Курвиль ; перевод с английского. – Москва : ДМК Пресс, 2018. – 652 с. – Текст : непосредственный.
24. Гмурман, В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика : учебное пособие для вузов / В. Е. Гмурман. – 12-е изд., перераб. и доп. – Москва : Юрайт, 2019. – 479 с. – ISBN 978-5-534-01925-6. – Текст : непосредственный.
25. Голубчик, М. М. Теория и методология географической науки : учебник для вузов / М. М. Голубчик ; под редакцией С. П. Евдокимова, С. В. Макар, А.

М. Носонова. – 2-е изд., испр. и доп. – Москва : Юрайт, 2020. – 409 с. – Текст : непосредственный.

26. ГОСТ 19.701-90. Единая система программной документации. Схемы алгоритмов, программ, данных и систем. Условные обозначения и правила выполнения. – Москва : ИПК Издательство стандартов, 1990. – 26 с. – Текст : непосредственный.

27. ГОСТ 7.32-2017. Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Отчёт о научно-исследовательской работе. Структура и правила оформления. – Москва : Стандартинформ, 2017. – 37 с. – Текст : непосредственный.

28. ГОСТ ИСО 31000-2019. Менеджмент риска. Принципы и руководство. – Москва : Стандартинформ, 2020. – Текст : непосредственный.

29. ГОСТ Р 58771-2019. Менеджмент риска. Технологии оценки риска. – Москва : Стандартинформ, 2019. – Текст : непосредственный.

30. ГОСТ Р 70955-2023. Картография цифровая. Термины и определения. – Москва : Российский институт стандартизации, 2023. – Текст : непосредственный.

31. Гук, А. П. Моделирование цифровых пространственных данных : монография / А. П. Гук. – Новосибирск : СГГА, 2009. – 132 с. – ISBN 978-5-87693-324-3. – Текст : непосредственный.

32. Демьянов, В. В. Геоинформатика : словарь-справочник основных терминов / В. В. Демьянов, Е. А. Савиных. – Москва : Изд-во МИИГАиК, 2008. – 120 с. – Текст : непосредственный.

33. Демьянов, В. В. Геоestatистика : теория и практика / В. В. Демьянов, Е. А. Савельева ; под редакцией Р. В. Арутюняна. – Москва : Наука, 2010. – 327 с. – Текст : непосредственный.

34. Демьянов, В. В. Пространственный анализ данных : монография / В. В. Демьянов, И. Ю. Ершов. – Москва : Академический проект, 2012. – 358 с. – ISBN 978-5-8291-1348-5. – Текст : непосредственный.
35. Дулин, С. К. О многоуровневой онтологии геоданных / С. К. Дулин, С. В. Духин, В. Г. Поповидченко // Системы и средства информатики. – 2007. – Т. 17, № 1. – С. 337–354. – Текст : непосредственный.
36. Дулин, С. К. О проблеме формирования геопространственных знаний в ГИС / С. К. Дулин, С. В. Духин, О. А. Терляков // Системы и средства информатики. – 2008. – Т. 18, № 1. – С. 186–208. – Текст : непосредственный.
37. Журкин, И. Г. Анализ структуры данных для представления в ГИС / И. Г. Журкин, А. Н. Никишин // Геодезия и картография. – 2003. – № 8. – С. 44–49. – Текст : непосредственный.
38. Завьялов, Ю. С. Методы сплайн-функций / Ю. С. Завьялов, Б. И. Квасов, В. Л. Мирошниченко. – Москва : Наука, 1980. – 352 с. – Текст : непосредственный.
39. Зализнюк, А. Н. Объектно-ориентированная геопространственная информация, достоинства и недостатки при её создании и применении / А. Н. Зализнюк, Ю. С. Александров, С. П. Присяжнюк, Д. В. Карманов, А. С. Присяжнюк // Информация и космос. – 2017. – № 2. – С. 102–106. – Текст : непосредственный.
40. Зализнюк, А. Н. Стратегическое планирование геоинформационного обеспечения систем управления / А. Н. Зализнюк, С. П. Присяжнюк // Информация и Космос. – 2016. – № 4. – С. 130–132. – Текст : непосредственный.
41. Иванов, С. А. Концепция построения цифрового двойника города / С. А. Иванов, К. Ю. Никольская, Г. И. Радченко, Л. Б. Соколинский, М. Л. Цымблер // Вестник ЮУрГУ. Вычислительная математика и информатика. – 2020. – Т. 9, № 4. – С. 5–23. – Текст : непосредственный.

42. Истомин, Е. П. Анализ пространственно-временной изменчивости течений в Керченском проливе / Е. П. Истомин, Я. А. Петров, И. А. Мартын, Е. С. Новожилова // Геоинформатика. – 2024. – № 3. – С. 30–36. – ISSN 1609-364X. – Текст : непосредственный.
43. Истомин, Е. П. Геомоделирование предельного усилия цуга волн при выходе на шельф / Е. П. Истомин, В. Л. Михеев, Я. А. Петров, И. А. Мартын // Информация и космос. – 2021. – № 3. – С. 78–85. – ISSN 2219-8576. – Текст : непосредственный.
44. Истомин, Е. П. Геопространственные аспекты управления развитием территории / Е. П. Истомин, М. А. Жарикова, Е. С. Новожилова, Я. А. Петров, А. Г. Соколов // Процессы в геосредах. – 2023. – № 2 (36). – С. 2006–2012. – ISSN 2542-1190. – Текст : непосредственный.
45. Истомин, Е. П. Геоинформационное управление развитием природно-технических систем : монография / Е. П. Истомин, В. Л. Михеев, Я. А. Петров, С. П. Присяжнюк, А. Г. Соколов. – Санкт-Петербург : Своё издательство, 2022. – 419 с. – ISBN 978-5-4386-2211-6. – Текст : непосредственный.
46. Истомин, Е. П. Методика определения батиметрии по данным изображений Landsat. Определение глубины зоны проникновения / Е. П. Истомин, Я. А. Петров, И. А. Мартын, И. Е. Истомин // Информация и космос. – 2024. – № 2. – С. 173–179. – ISSN 2219-8576. – Текст : непосредственный.
47. Истомин, Е. П. Методология геоинформационного управления развитием сложных систем / Е. П. Истомин, С. С. Аганов, О. Н. Колбина, Я. А. Петров, Н. В. Яготинцева. – Санкт-Петербург, 2023. – 227 с. – ISBN 978-5-4386-2353-3. – Текст : непосредственный.
48. Истомин, Е. П. Моделирование волновых процессов на замкнутых акваториях мелководных районов / Е. П. Истомин, В. Л. Михеев, Я. А. Петров, И. А. Мартын // Геоинформатика. – 2021. – № 3. – С. 30–35. – ISSN 1609-364X. – Текст : непосредственный.

49. Истомин, Е. П. Моделирование поля течений и уровня моря с применением программного комплекса CARDINAL / Е. П. Истомин, Я. А. Петров, И. А. Мартын // Геоинформатика. – 2023. – № 2. – С. 26–31. – ISSN 1609-364X. – Текст : непосредственный.
50. Истомин, Е. П. Оптимизационная задача определения грузового состава перевозок на ледовых трассах по оценке грузоподъёмности ледяного покрова / Е. П. Истомин, Я. А. Петров, И. А. Мартын // Геоинформатика. – 2025. – № 2. – С. 4–12. – ISSN 1609-364X. – Текст : непосредственный.
51. Истомин, Е. П. Оценка изменчивости климатических характеристик Карского моря для безопасного и эффективного использования Северного морского пути / Е. П. Истомин, Я. А. Петров, И. А. Мартын, Е. С. Новожилова // Геоинформатика. – 2024. – № 2. – С. 45–53. – ISSN 1609-364X. – Текст : непосредственный.
52. Истомин, Е. П. Построение оптимального логистического маршрута на морской акватории в условиях ледовой обстановки по данным беспилотных летательных аппаратов / Е. П. Истомин, И. А. Мартын, Я. А. Петров // Информация и космос. – 2025. – № 2. – С. 103–108. – ISSN 2219-8576. – Текст : непосредственный.
53. Истомин, Е. П. Расчёт распространения примеси с применением программного комплекса CARDINAL / Е. П. Истомин, Я. А. Петров, И. А. Мартын // Геоинформатика. – 2023. – № 2. – С. 32–35. – ISSN 1609-364X. – Текст : непосредственный.
54. Истомин, Е. П. Реализация мониторинга гидрометеорологической обстановки и структуры базы данных для обеспечения безопасности деятельности морских объектов с применением ГИС-технологий / Е. П. Истомин, Я. А. Петров, И. А. Мартын, С. С. Аганов, О. Н. Колбина // Информация и космос. – 2023. – № 2. – С. 95–99. – ISSN 2219-8576. – Текст : непосредственный.

55. Калинин, Н. А. Мезомасштабный анализ и сверхкраткосрочный прогноз погоды / Н. А. Калинин, А. Л. Ветров, А. А. Смирнова // Учёные записки Казанского университета. Серия Естественные науки. – 2009. – Т. 151, № 4. – С. 209–216. – Текст : непосредственный.
56. Калинин, Н. А. Совместное использование данных радиолокационных и станционных наблюдений для анализа облачных полей / Н. А. Калинин, А. А. Смирнова // Метеорология и гидрология. – 2002. – № 8. – С. 53–60. – Текст : непосредственный.
57. Калинин, Н. А. Численный анализ данных радиолокационных дистанционных измерений облачности / Н. А. Калинин, А. А. Смирнова // Метеорология и гидрология. – 2003. – № 7. – С. 31–39. – Текст : непосредственный.
58. Карпик, А. П. Геодезическая пространственная информационная система для обеспечения устойчивого развития территорий : диссертация на соискание учёной степени доктора технических наук : специальность 25.00.35 — Геоинформатика / Карпик Александр Петрович. – Новосибирск, 2004. – Текст : непосредственный.
59. Карпик, А. П. Управление территорией в геоинформационном дискурсе : монография / А. П. Карпик, А. Г. Осипов, П. П. Мурзинцев. – Новосибирск : СГГА, 2010. – 279 с. – Текст : непосредственный.
60. Кельберт, М. Я. Вероятность и статистика в примерах и задачах. Том 2: Марковские цепи как отправная точка теории случайных процессов и их приложения. Часть I / М. Я. Кельберт, Ю. И. Сухов. – Москва : МЦНМО, 2021. – 396 с. – Текст : непосредственный.
61. Книжников, Ю. Ф. Аэрокосмические методы географических исследований : учебник / Ю. Ф. Книжников, В. И. Кравцова, О. В. Тутубалина ; под редакцией Н. С. Касимова. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Академия, 2011. – 416 с. – ISBN 978-5-7695-8207-3. – Текст : непосредственный.

62. Книжников, Ю. Ф. Основы геоинформатики : учебное пособие / Ю. Ф. Книжников, В. И. Кравцова, О. В. Тутубалина ; под общей редакцией Ю. Ф. Книжникова. – Москва : Академия, 2004. – 352 с. – (Высшее профессиональное образование. Естественные науки). – ISBN 5-7695-1353-9. – Текст : непосредственный.
63. Колесников, А. А. Разработка методологии использования искусственного интеллекта в цифровой картографии : автореферат диссертации на соискание учёной степени доктора технических наук : специальность 1.6.20 — Геоинформатика, картография / Колесников Алексей Александрович ; Сибирский государственный университет геосистем и технологий. – Новосибирск, 2025. – 48 с. – Текст : непосредственный.
64. Координатно-временные преобразования в геодезии : учебное пособие. – Москва : Изд-во МИИГАиК, 2014. – 90 с. – Текст : непосредственный.
65. Кошкарев, А. В. Геоинформатика : толковый словарь основных терминов / А. В. Кошкарев, В. С. Тикунов. – Москва : Институт географии РАН, 2010. – 190 с. – ISBN 978-5-89658-040-5. – Текст : непосредственный.
66. Кошкарев, А. В. Геоинформационные системы и дистанционное зондирование в экологических исследованиях / А. В. Кошкарев, В. Ф. Кравченко. – Москва : ГЕОС, 2001. – 243 с. – ISBN 5-89118-083-1. – Текст : непосредственный.
67. Кошкарев, А. В. Понятия и термины геоинформатики и её окружения : справочное пособие / А. В. Кошкарев. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Институт географии РАН, 2015. – 227 с. – ISBN 978-5-89658-047-4. – Текст : непосредственный.
68. Кравченко, П. Н. Геоинформационные управляющие системы и технологии : монография / П. Н. Кравченко, Д. И. Якушев, С. И. Биденко. – Санкт-Петербург : Изд-во СПбУ МВД России, 2014. – 248 с. – Текст : непосредственный.

69. Кравцова, В. И. Дистанционное зондирование и ГИС-технологии в картографировании почв : монография / В. И. Кравцова. – Москва : Географический факультет МГУ, 2012. – 163 с. – ISBN 978-5-89575-221-0. – Текст : непосредственный.
70. Кравцова, В. И. Космические методы исследования почв : учебное пособие для вузов / В. И. Кравцова. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Аспект Пресс, 2010. – 240 с. – ISBN 978-5-7567-0451-8. – Текст : непосредственный.
71. Красавин, К. Г. Единое информационное поле технологического комплекса для исследований в области наук о Земле : диссертация на соискание учёной степени кандидата геолого-минералогических наук : специальность 25.00.35 — Геоинформатика / Красавин Константин Геннадьевич. – Москва, 2003. – 138 с. – Текст : непосредственный.
72. Кудж, С. А. Геоинформатика : монография / С. А. Кудж, В. Я. Цветков. – Москва : МАКС Пресс, 2019. – 223 с. – Текст : непосредственный.
73. Кулыгин, В. В. Совместное использование байесовских сетей и ГИС для оценки рисков штормовых нагонов в дельте р. Дон / В. В. Кулыгин // Вестник СГУГиТ. – 2018. – Т. 23, № 2. – С. 92–107. – Текст : непосредственный.
74. Курлов, А. В. Анализ требований к качеству пространственно-временных данных в задачах территориального планирования / А. В. Курлов, А. В. Матерухин // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъёмка. – 2022. – Т. 66, № 4. – С. 59–68. – Текст : непосредственный.
75. Лабутина, И. А. Практикум по курсу «Дешифрирование аэрокосмических снимков» : учебное пособие / И. А. Лабутина, Е. А. Балдина. – Москва : Географический факультет МГУ, 2013. – 175 с. – ISBN 978-5-89575-218-0. – 200 экз. – Текст : непосредственный.
76. Левин, Б. А. Геоинформатика транспорта / Б. А. Левин, В. М. Круглов, С. И. Матвеев, В. Я. Цветков, В. А. Коугия. – Москва : ВИНТИ РАН, 2006. – 336 с. – Текст : непосредственный.

77. Лисицкий, Д. В. Геоинформатика : учебное пособие / Д. В. Лисицкий ; Сибирский государственный университет геосистем и технологий (СГУГиТ). – Новосибирск : СГУГиТ, 2012. – 115 с. – ISBN 978-5-87693-573-1. – Текст : электронный // ЭБС Лань. – URL: <https://e.lanbook.com/book/157302> (дата обращения: 03.05.2026).
78. Лисицкий, Д. В. Геоинформатика : конспект лекций / Д. В. Лисицкий ; Сибирская государственная геодезическая академия (СГГА). – Новосибирск : СГГА, 2011. – Текст : электронный.
79. Лисицкий, Д. В. Трёхмерная компьютерная картография : монография / Д. В. Лисицкий, П. Ю. Бугаков, А. Т. Нгуен. – Новосибирск : СГУГиТ, 2016. – 178 с. – Текст : непосредственный.
80. Лурье, И. К. Геоинформационное картографирование. Методы геоинформатики и цифровой обработки космических снимков : учебник для вузов / И. К. Лурье. – 3-е изд. – Москва : КДУ, 2016. – 423 с. – ISBN 978-5-98227-706-0. – Текст : непосредственный.
81. Лурье, И. К. Теория и практика создания обучающих ГИС для географических исследований : диссертация на соискание учёной степени доктора географических наук : специальность 25.00.35 — Геоинформатика / Лурье Ирина Константиновна ; Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова ; научный консультант Книжников Ю. Ф. – Москва, 1998. – Текст : непосредственный.
82. Майоров, А. А. Развитие информатики в научном направлении геоинформатика / А. А. Майоров // Вестник МГТУ МИРЭА. – 2014. – № 1 (2). – С. 42–57. – Текст : непосредственный.
83. Майоров, А. А. Системный геоинформационный анализ / А. А. Майоров // Перспективы науки и образования. – 2014. – № 4 (10). – С. 38–43. – Текст : непосредственный.

84. Малинников, В. А. Геоинформационные системы : учебное пособие / В. А. Малинников, О. В. Данилова. – Москва : МИИГАиК, 2009. – 144 с. – Текст : непосредственный.
85. Малинников, В. А. Фотограмметрия : учебник для вузов / В. А. Малинников. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва : Картгеоцентр-Геодезиздат, 2008. – 362 с. – ISBN 978-5-86066-073-3. – Текст : непосредственный.
86. Мартын, К. А. Разработка методики детекции деревьев на основе YOLOv8 с использованием специализированной базы данных / К. А. Мартын, И. А. Мартын, Е. П. Истомин, Я. А. Петров // Геоинформатика. – 2026. – № 1. – С. 112–122. – ISSN 1609-364X. – Текст : непосредственный.
87. Матерухин, А. В. Имитационное моделирование потоков пространственно-временных данных для отладки алгоритмов диспетчеризации беспилотных воздушных судов / А. В. Матерухин, Я. Я. Месенгисер // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъёмка. – 2021. – Т. 65, № 6. – С. 692–699. – Текст : непосредственный.
88. Методы современной теории автоматического управления. Анализ и статистическая динамика систем автоматического управления / под редакцией Н. Д. Егупова. – Москва : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2000. – 748 с. – Текст : непосредственный.
89. Миляков, Д. Ф. Геоинформационный метод представления, отображения и оценки обстановки в ближней морской зоне : диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук : специальность 25.00.35 / Миляков Денис Фёдорович. – Санкт-Петербург, 2006. – 312 с. – Текст : непосредственный.
90. Миляков, Д. Ф. Метод учёта имплицитного окружения при проведении ситуационного анализа в ГИС / Д. Ф. Миляков // Гидрометеорология и экология. – 2024. – Вып. № 76. – С. 191–201. – Текст : непосредственный.

91. Миляков, Д. Ф. Определение слабовыраженных сущностных свойств геообъектов в процедурах территориального ГИС-анализа / Д. Ф. Миляков, С. М. Доценко, А. А. Бенгерт, Д. В. Звездарев, С. И. Биденко, Д. О. Куценко // Информация и космос. – 2024. – № 3. – С. 111–116. – Текст : непосредственный.
92. Негойце, К. Применение теории систем к проблемам управления / К. Негойце. – Москва : Мир, 1981. – 560 с. – Текст : непосредственный.
93. Прокофьев, П. А. Многоаспектная модель описания региона для решения задач планирования и оперативного управления / П. А. Прокофьев // Информация и Космос. – 2023. – № 4. – С. 121–126. – Текст : непосредственный.
94. 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. – Москва : ВИНТИ РАН, 2019. – 289 с. – Текст : непосредственный.
95. Розенберг, И. Н. Онтологический подход в геоинформатике / И. Н. Розенберг // Образовательные ресурсы и технологии. – 2016. – № 5 (17). – С. 86–95. – Текст : непосредственный.
96. Розенберг, И. Н. Основы геоинформационного моделирования : учебник в двух книгах. Кн. 1 / И. Н. Розенберг, С. Л. Беляков, А. В. Боженюк ; под редакцией И. Н. Розенберга. – Москва : Учеб.-метод. центр по образованию на ж.-д. транспорте, 2022. – 310 с. – Текст : непосредственный.
97. Савиных, В. П. Геоинформационное моделирование в космических исследованиях / В. П. Савиных // Прикладная геоинформатика. – 2017. – № 3 (20). – С. 109–117. – Текст : непосредственный.
98. Самсонов, Т. Е. Генерализация пространственных данных и её картографические приложения : диссертация на соискание учёной степени

доктора географических наук : специальность 1.6.20 — Геоинформатика, картография / Самсонов Тимофей Евгеньевич ; Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова. – Москва, 2025. – Текст : непосредственный.

99. Самсонов, Т. Е. Генерализация пространственных данных и её картографические приложения : автореферат диссертации на соискание учёной степени доктора географических наук : специальность 1.6.20 — Геоинформатика, картография / Самсонов Тимофей Евгеньевич ; Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Географический факультет, Кафедра картографии и геоинформатики. – Москва, 2025. – 50 с. – Библиогр.: с. 46–50. – 170 экз. – Текст : непосредственный.

100. Самойлов, Д. В. Методика создания цифровых двойников вооружения, военной и специальной техники и их обликотипические характеристики / Д. В. Самойлов, С. В. Хохлов // Вооружение и экономика. – 2024. – № 2 (68). – С. 76–81. – Текст : непосредственный.

101. Соболев, И. М. Sensitivity Estimates for Nonlinear Mathematical Models / И. М. Соболев // Mathematical Modeling & Computational Experiment. – 1993. – Vol. 1, no. 4. – P. 407–414. – ISSN 1061-7590. – Текст : непосредственный.

102. Татарникова, Т. М. Концептуальная модель анализа состояния территорий по данным дистанционного зондирования Земли / Т. М. Татарникова, С. Ю. Степанов, Я. А. Петров, А. Ю. Сидоренко, М. Р. Вагизов // Информация и космос. – 2020. – № 3. – С. 124–130. – ISSN 2219-8576. – Текст : непосредственный.

103. Татарникова, Т. М. Программный модуль для анализа состояния территорий по данным дистанционного зондирования Земли / Т. М. Татарникова, С. Ю. Степанов, Я. А. Петров, А. Ю. Сидоренко, М. Р. Вагизов // Информация и космос. – 2020. – № 4. – С. 107–114. – ISSN 2219-8576. – Текст : непосредственный.

104. Татарникова, Т. М. Разработка метода защиты геоинформационных систем и пространственных данных на основе нейронной сети / Т. М. Татарникова, С. Ю. Степанов, Я. А. Петров, А. Ю. Сидоренко // Программные продукты и системы. – 2020. – № 2. – С. 229–235. – ISSN 0236-235X. – Текст : непосредственный.
105. Тикунов, В. С. Картографическое отображение результатов исследования экспорта образования в России / В. С. Тикунов, В. С. Белозеров, В. О. Есикова [и др.] // Геодезия и картография. – 2023. – Т. 84, № 9. – С. 16–28. – Текст : непосредственный.
106. Тикунов, В. С. Классификации в географии: ренессанс или увядание? (Опыт формальных классификаций) / В. С. Тикунов, О. Ю. Чередниченко. – Москва ; Смоленск : Универсум, 2009. – 352 с. – ISBN 978-5-91404-008-9. – Текст : непосредственный.
107. Тикунов, В. С. Моделирование в геоинформатике: от объекта к системе / В. С. Тикунов // Известия Российской академии наук. Серия географическая. – 2012. – № 5. – С. 7–17. – Текст : непосредственный.
108. Тикунов, В. С. Моделирование в географии : учебное пособие / В. С. Тикунов ; Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Географический факультет. – Москва : Изд-во Московского университета, 2013. – 277 с. – ISBN 978-5-211-06542-8. – Текст : непосредственный.
109. Цветков, В. Я. Геоинформационные системы и технологии / В. Я. Цветков. – Москва : Финансы и статистика, 1998. – 288 с. – Текст : непосредственный.
110. Цветков, В. Я. Информационное пространственное моделирование : учебник / В. Я. Цветков, И. И. Лонский, С. В. Булгаков. – Москва : МАКС Пресс, 2022. – 245 с. – Текст : непосредственный.

111. Цветков, В. Я. Общая и прикладная геоинформатика : учебник / В. Я. Цветков, И. И. Лонский, С. В. Булгаков. – Москва : МАКС Пресс, 2021. – 197 с. – Текст : непосредственный.
112. Шумилов, Б. М. Нестационарные сплайн-вейвлеты в ГИС и САПР линейно-протяжённых пространственных объектов / Б. М. Шумилов, Э. А. Эшаров // Вестник ТГАСУ. – 2006. – № 1. – С. 153–163. – Текст : непосредственный.
113. Юсупова, Н. И. Модели, методы и инструменты при создании цифровых двойников / Н. И. Юсупова. – Москва : Уфимский государственный авиационный технический университет, 2022. – 123 с. – Текст : непосредственный.
114. Acar, U. A graph model of data and workflow provenance / U. Acar, P. Buneman, J. Cheney, J. Van den Bussche, N. Kwasnikowska, S. Vansummeren // Proceedings of the 2nd Conference on Theory and Practice of Provenance (TaPP'10). – Berkeley : USENIX Association, 2010. – 6 p. – Текст : непосредственный.
115. Aharon, N. BoT-SORT: Robust associations multi-pedestrian tracking / N. Aharon, R. Orfaig, B.-Z. Bobrovsky. – arXiv:2206.14651. – 2022. – URL: <https://arxiv.org/abs/2206.14651> (дата обращения: 03.05.2026). – Текст : электронный.
116. Åström, K. J. Adaptive Control / K. J. Åström, B. Wittenmark. – 2nd ed. – Mineola, NY : Dover Publications, 2008. – 574 p. – Текст : непосредственный.
117. Bar-Shalom, Y. Estimation with applications to tracking and navigation : theory, algorithms and software / Y. Bar-Shalom, X. R. Li, T. Kirubarajan. – New York : Wiley, 2001. – 584 p. – Текст : непосредственный.
118. Barron, F. H. Decision quality using ranked attribute weights / F. H. Barron, B. E. Barrett // Management Science. – 1996. – Vol. 42, no. 11. – P. 1515–1523. – ISSN 0025-1909. – DOI: 10.1287/mnsc.42.11.1515. – Текст : непосредственный.

119. Bewley, A. Simple online and realtime tracking / A. Bewley, Z. Ge, L. Ott, F. Ramos, B. Uprocft // 2016 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP). – Piscataway : IEEE, 2016. – P. 3464–3468. – DOI: 10.1109/ICIP.2016.7533003. – Текст : непосредственный.
120. Bivand, R. S. Applied spatial data analysis with R / R. S. Bivand, E. Pebesma, V. Gómez-Rubio. – 2nd ed. – New York : Springer, 2013. – 405 p. – DOI: 10.1007/978-1-4614-7618-4. – Текст : непосредственный.
121. Blackman, S. S. Design and analysis of modern tracking systems / S. S. Blackman, R. Popoli. – Boston : Artech House, 1999. – 1230 p. – (Artech House Radar Library). – ISBN 978-1-58053-006-4. – Текст : непосредственный.
122. Blackman, S. S. Multiple hypothesis tracking for multiple target tracking / S. S. Blackman // IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine. – 2004. – Vol. 19, no. 1. – P. 5–18. – ISSN 0885-8985. – DOI: 10.1109/MAES.2004.1263228. – Текст : непосредственный.
123. Blom, H. A. P. The interacting multiple model algorithm for systems with Markovian switching coefficients / H. A. P. Blom, Y. Bar-Shalom // IEEE Transactions on Automatic Control. – 1988. – Vol. 33, no. 8. – P. 780–783. – DOI: 10.1109/9.1299. – Текст : непосредственный.
124. Box, G. E. P. Statistics for experimenters: design, innovation, and discovery / G. E. P. Box, J. S. Hunter, W. G. Hunter. – 2nd ed. – Hoboken, NJ : Wiley-Interscience, 2005. – 633 p. – ISBN 978-0-471-71813-0. – Текст : непосредственный.
125. Buneman, P. Curated databases / P. Buneman, J. Cheney, W.-C. Tan, S. Vansummeren // Proceedings of the Twenty-Seventh ACM SIGMOD-SIGACT-SIGART Symposium on Principles of Database Systems (PODS 2008). – New York : ACM, 2008. – P. 1–12. – ISBN 978-1-60558-108-8. – DOI: 10.1145/1376916.1376918. – Текст : непосредственный.

126. Buneman, P. On the expressiveness of implicit provenance in query and update languages / P. Buneman, J. Cheney, S. Vansummeren // *ACM Transactions on Database Systems*. – 2008. – Vol. 33, no. 4. – P. 1–47. – ISSN 0362-5915. – DOI: 10.1145/1412331.1412334. – Текст : непосредственный.
127. Buneman, P. Provenance in databases / P. Buneman, J. Cheney // *Proceedings of the 2007 ACM SIGMOD International Conference on Management of Data*. – New York : ACM, 2007. – P. 1171–1173. – ISBN 978-1-59593-686-8. – DOI: 10.1145/1247480.1247626. – Текст : непосредственный.
128. Buneman, P. Why and where: a characterization of data provenance / P. Buneman, S. Khanna, W.-C. Tan // *Database Theory — ICDT 2001 : 8th International Conference, London, UK, January 4–6, 2001 : Proceedings* / ed. by J. Van den Bussche, V. Vianu. – Berlin : Springer, 2001. – P. 316–330. – (Lecture Notes in Computer Science ; vol. 1973). – ISBN 3-540-41456-8. – DOI: 10.1007/3-540-44543-9\_20. – Текст : непосредственный.
129. Cheney, J. Provenance in databases: why, how, and where / J. Cheney, L. Chiticariu, W.-C. Tan // *Foundations and Trends in Databases*. – 2009. – Vol. 1, no. 4. – P. 379–474. – ISSN 1931-7883. – DOI: 10.1561/1900000006. – Текст : непосредственный.
130. Colomina, I. GPS-controlled UAVs for metric photogrammetry / I. Colomina, J. Blázquez, P. Molina, M. Parés, M. Wis // *Proceedings of the 21st International Congress of the International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS)*. – Beijing, 2008. – Vol. 37, part B1. – P. 363–370. – Текст : непосредственный.
131. Colomina, I. Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: a review / I. Colomina, P. Molina // *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. – 2014. – Vol. 92. – P. 79–97. – ISSN 0924-2716. – DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2014.02.013. – Текст : непосредственный.

132. De Lange, N. Geoinformatics in theory and practice : an integrated approach to geoinformation systems, remote sensing and digital image processing / N. De Lange. – Berlin : Springer, 2023. – XVI, 519 p. – Текст : непосредственный.
133. Dendorfer, P. MOTChallenge: a benchmark for single-camera multi-target tracking / P. Dendorfer, A. Ošep, A. Milan, K. Schindler, D. Cremers, I. Reid, S. Roth, L. Leal-Taixé // International Journal of Computer Vision. – 2021. – Vol. 129. – P. 2894–2915. – DOI: 10.1007/s11263-021-01477-5. – Текст : непосредственный.
134. Edwards, W. SMARTS and SMARTER: improved simple methods for multiattribute utility measurement / W. Edwards, F. H. Barron // Organizational Behavior and Human Decision Processes. – 1994. – Vol. 60, no. 3. – P. 306–325. – ISSN 0749-5978. – DOI: 10.1006/obhd.1994.1087. – Текст : непосредственный.
135. Eisenbeiss, H. A mini unmanned aerial vehicle (UAV): system overview and image acquisition / H. Eisenbeiss, L. Zhang // International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. – 2006. – Vol. 36, no. 5. – P. 1–7. – Текст : непосредственный.
136. Eisenbeiss, H. Investigation of UAV systems for flight and navigation / H. Eisenbeiss, W. Stempfhuber, M. Kolb // Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation e.V. – 2009. – Vol. 18. – P. 217–226. – Текст : непосредственный.
137. Eisenbeiss, H. UAV photogrammetry / H. Eisenbeiss. – Zurich : ETH Zurich, Institute of Geodesy and Photogrammetry, 2009. – 203 p. – (Mitteilungen / Institut für Geodäsie und Photogrammetrie an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich ; 105). – ISBN 978-3-906467-86-3. – DOI: 10.3929/ethz-a-005939066. – Текст : электронный. – URL: <https://www.research-collection.ethz.ch/handle/20.500.11850/20976> (дата обращения: 03.05.2026).
138. Endsley, M. R. Toward a theory of situation awareness in dynamic systems / M. R. Endsley // Human Factors. – 1995. – Vol. 37, no. 1. – P. 32–64. – DOI: 10.1518/001872095779049543. – Текст : непосредственный.

139. Galton, A. Spatial and temporal knowledge representation / A. Galton // *Earth Science Informatics*. – 2009. – Vol. 2, no. 3. – P. 169–187. – DOI: 10.1007/s12145-009-0027-6. – Текст : непосредственный.
140. Galton, A. Taking dimension seriously in qualitative spatial reasoning / A. Galton // *European Conference on Artificial Intelligence (ECAI'96)*. – Budapest : John Wiley & Sons, 1996. – P. 157–161. – Текст : непосредственный.
141. Goodchild, M. F. Geographical information science / M. F. Goodchild // *International Journal of Geographical Information Systems*. – 1992. – Vol. 6, no. 1. – P. 31–45. – DOI: 10.1080/02693799208901893. – Текст : непосредственный.
142. Goodchild, M. F. Next-generation Digital Earth / M. F. Goodchild, H. Guo, A. Annoni, L. Bian, K. D. Bie, F. Campbell, M. Craglia, M. Ehlers, J. V. Genderen, D. Jackson [et al.] // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. – 2012. – Vol. 109, no. 28. – P. 11088–11094. – Текст : непосредственный.
143. Groth, P. The anatomy of a provenance system / P. Groth, L. Moreau, J. Cheney, S. Miles // *Computing in Science & Engineering*. – 2013. – Vol. 15, no. 3. – P. 10–18. – ISSN 1521-9615. – DOI: 10.1109/MCSE.2013.20. – Текст : непосредственный.
144. Hornsby, K. Modeling moving geospatial objects from an event-based perspective / K. S. Hornsby, S. Cole // *Transactions in GIS*. – 2007. – Vol. 11, no. 4. – P. 555–573. – ISSN 1361-1682. – DOI: 10.1111/j.1467-9671.2007.01060.x. – Текст : непосредственный.
145. Hornsby, K. Modeling moving objects over multiple granularities / K. Hornsby, M. J. Egenhofer // *Lecture Notes in Computer Science*. – 2002. – Vol. 2526. – P. 177–194. – ISSN 0302-9743. – DOI: 10.1007/3-540-36124-3\_12. – Текст : непосредственный.
146. IEEE 1588-2019. IEEE Standard for a precision clock synchronization protocol for networked measurement and control systems. – 2019. – 326 p. – Текст : непосредственный.

147. IEC 31010:2019. Risk management — risk assessment techniques. — Geneva : IEC, 2019. — Текст : непосредственный.
148. ISO 19101:2014. Geographic information — Reference model. — Geneva : ISO, 2014. — 52 p. — Текст : непосредственный.
149. ISO 19107:2003. Geographic information — Spatial schema. — Geneva : ISO, 2003. — 180 p. — Текст : непосредственный.
150. ISO 19109:2015. Geographic information — Rules for application schema. — 2nd ed. — Geneva : ISO, 2015. — 80 p. — Текст : непосредственный.
151. ISO 19111:2019. Geographic information — Referencing by coordinates. — 3rd ed. — Geneva : ISO, 2019. — 154 p. — Текст : непосредственный.
152. ISO 19115-1:2014. Geographic information — Metadata — Part 1: Fundamentals. — Geneva : ISO, 2014. — 168 p. — Текст : непосредственный.
153. ISO 19156:2023. Geographic information — Observations, measurements and samples. — 2nd ed. — Geneva : ISO, 2023. — 72 p. — Текст : непосредственный.
154. ISO 8601:2019. Date and time — representations for information interchange. — Geneva : ISO, 2019. — 38 p. — Текст : непосредственный.
155. Iz, S. A. Benchmarking the extraction of 3D geometry from UAV images with deep learning methods / S. A. Iz, F. Nex, N. Kerle, H. Meissner, R. Berger // International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. — 2023. — Vol. XLVIII-1/W3-2023. — P. 123–130. — DOI: 10.5194/isprs-archives-XLVIII-1-W3-2023-123-2023. — URL: <https://isprs-archives.copernicus.org/articles/XLVIII-1-W3-2023/123/2023/> (дата обращения: 03.05.2026). — Текст : электронный.
156. Jensen, C. S. The consensus glossary of temporal database concepts — February 1998 version / C. S. Jensen, C. E. Dyreson, M. H. Böhlen [et al.] // Temporal Databases: Research and Practice / O. Etzion, S. Jajodia, S. Sripada (eds.). — Berlin : Springer, 1998. — P. 367–405. — Текст : непосредственный.

157. Julier, S. J. A non-divergent estimation algorithm in the presence of unknown correlations / S. J. Julier, J. K. Uhlmann // Proceedings of the 1997 American Control Conference (ACC). – 1997. – Vol. 4. – P. 2369–2373. – Текст : непосредственный.
158. Julier, S. J. Unscented filtering and nonlinear estimation / S. J. Julier, J. K. Uhlmann // Proceedings of the IEEE. – 2004. – Vol. 92, no. 3. – P. 401–422. – DOI: 10.1109/JPROC.2003.823141. – Текст : непосредственный.
159. Kalman, R. E. A new approach to linear filtering and prediction problems / R. E. Kalman // ASME Journal of Basic Engineering. – 1960. – Vol. 82. – P. 35–45. – DOI: 10.1115/1.3662552. – Текст : непосредственный.
160. Koenig, N. Design and use paradigms for Gazebo, an open-source multi-robot simulator / N. Koenig, A. Howard // 2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). – Sendai : IEEE, 2004. – Vol. 3. – P. 2149–2154. – ISBN 0-7803-8463-6. – DOI: 10.1109/IROS.2004.1389727. – Текст : непосредственный.
161. Koenig, N. The Gazebo simulator: an open source multi-robot simulator / N. Koenig // Simulation, Modeling, and Programming for Autonomous Robots (SIMPAN 2008). – Venice : Springer, 2008. – P. 13–25. – (Lecture Notes in Computer Science ; vol. 5325). – ISBN 978-3-540-89075-1. – Текст : непосредственный.
162. Kuhn, H. W. The Hungarian method for the assignment problem / H. W. Kuhn // Naval Research Logistics Quarterly. – 1955. – Vol. 2, no. 1–2. – P. 83–97. – DOI: 10.1002/nav.3800020109. – Текст : непосредственный.
163. Lavretsky, E. Robust and adaptive control / E. Lavretsky, K. A. Wise. – 2nd ed. – Cham : Springer, 2024. – 710 p. – Текст : непосредственный.
164. Lin, T.-Y. Microsoft COCO: common objects in context / T.-Y. Lin, M. Maire, S. Belongie, J. Hays, P. Perona, D. Ramanan, P. Dollár, C. L. Zitnick // 13th European Conference on Computer Vision (ECCV 2014). – Berlin : Springer, 2014.

- Vol. 8693. – P. 740–755. – (Lecture Notes in Computer Science). – DOI: 10.1007/978-3-319-10602-1\_48. – Текст : непосредственный.
165. Longley, P. A. Geographic information science and systems / P. A. Longley, M. F. Goodchild, D. J. Maguire, D. W. Rhind. – 4th ed. – Hoboken : Wiley, 2015. – 477 p. – Текст : непосредственный.
166. Martyn, I. A. Interannual variability of El Niño / I. A. Martyn, Y. A. Petrov, S. Y. Stepanov, A. Y. Sidorenko // Springer Geology. – 2022. – Vol. 4. – P. 123–136. – ISSN 2197-9545. – Текст : непосредственный.
167. Mehra, R. K. Approaches to adaptive filtering / R. K. Mehra // IEEE Transactions on Automatic Control. – 1972. – Vol. 17, no. 5. – P. 693–698. – ISSN 0018-9286. – DOI: 10.1109/TAC.1972.1100100. – Текст : непосредственный.
168. Mehra, R. K. On the identification of variances and adaptive Kalman filtering / R. K. Mehra // IEEE Transactions on Automatic Control. – 1970. – Vol. 15, no. 2. – P. 175–184. – ISSN 0018-9286. – DOI: 10.1109/TAC.1970.1099422. – Текст : непосредственный.
169. Montgomery, D. C. Design and analysis of experiments / D. C. Montgomery. – 10th ed. – Hoboken, NJ : John Wiley & Sons, 2019. – 724 p. – Текст : непосредственный.
170. Moreau, L. The foundations for provenance on the web / L. Moreau // Foundations and Trends in Web Science. – 2010. – Vol. 2, no. 2–3. – P. 99–241. – ISSN 1555-0788. – DOI: 10.1561/18000000010. – ISBN 978-1-60198-386-2. – Текст : непосредственный.
171. Moreau, L. The Open Provenance Model: an overview / L. Moreau, J. Freire, J. Futrelle, R. E. McGrath, J. Myers, P. Paulson // Provenance and Annotation of Data and Processes : 2nd International Provenance and Annotation Workshop (IPAW 2008), Salt Lake City, UT, USA, June 17–18, 2008. – Berlin : Springer, 2008. – P. 323–326. – (Lecture Notes in Computer Science ; vol. 5272). – ISBN

978-3-540-89964-8. – DOI: 10.1007/978-3-540-89965-5\_31. – Текст : непосредственный.

172. Moreau, L. The Open Provenance Model (v1.01) / L. Moreau (ed.), B. Plale, S. Miles [et al.]. – Southampton : University of Southampton, 2008. – URL: <https://eprints.soton.ac.uk/266148/> (дата обращения: 03.05.2026). – Текст : электронный.

173. NATO STANAG 2511. Reporting intelligence (Admiralty Code). – Brussels : NATO, 2015. – 45 p. – Текст : непосредственный.

174. Nex, F. UAV for 3D mapping applications: a review / F. Nex, F. Remondino // Applied Geomatics. – 2014. – Vol. 6, no. 1. – P. 1–15. – ISSN 1866-9298. – DOI: 10.1007/s12518-013-0120-x. – Текст : непосредственный.

175. OGC API — Features — Part 1: Core : Implementation Standard : документ № 17-069r4 / Open Geospatial Consortium. – 2019. – URL: <https://docs.ogc.org/is/17-069r4/17-069r4.html> (дата обращения: 03.05.2026). – Текст : электронный.

176. OGC Catalogue Services 3.0 — General Model : Implementation Standard : документ № 12-168r6 / Open Geospatial Consortium. – 2016. – URL: <https://docs.ogc.org/is/12-168r6/12-168r6.html> (дата обращения: 03.05.2026). – Текст : электронный.

177. OGC Moving Features Encoding Extension — JSON : Implementation Standard : документ № 19-045r3 / Open Geospatial Consortium. – 2020. – URL: <https://docs.ogc.org/is/19-045r3/19-045r3.html> (дата обращения: 03.05.2026). – Текст : электронный.

178. OGC OWS Context GeoJSON Encoding Standard : Implementation Standard : документ № 14-055r2 / Open Geospatial Consortium. – 2015. – URL: <https://docs.ogc.org/is/14-055r2/14-055r2.html> (дата обращения: 03.05.2026). – Текст : электронный.

179. OGC SensorThings API Part 1: Sensing : Implementation Standard : документ № 18-088 / Open Geospatial Consortium. – 2019. – URL: <https://docs.ogc.org/is/18-088/18-088.html> (дата обращения: 03.05.2026). – Текст : электронный.
180. OGC Web Feature Service 2.0 Interface Standard — With Corrigendum : Implementation Standard : документ № 09-025r2 / Open Geospatial Consortium. – 2014. – URL: <https://docs.ogc.org/is/09-025r2/09-025r2.html> (дата обращения: 03.05.2026). – Текст : электронный.
181. OGC Well-known text representation of coordinate reference systems : Implementation Standard : документ № 18-010r7 / Open Geospatial Consortium. – 2019. – URL: <https://docs.ogc.org/is/18-010r7/18-010r7.html> (дата обращения: 03.05.2026). – Текст : электронный.
182. O'Sullivan, D. Spatial simulation: exploring pattern and process / D. O'Sullivan, G. L. W. Perry. – Hoboken : John Wiley & Sons, 2013. – 342 p. – Текст : непосредственный.
183. Peuquet, D. J. Representations of space and time / D. J. Peuquet. – New York : Guilford Press, 2002. – XII, 380 p. – ISBN 1-57230-773-0. – Текст : непосредственный.
184. Qualitative spatio-temporal representation and reasoning : trends and future directions / ed. by S. M. Hazarika. – Hershey : IGI Global, 2012. – 460 p. – ISBN 978-1-61692-868-1. – Текст : непосредственный.
185. Quigley, M. ROS: an open-source robot operating system / M. Quigley, K. Conley, B. Gerkey, J. Faust, T. Foote, J. Leibs, R. Wheeler, A. Ng // Proceedings of the ICRA Workshop on Open Source Software. – Kobe, 2009. – 6 p. – Текст : электронный.
186. Reid, D. B. An algorithm for tracking multiple targets / D. B. Reid // IEEE Transactions on Automatic Control. – 1979. – Vol. 24, no. 6. – P. 843–854. – ISSN 0018-9286. – DOI: 10.1109/TAC.1979.1102177. – Текст : непосредственный.

187. Remondino, F. UAV photogrammetry for mapping and 3D modeling — current status and future perspectives / F. Remondino, L. Barazzetti, F. Nex, M. Scaioni, D. Sarazzi // *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. – 2011. – Vol. 38, no. 1/C22. – P. 25–31. – Текст : непосредственный.
188. Remondino, F. UAV-based 3D mapping: experiences and issues / F. Remondino, F. Nex, L. Barazzetti // *GEOmedia*. – 2013. – Vol. 17, no. 3. – P. 12–15. – Текст : непосредственный.
189. RFC 7946. The GeoJSON format / H. Butler, M. Daly, A. Doyle, S. Gillies, S. Hagen, T. Schaub. – Internet Engineering Task Force, 2016. – 28 p. – (Proposed Standard). – URL: <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc7946.html> (дата обращения: 03.05.2026). – Текст : электронный.
190. Saaty, T. L. *The analytic hierarchy process* / T. L. Saaty. – New York : McGraw-Hill, 1980. – 287 p. – Текст : непосредственный.
191. Saltelli, A. *Global sensitivity analysis: the primer* / A. Saltelli, M. Ratto, T. Andres, F. Campolongo, J. Cariboni, D. Gatelli, M. Saisana, S. Tarantola. – Chichester : John Wiley & Sons, 2008. – 292 p. – ISBN 978-0-470-05997-5. – DOI: 10.1002/9780470725184. – Текст : непосредственный.
192. Saltelli, A. Making best use of model evaluations to compute sensitivity indices / A. Saltelli, P. Annoni, I. Azzini, F. Campolongo, M. Ratto, S. Tarantola // *Computer Physics Communications*. – 2010. – Vol. 181, no. 2. – P. 259–270. – ISSN 0010-4655. – DOI: 10.1016/j.cpc.2009.09.018. – Текст : непосредственный.
193. Shafer, G. *A mathematical theory of evidence* / G. Shafer. – Princeton : Princeton University Press, 1976. – 297 p. – Текст : непосредственный.
194. Sobol', I. M. Global sensitivity indices for nonlinear mathematical models and their Monte Carlo estimates / I. M. Sobol' // *Mathematics and Computers in Simulation*. – 2001. – Vol. 55, no. 1–3. – P. 271–280. – ISSN 0378-4754. – DOI: 10.1016/S0378-4754(00)00270-6. – Текст : непосредственный.

195. Snodgrass, R. T. Developing time-oriented database applications in SQL / R. T. Snodgrass. – San Francisco : Morgan Kaufmann, 2000. – 504 p. – Текст : непосредственный.
196. Sofia, H. Mobile mapping, machine learning and digital twin for road infrastructure monitoring and maintenance: case study of Mohammed VI Bridge in Morocco / H. Sofia, E. Anas, O. Faïz // 2020 IEEE International Conference of Moroccan Geomatics (Morgeo), Casablanca, Morocco. – 2020. – P. 1–6. – Текст : непосредственный.
197. Steinberg, A. N. Revisions to the JDL data fusion model / A. N. Steinberg, C. L. Bowman // Handbook of multisensor data fusion: theory and practice / ed. by M. E. Liggins, D. L. Hall, J. Llinas. – 2nd ed. – Boca Raton : CRC Press, 2008. – Ch. 3. – P. 45–67. – Текст : непосредственный.
198. Tang, L. A review of UAV-based remote sensing for environmental monitoring / L. Tang, G. Shao, Z. Wang, Y. Zhang // International Journal of Environmental Research and Public Health. – 2015. – Vol. 12, no. 8. – P. 9817–9848. – ISSN 1660-4601. – DOI: 10.3390/ijerph120809817. – Текст : непосредственный.
199. Tang, L. An integrated UAV-based remote sensing system for disaster response / L. Tang, Y. Zhang, Z. Wang, G. Shao // Proceedings of the 2014 IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). – IEEE, 2014. – P. 4178–4181. – ISBN 978-1-4799-5775-0. – DOI: 10.1109/IGARSS.2014.6947420. – Текст : непосредственный.
200. Tang, L. Drone-based remote sensing for precision agriculture: a review / L. Tang, D. Chen, Y. Zhang, G. Shao // Precision Agriculture. – 2016. – Vol. 17, no. 5. – P. 623–648. – ISSN 1385-2256. – DOI: 10.1007/s11119-016-9447-8. – Текст : непосредственный.
201. Tao, F. Digital twin in industry: state-of-the-art / F. Tao, H. Zhang, A. Liu, A. Y. C. Nee // IEEE Transactions on Industrial Informatics. – 2019. – Vol. 15, no. 4. – P. 2405–2415. – DOI: 10.1109/TII.2018.2873186. – Текст : непосредственный.

202. Van Blyenburgh, P. UAVs: an overview / P. Van Blyenburgh // Air & Space Europe. – 1999. – Vol. 1, no. 5. – P. 43–47. – ISSN 1290-0958. – DOI: 10.1016/S1290-0958(00)88882-5. – Текст : непосредственный.
203. Von Neumann, J. Theory of games and economic behavior / J. Von Neumann, O. Morgenstern. – Princeton, NJ : Princeton University Press, 1944. – 641 p. – Текст : непосредственный.
204. W3C. PROV-CONSTRAINTS: constraints of the PROV data model / J. Cheney, P. Missier, L. Moreau, T. Lebo. – W3C Recommendation. – 2013. – URL: <https://www.w3.org/TR/prov-constraints/> (дата обращения: 03.05.2026). – Текст : электронный.
205. W3C. PROV-DM: the PROV data model / K. Belhajjame, R. B'Far, J. Cheney, S. Coppens, S. Cresswell, Y. Gil, P. Groth, G. Klyne, T. Lebo, J. McCusker, S. Miles, J. Myers, S. Sahoo, C. Tilmes, L. Moreau (ed.), P. Missier (ed.). – W3C Recommendation. – 2013. – URL: <https://www.w3.org/TR/prov-dm/> (дата обращения: 03.05.2026). – Текст : электронный.
206. W3C. PROV implementation report / T. D. Huynh (ed.), P. Groth (ed.), S. Zednik (ed.). – W3C Working Group Note. – 2013. – URL: <https://www.w3.org/TR/prov-implementations/> (дата обращения: 03.05.2026). – Текст : электронный.
207. W3C. PROV-O: the PROV ontology / T. Lebo, S. Sahoo, D. McGuinness, K. Belhajjame, J. Cheney, D. Corsar, D. Garijo, S. Soiland-Reyes, L. Moreau (ed.), P. Groth (ed.). – W3C Recommendation. – 2013. – URL: <https://www.w3.org/TR/prov-o/> (дата обращения: 03.05.2026). – Текст : электронный.
208. W3C. PROV-OVERVIEW: an overview of the PROV family of documents / L. Moreau, P. Groth, J. Cheney. – W3C Working Group Note. – 2013. – URL: <https://www.w3.org/TR/prov-overview/> (дата обращения: 03.05.2026). – Текст : электронный.

209. Wojke, N. Simple online and realtime tracking with a deep association metric / N. Wojke, A. Bewley, D. Paulus // 2017 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP). – Piscataway : IEEE, 2017. – P. 3645–3649. – DOI: 10.1109/ICIP.2017.8296962. – Текст : непосредственный.
210. Worboys, M. F. GIS: a computing perspective / M. F. Worboys, M. Duckham. – 2nd ed. – Boca Raton : CRC Press, 2004. – 446 p. – ISBN 0-415-28375-2. – Текст : непосредственный.
211. Yi, J. A representation framework for studying spatiotemporal changes and interactions of dynamic geographic phenomena / J. Yi, Y. Du, F. Liang, C. Zhou, D. Wu, Y. Mo // International Journal of Geographical Information Science. – 2014. – Vol. 28, no. 5. – P. 1010–1027. – DOI: 10.1080/13658816.2014.886330. – Текст : непосредственный.
212. Yuan, M. GIS representation for visualizing and mining geographic dynamics : conference paper / M. Yuan, J. McIntosh. – 2003. – Текст : электронный.
213. Yuan, M. Use of a three-domain representation to enhance GIS support for complex spatiotemporal queries / M. Yuan // Transactions in GIS. – 1999. – Vol. 3, no. 2. – P. 137–159. – DOI: 10.1111/1467-9671.00012. – Текст : непосредственный.
214. Zhu, P. VisDrone-DET2019: the vision meets drone object detection in image challenge results / P. Zhu, L. Wen, D. Du, X. Bian, Q. Hu, H. Ling // 2019 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision Workshop (ICCVW). – 2019. – P. 213–222. – Текст : непосредственный.

## **ПРИЛОЖЕНИЕ А. Копии актов о внедрении результатов диссертационной работы**

В настоящем приложении приведены копии актов о внедрении результатов диссертационной работы. Состав и порядок размещения актов соответствуют изложению в разделе «Апробация результатов и публикации» введения.

Состав приложения:

А.1 — ООО «НеоБИТ», г. Санкт-Петербург, 21 мая 2026 г.

А.2 — ЗАО «Институт телекоммуникаций», г. Санкт-Петербург, 20 мая 2026 г., исх. № 02

А.3 — АО «Конструкторское бюро навигационных систем», Санкт-Петербургский филиал, 19 мая 2026 г.

А.4 — ФГБОУ ВО «Российский государственный гидрометеорологический университет», 25 мая 2026 г.

А.5 — ФГБОУ ВО «Российский государственный гидрометеорологический университет», 25 мая 2026 г.

А.6 — ФГБОУ ВО «Российский государственный гидрометеорологический университет», 25 мая 2026 г.

## А.1 Акт о внедрении результатов диссертационной работы в производственную деятельность ООО «НеоБИТ»



Общество с ограниченной ответственностью «НеоБИТ»  
195220, Санкт-Петербург, ул. Гжатская, д.21, лит. Г  
Тел./факс (812) 535-28-06  
[http:// www.neobit.ru](http://www.neobit.ru)  
email: info@neobit.ru  
ОКПО 80470582, ОГРН 1077847257641  
ИНН/КПП 7804360292/780401001

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор ООО «НеоБИТ»

В.Д. Басков

2026 г.



АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы

Петрова Ярослава Андреевича

на тему

**«Методология адаптивно-интегрированного тактического прогнозирования обстановки в задачах пространственно-временного анализа»**

представленной на соискание учёной степени доктора технических наук по специальности  
1.6.20 «Геоинформатика, картография»

Настоящим актом подтверждается, что результаты диссертационной работы **Петрова Ярослава Андреевича** использованы в ООО «НеоБИТ» при проектировании архитектуры распределённых геоинформационных решений и средств поддержки принятия решений, разрабатываемых организацией при проведении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ

**Объект внедрения** — архитектурное и информационное обеспечение распределённых геоинформационных решений организации в части иерархии пространственно-временных контуров обработки, прослеживаемости операций согласования и адаптационных воздействий, а также представления неопределённости в сервисах поддержки принятия решений.

**Из результатов диссертационной работы использованы:**

**1. Иерархия пространственно-временных контуров обработки с двойным количественным основанием** — по вычислительной нагрузке и пропускной способности канала связи — как элемент архитектуры распределённой геоинформационной системы. Использована при разделении функций обработки геопространственных данных между уровнями разрабатываемых решений, где состав операций каждого уровня обосновывается одновременно характеристиками вычислительных средств и характеристиками каналов передачи данных между уровнями.

**2. Сквозная прослеживаемость операций согласования и адаптационных воздействий** через распределённую обработку. Использована при проектировании средств журналирования и атрибуции данных в разрабатываемых решениях, где для каждого

результатирующего элемента геоинформационной модели восстанавливается цепочка преобразований и адаптационных воздействий, повлиявших на его текущее значение.

**3. Оценка корректности представления неопределённости в сервисах поддержки принятия решений** как компонент методики многофакторной оценки эффективности. Применена при тестировании пользовательских и интерфейсных компонент разрабатываемых геоинформационных решений на предмет того, что отображаемые лицу, принимающему решение, признаки достоверности и актуальности соответствуют атрибутам элементов исходной модели и не вводят пользователя в заблуждение.

**Характер использования.** Перечисленные результаты применены при проектировании архитектуры и информационного обеспечения разрабатываемых организацией геоинформационных решений. Иерархия контуров с двойным количественным основанием легла в основу обоснования разделения функций между уровнями обработки в проектной документации. Средства прослеживаемости операций реализованы в составе подсистем журналирования и сопровождения данных. Процедуры оценки корректности представления неопределённости включены в методические материалы по тестированию пользовательских интерфейсов разрабатываемых сервисов поддержки принятия решений.

**Эффект от внедрения.** Совместный учёт вычислительной нагрузки и пропускной способности канала связи при распределении функций между уровнями обработки убрал ситуации, в которых решение, оптимальное по одному основанию, оказывается неработоспособным по второму. Сквозная прослеживаемость операций согласования и адаптационных воздействий перевела сопровождение разрабатываемых решений с эпизодической ревизии состояния модели на восстанавливаемую по любому элементу историю преобразований. Контроль корректности представления неопределённости в сервисах поддержки принятия решений снял риск рассогласования между атрибутами достоверности в исходной модели и индикаторами, видимыми пользователю, до выхода продукта в опытную эксплуатацию.

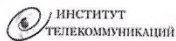
Технический директор, к.т.н.



Москвин Дмитрий Андреевич

## А.2 Акт о внедрении результатов диссертационной работы в производственную деятельность ЗАО «Институт телекоммуникаций»

Экз. № 1



Закрытое акционерное общество  
«Институт телекоммуникаций»  
(ЗАО «Институт  
телекоммуникаций»)  
Кантемировская ул., д.5, корп. 5,  
лит. М, Санкт-Петербург, 194100  
тел./факс (812) 740-77-07/, 740-77-08  
office@itain.ru, www.itain.ru  
ОКПО 59452298, ОГРН  
1027801538600  
ИНН/КПП 7802199182/780201001  
20.05.2026 № 02

на № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

УТВЕРЖДАЮ  
Заместитель генерального  
директора по науке  
заслуженный деятель науки РФ  
доктор технических наук,  
профессор



С. П. Присяжнюк

05 \_\_\_\_\_ 2026 г.

### АКТ

о внедрении результатов диссертационных исследований соискателя  
ученой степени доктора технических наук  
Петрова Ярослава Андреевича

Комиссия в составе: председателя – заместителя генерального директора по развитию ГИС Матальцкого А.В., членов комиссии: начальника НИО-2 Черкашина Д.А., научного секретаря Аванесова М.Ю. составила настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Петрова Ярослава Андреевича использованы в ЗАО «Институт телекоммуникаций» при производственной разработке программного и информационного обеспечения комплексных геоинформационных решений, а также при работах испытательной лаборатории организации по сертификации электронных карт и услуг в области картографии.

*Объект внедрения* – программное и информационное обеспечение комплексных геоинформационных решений в части межведомственного информационного обмена через инфраструктуру общего доступа и средств количественной оценки интероперабельности выпускаемой продукции с внешними геоинформационными системами.

Из результатов диссертационной работы использованы:

1. Посредническая схема межведомственного информационного обмена через геоинформационную инфраструктуру общего доступа как архитектурное решение распределённой геоинформационной системы со снижением числа поддерживаемых интерфейсов с  $N \times M$  до  $N + M$ . Решение применено при проектировании контура информационного обмена в составе комплексных геоинформационных продуктов организации.

2. Метрики интероперабельности с внешними геоинформационными системами из методики многофакторной оценки эффективности. Использованы испытательной лабораторией организации в качестве методического материала при оценке сопрягаемости электронных карт и иной выпускаемой геоинформационной продукции с внешними системами потребителей.

3. Метрики семантического сжатия как компонент методики многофакторной оценки эффективности. Применены при количественной оценке отношения объёма передаваемых геопространственных описаний к объёму содержательной нагрузки в каналах связи ограниченной пропускной способности при проектировании решений с мобильными источниками данных.

*Характер использования.* Перечисленные результаты применены в производственных процессах разработки и в деятельности испытательной лаборатории. Посредническая схема межведомственного обмена легла в основу архитектурного описания контура обмена в проектной документации на разрабатываемые геоинформационные продукты. Метрики интероперабельности и семантического сжатия включены в методические материалы лаборатории, используемые при проверке выпускаемой продукции на совместимость с внешними системами и при оценке решений для каналов ограниченной пропускной способности.

*Эффект от внедрения.* Переход от схемы прямого попарного сопряжения участников информационного обмена к посредничеству через общую геоинформационную инфраструктуру сократил число поддерживаемых интерфейсов с произведения числа потребителей и числа источников до их суммы. Применение единых метрик интероперабельности в работе испытательной лаборатории сделало результаты проверок выпускаемой продукции сопоставимыми между разными проектами. Метрики семантического сжатия дали инструмент количественной оценки решений для каналов связи с ограниченной пропускной способностью на этапе проектирования, до натуральных испытаний.

Председатель комиссии

Заместитель генерального  
директора по разработке ГИС

Члены комиссии:

Начальник НИО-2

Научный секретарь

А. В. Матальцкий

Д. А. Черкашин

М. Ю. Аванесов

### А.3 Акт о внедрении результатов диссертационной работы в Санкт-Петербургском филиале АО «Конструкторское бюро навигационных систем»

УТВЕРЖДАЮ

Директор Санкт-Петербургского филиала

АО «Конструкторское бюро навигационных систем»



*Д.Ф. Миляков*  
Д.Ф. Миляков  
мар 2026 г.

**АКТ**

о внедрении результатов диссертационной работы ПЕТРОВА Ярослава Андреевича на тему «Методология адаптивно-интегрированного тактического прогнозирования обстановки в задачах пространственно-временного анализа» представленной на соискание учёной степени доктора технических наук по специальности 1.6.20 «Геоинформатика, картография»

Комиссия в составе: председателя – руководителя группы математического обеспечения Санкт-Петербургского филиала АО «КБ НАВИС» к.т.н. В.Ю. Пучкова, членов – руководителя группы программирования аппаратных платформ к.т.н. А.А. Мониев, руководителя группы программного обеспечения Е.С. Черемисиной, составила настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Петрова Ярослава Андреевича, в части методических основ и информационного обеспечения геоинформационных решений для построения замкнутого контура обработки данных от прогноза обстановки до количественной оценки эффекта от адаптации моделей, использованы при подготовке материалов третьего этапа НИР «Развитие-ГЛОНАСС» (исп. АО «КБ «НАВИС»).

1. Геоинформационный метод адаптивно-интегрированного тактического прогнозирования обстановки (метод АИМТПО), реализующий замкнутый пространственно-временной контур «наблюдение — интеграция — прогнозирование — верификация — адаптация». Использован как методическая рекомендация построения системы адаптивного контроля качества навигационного поля ГЛОНАСС, где измерения ГНСС поступают на этап наблюдения, верифицируются на этапе прогнозирования, а результаты адаптации возвращаются в контур настройки источников сигнала для коррекции ошибок позиционирования.

2. Геоинформационная модель навигационного поля ГНСС ГЛОНАСС с прогнозными состояниями точности, целостности и доступности сигнала и эпистемологической маркировкой знания на основе шестикатегорийной таксономии достоверности и темпоральной модели актуальности. Применена как структура представления геопространственной информации в разрабатываемых продуктах контроля качества навигационного поля ГЛОНАСС, в которых прогнозируемые оценки погрешностей позиционирования сосуществуют с наблюдаемыми: непосредственно

измеренными псевдодальностями и фазами несущей, при сохранении явного различия их эпистемологического статуса [расчётное/измеренное] и явной атрибуции неопределённости каждого элемента модели — включая отдельные спутники, эфемеридно-временную информацию и ионосферные поправки.

Перечисленные результаты включены в научно-технический отчет как рекомендации.

Применение замкнутой схемы обработки результатов мониторинга ГЛОНАСС с возвратом верификации на этап адаптации ожидаемо сокращает распределение отклонений в цикле накоплений данных наблюдений до 15% на опорных станциях в высоких северных широтах.

Председатель комиссии:

Руководитель группы математического обеспечения  
Санкт-Петербургского филиала АО «КБ НАВИС»

к.т.н.

  
В.Ю. Пучков

Члены комиссии:

руководитель группы программирования аппаратных платформ

к.т.н.

  
А.А. Мониев

руководитель группы программного обеспечения,

  
Е.С. Черемисина

**А.4 Акт о внедрении результатов диссертационной работы в научно-исследовательскую работу ФГБОУ ВО «РГГМУ» по интеллектуальному управлению группами беспилотных авиационных систем**

И.о. проректора по развитию и научной работе

И.Г. Мясников  
«25» \_\_\_\_\_ 2026 г.



**АКТ**

о внедрении результатов диссертационной работы

Петрова Ярослава Андреевича

на тему

«Методология адаптивно-интегрированного тактического прогнозирования обстановки в задачах пространственно-временного анализа»

представленной на соискание учёной степени доктора технических наук по специальности 1.6.20 «Геоинформатика, картография»

Комиссия в составе:

— председатель комиссии: профессор кафедры информационных технологий и систем безопасности, д.т.н, Бурлов В.Г.;

— члены комиссии: доцент кафедры прикладной информатики, к.т.н., Мартын И.А.; доцент кафедры прикладной информатики, к.т.н., Сафонова Т.В.,

составила настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Петрова Ярослава Андреевича использованы при выполнении научно-исследовательской работы «Разработка технологии интеллектуального управления и ситуационного моделирования групповых действий БВС в условиях единого информационно-управляющего поля» (шифр LOT12-3-8761-2054).

**Объект внедрения** — программно-методический контур обработки геопространственных данных, поступающих от группы беспилотных

авиационных систем, для задач ситуационного моделирования групповых действий в едином информационно-управляющем поле.

**Из результатов диссертационной работы использованы:**

**1. Геоинформационный метод адаптивно-интегрированного тактического прогнозирования обстановки** (метод АИМТПО), реализующий замкнутый пространственно-временной контур «наблюдение — интеграция — прогнозирование — верификация — адаптация». Метод применён для согласования геопространственных данных, поступающих от мобильных источников группы БВС, с эталонной геоинформационной базой и для построения прогнозных состояний обстановки с последующей пространственно-временной верификацией.

**2. Геоинформационная модель обстановки** с прогнозными состояниями как равноправным элементом онтологии и с эпистемологической маркировкой знания на основе шестикатегорийной таксономии достоверности и темпоральной модели актуальности. Модель использована для представления текущих и прогнозируемых состояний единого информационно-управляющего поля с явной атрибуцией неопределённости каждого элемента геоинформационной модели.

**3. Архитектурные решения распределённой геоинформационной системы** ситуационного центра в части иерархии пространственно-временных контуров обработки с двойным количественным основанием — по вычислительной нагрузке и пропускной способности канала связи, двухэкземплярного развёртывания эталонной геоинформационной базы с автономным функционированием бортового контура при потере связи с наземным уровнем и контура непрерывного обучения с обратимостью адаптационных воздействий на каждом этапе развёртывания.

**Характер использования.** Перечисленные результаты применены при разработке методического обеспечения НИР и программных компонент контура обработки геопространственных данных. Метод АИМТПО использован как схема обработки данных от группы БВС с замыканием

контура на этап адаптации источников. Геоинформационная модель обстановки положена в основу представления текущих и прогнозируемых состояний информационно-управляющего поля. Архитектурные решения определили распределение функций обработки между бортовым и наземным уровнями, а также режимы автономной работы при деградации канала связи.

**Эффект от внедрения.** Замкнутый пространственно-временной контур дал согласованную обработку разнородных данных от мобильных источников с возвратом результатов верификации прогнозных состояний в контур адаптации. Включение прогнозных состояний в состав модели обстановки сделало возможной работу с прогнозируемыми элементами информационно-управляющего поля на тех же основаниях, что и с наблюдаемыми, при сохранении различия их эпистемологического статуса. Двухэкземплярное развёртывание эталонной геоинформационной базы и автономный бортовой контур сохраняют работоспособность системы обработки при потере связи бортового уровня с наземным.

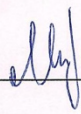
Председатель комиссии:

профессор кафедры информационных технологий и систем безопасности,

д.т.н.  Бурлов В.Г.

Члены комиссии:

доцент кафедры прикладной информатики, к.т.н.

 Мартын И.А.

доцент кафедры прикладной информатики, к.т.н.

 Сафонова Т.В.

## А.5 Акт о внедрении результатов диссертационной работы в научно-исследовательскую работу ФГБОУ ВО «РГГМУ» по бесшовному численному моделированию состояния атмосферы

УТВЕРЖДАЮ

И.о. проректора по развитию и научной работе

И.Г. Мясников



« 26 » 20 26 г.

### АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы

Петрова Ярослава Андреевича

на тему

«Методология адаптивно-интегрированного тактического прогнозирования обстановки в задачах пространственно-временного анализа»

представленной на соискание учёной степени доктора технических наук по специальности 1.6.20 «Геоинформатика, картография»

Комиссия в составе:

— председатель комиссии: профессор кафедры метеорологических прогнозов, д. ф.-м. н., профессор, Смышляев С.П.;

— члены комиссии: заведующий кафедрой инженерной гидрологии, к.т.н., доцент, Гайдукова Е. В.; доцент кафедры прикладной информатики, к.т.н., Колбина О.Н.,

составила настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Петрова Ярослава Андреевича использованы при выполнении научно-исследовательской работы «Бесшовное численное моделирование одновременного изменения климата, погоды, газового и аэрозольного состава атмосферы в глобальном и региональном масштабах и создание цифровой географической информационной системы обработки баз данных о составе и структуре атмосферы» (шифр FSZU-2023-0002).

**Объект внедрения** — методическое и информационное обеспечение цифровой географической информационной системы обработки баз данных о

составе и структуре атмосферы в части интеграции разнородных пространственно-временных данных и эпистемологической маркировки знания об атмосферных полях.

**Из результатов диссертационной работы использованы:**

**1. Методы интеграции разнородных пространственно-временных данных** как компонент геоинформационного метода АИМТПО. Используются для согласования данных, поступающих от наземной измерительной сети, спутниковых наблюдений за газовым и аэрозольным составом атмосферы и продуктов реанализа, при построении интегрированного пространственно-временного представления атмосферных полей в глобальном и региональном масштабах.

**2. Геоинформационная модель обстановки в части эпистемологической маркировки знания** — шестикатегорийная таксономия достоверности и темпоральная модель актуальности. Применены для атрибуции неопределённости каждого элемента геоинформационной модели атмосферных полей, что соответствует требованиям прослеживаемости источников данных при бесшовном численном моделировании одновременного изменения климата, погоды, газового и аэрозольного состава атмосферы.

**3. Метрики согласованности интеграции данных** из методики многофакторной оценки эффективности. Используются для количественной оценки согласованности интеграции данных от разнородных распределённых источников в рамках разработанной геоинформационной системы обработки баз данных о составе и структуре атмосферы.

**Характер использования.** Перечисленные результаты применены при разработке методического обеспечения этапов НИР, связанных с интеграцией разнородных данных и формированием геоинформационной системы обработки атмосферных баз. Методы интеграции легли в основу процедур согласования наблюдательных и модельных данных. Таксономия достоверности и темпоральная модель актуальности использованы для

маркировки элементов геоинформационной модели атмосферы по эпистемологическому статусу. Метрики согласованности интеграции применены при тестировании работоспособности системы обработки на реальных наборах данных.

**Эффект от внедрения.** Согласование данных от наземной сети, спутниковых наблюдений и реанализа на единой пространственно-временной основе сократило долю неустранимых противоречий между источниками при формировании интегрированного представления атмосферных полей. Эпистемологическая маркировка каждого элемента геоинформационной модели атмосферы по достоверности и актуальности сделала прозрачным происхождение значений для последующего численного моделирования. Метрики согласованности интеграции дали инструмент количественного контроля качества обработки данных по мере расширения состава источников.

Председатель комиссии:

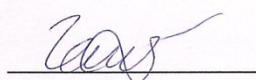
профессор кафедры метеорологических прогнозов, д. ф.-м. н., профессор



Смышляев С.П.

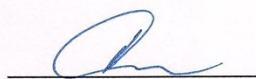
Члены комиссии:

заведующий кафедрой инженерной гидрологии, к.т.н., доцент



Гайдукова Е. В.

доцент кафедры прикладной информатики, к.т.н.



Колбина О.Н.

## А.6 Акт о внедрении результатов диссертационной работы в учебный процесс ФГБОУ ВО «РГГМУ»



УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе РГГМУ

И. О. Верещагина

25 мая 2026 г.

### АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы в учебный процесс

Петрова Ярослава Андреевича

на тему: «Методология адаптивно-интегрированного тактического прогнозирования обстановки в задачах пространственно-временного анализа»

представленной на соискание учёной степени доктора технических наук по специальности 1.6.20 «Геоинформатика, картография»

Комиссия в составе:

— председатель комиссии: заведующий кафедрой информационных технологий и систем безопасности, д.т.н., доцент, Лепешкин О.М.;

— члены комиссии: профессор кафедры информационных технологий и систем безопасности, д.т.н., Бурлов В.Г.; доцент кафедры информационных технологий и систем безопасности, к.в.н., Козлов Ю.В.,

составила настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Петрова Ярослава Андреевича использованы в учебном процессе Российского государственного гидрометеорологического университета (РГГМУ) при подготовке обучающихся по направлениям, связанным с геоинформатикой, гидрометеорологией и пространственно-временным анализом.

**Объект внедрения** — содержание учебных дисциплин и научно-исследовательской работы обучающихся по программам магистратуры и подготовки кадров высшей квалификации в части геоинформационных методов пространственно-временного анализа, прогнозирования и работы с неопределённостью геопространственных данных.

Из результатов диссертационной работы использованы:

**1. Методология адаптивно-интегрированного тактического прогнозирования обстановки** в задачах пространственно-временного анализа — как теоретическая основа отдельного раздела учебной дисциплины «Методология научно-исследовательской деятельности в геоинформационном управлении», читаемой студентам магистратуры и аспирантам. В составе раздела изучаются принципы методологии: замкнутость пространственно-временного контура обработки, эпистемологическая дифференциация состояний модели, прослеживаемость операций как условие адаптации, согласованность методологического, архитектурного и оценочного уровней, а также темповая адекватность обработки классам обстановок.

**2. Геоинформационный метод адаптивно-интегрированного тактического прогнозирования обстановки** (метод АИМТПО) — как материал лекционных и практических занятий по дисциплине «Геоинформационные технологии». Метод разбирается со студентами как замкнутый пространственно-временной контур «наблюдение — интеграция — прогнозирование — верификация — адаптация» с пошаговым разбором этапов и их взаимодействия.

**3. Геоинформационная модель обстановки и шестикатегорийная таксономия достоверности** — как материал раздела, посвящённого работе с неопределённостью геопространственных данных и представлению знания о динамической обстановке. Включены в перечень обязательных тем при подготовке выпускных квалификационных работ по геоинформационной тематике.

**Характер использования.** Перечисленные результаты включены в рабочие программы дисциплин кафедр прикладной информатики и информационных технологий и систем безопасности и в методические материалы, сопровождающие учебный процесс. Методология АИМТПО формирует теоретическую рамку раздела курса «Обработка и анализ геоданных». Метод АИМТПО разбирается на лекциях и практических

занятиях с последующим закреплением материала на семинарах. Модель обстановки и таксономия достоверности задают содержательную основу заданий по работе с разнородными источниками геоинформационных данных и используются научными руководителями при формулировании тем выпускных квалификационных работ магистрантов и квалификационных работ аспирантов.

**Эффект от внедрения.** Включение методологии и метода АИМТПО в программы магистратуры и аспирантуры расширило содержание дисциплины по пространственно-временному анализу за счёт целостной концепции замкнутого контура обработки, недостаточно представленной в стандартных учебных материалах по геоинформатике. Освоение шестикатегорийной таксономии достоверности и темпоральной модели актуальности упорядочило подход обучающихся к работе с разнородными по достоверности геопространственными данными. Материал методологии задал направление исследовательской тематики магистерских и аспирантских работ, ориентированной на разработку компонентов адаптивно-интегрированного прогнозирования применительно к гидрометеорологическим и геоинформационным задачам.

Председатель комиссии:

профессор кафедры информационных технологий и систем безопасности  
доктор технических наук, доцент \_\_\_\_\_ Лепешкин О.М.

Члены комиссии:

профессор кафедры информационных технологий и систем безопасности  
доктор технических наук \_\_\_\_\_ Бурлов В.Г.

доцент кафедры информационных технологий и систем безопасности  
кандидат военных наук \_\_\_\_\_ Козлов Ю.В.

## **ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Архитектурные схемы геоинформационной системы ситуационного центра**

Приложение содержит три архитектурные схемы, обосновывающие положение 3. На Рисунке Б.1 приведена целевая распределённая архитектура геоинформационной системы ситуационного центра. Рисунок Б.2 сопоставляет схемы прямого межведомственного обмена и обмена через ИССГР по числу поддерживаемых интерфейсов. Контур непрерывного обучения и механизм отката адаптационных воздействий по снимкам конфигурации представлены на Рисунке Б.3.

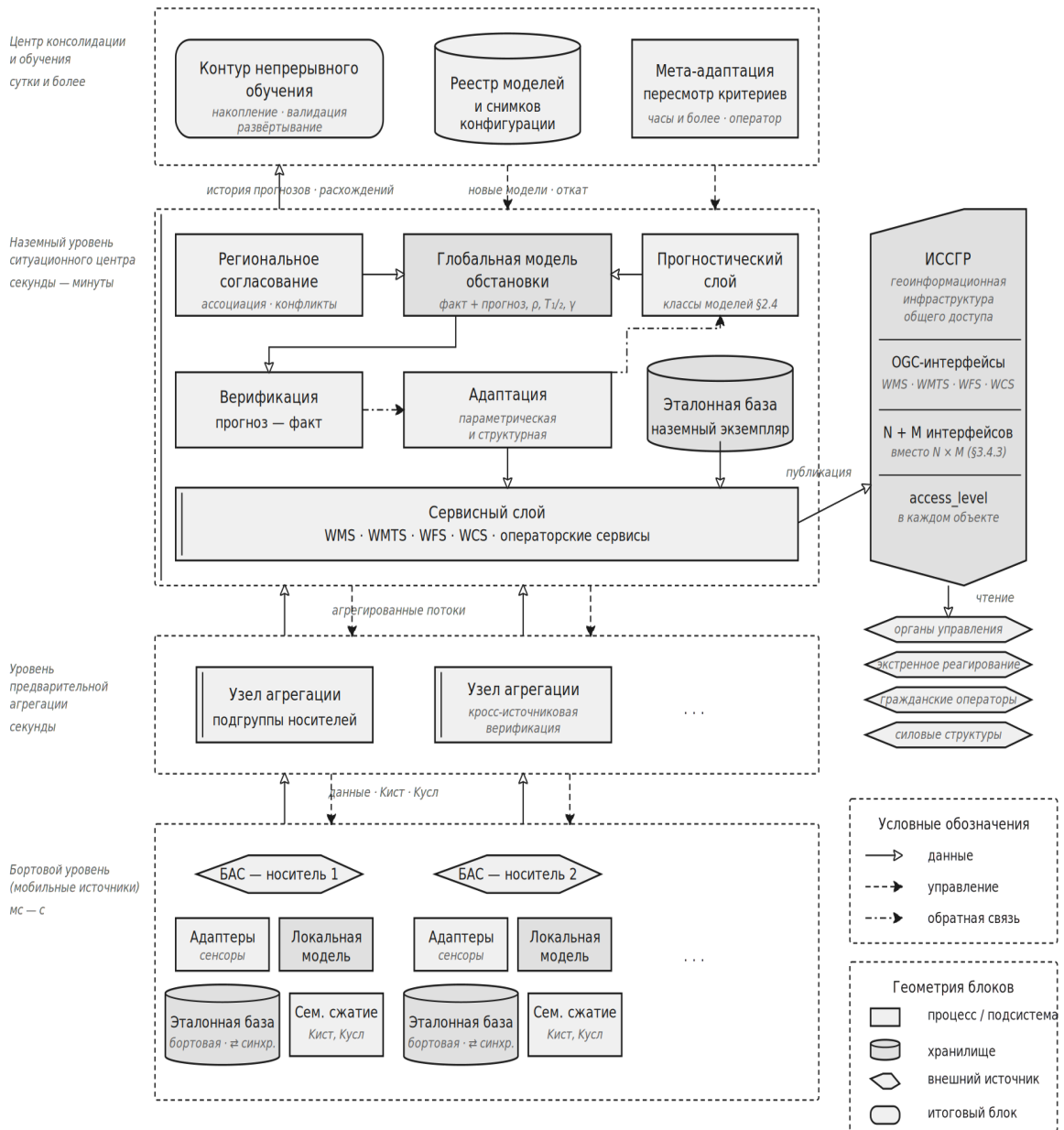


Рисунок Б.1 — Целевая распределённая архитектура геоинформационной системы ситуационного центра

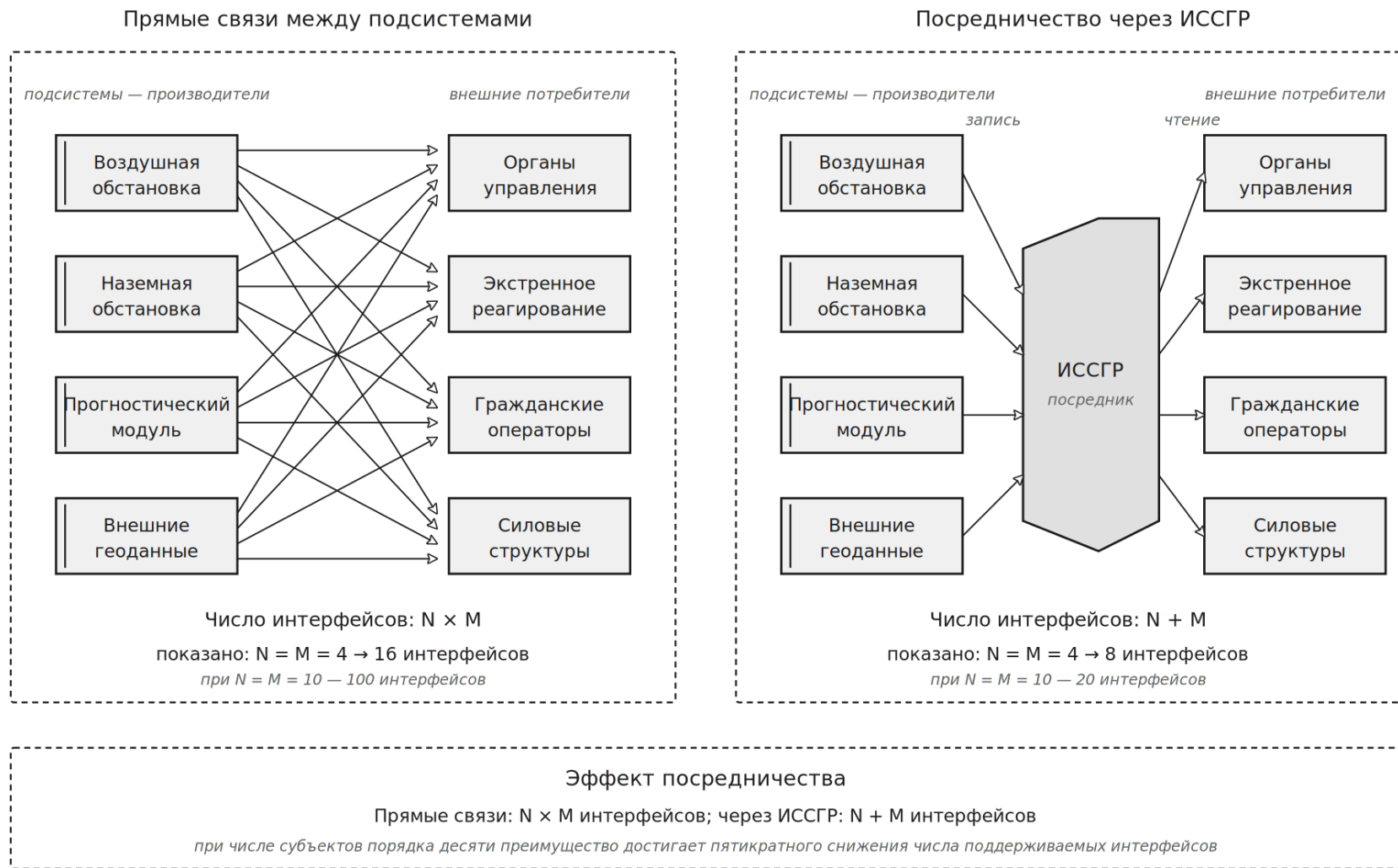


Рисунок Б.2 — Сравнение прямых связей и посредничества через ИССГР по числу интерфейсов



Рисунок Б.3 — Контур непрерывного обучения с обратимостью адаптационных воздействий