

ЗАО «ИНСТИТУТ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ»

На правах рукописи

УДК 528.92:004.942

ПЕТРОВ ЯРОСЛАВ АНДРЕЕВИЧ

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

Специальность 1.6.20 — Геоинформатика, картография

(технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени

доктора технических наук

Санкт-Петербург — 2026

Работа выполнена в ЗАО «Институт телекоммуникаций»

Научный консультант: **Истомин Евгений Петрович**, доктор технических наук, профессор, советник генерального директора ЗАО «Институт телекоммуникаций».

Официальные оппоненты: **Тезиков Александр Львович**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Гидрографии моря», ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова».

Якушев Денис Игоревич, доктор технических наук, профессор кафедры «Информационной безопасности», ФГКОУ ВО «Санкт-Петербургский университет Министерства внутренних дел Российской Федерации».

Моисеев Дмитрий Владимирович, доктор технических наук, доцент, декан факультета Информационных технологий, заведующий кафедрой «Информационные технологии и системы», ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»

Ведущая организация: Федеральное государственное унитарное предприятие «Научно-исследовательский институт «Квант».

Защита диссертации состоится «30» сентября 2026 г. в 15-00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.365.01 на базе ФГБОУ ВО «Российский государственный гидрометеорологический университет» по адресу: 195196, Россия, Санкт-Петербург, Малоохтинский проспект, д. 98, лит. А.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «РГГМУ» и на официальном сайте организации: <https://rshu.ru/university/dissertations/>

Автореферат разослан «___» _____ 20__ г

Учёный секретарь
диссертационного совета,
доктор военных наук, профессор



Е. А. Байков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования.

Задачи обеспечения ситуационной осведомлённости — формирования глобальной и локальной картины мира в условиях динамической обстановки и применительно к конкретной зоне интереса — решаются на базе распределённых геоинформационных систем и ситуационных центров межведомственного назначения. Состав наблюдаемых обстановок усложняется. Число источников геопространственных данных растёт; среди них — мобильные сенсорные платформы (беспилотные авиационные системы, наземные роботизированные носители, морские автономные аппараты), 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 разработаны для фиксации прошлых и текущих состояний; онтологического места для прогнозных состояний в них нет, неопределённость задаётся на уровне набора данных в целом. Методы прогнозирования пространственных процессов реализуются как внешние по отношению к ГИС функции: их результаты импортируются в систему для визуализации, но не возвращаются в её ядро для верификации и адаптации модели. Архитектуры распределённых геоинформационных систем фиксируют прослеживаемость 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. Интеграция аналитики с прогнозированием и верификацией в едином замкнутом контуре в действующих платформах не реализована.

Технологический контекст благоприятен для пересмотра методологии. Инфраструктуры пространственных данных, стандартизация интерфейсов через консорциум OGC (WFS, WMS, WMTS, WCS), формат GeoJSON как общая транспортная схема обмена пространственными объектами 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 и методологии, обеспечивающих замкнутое решение задач ситуационной осведомлённости в распределённой среде.

Степень разработанности темы.

Тема диссертации лежит на пересечении нескольких направлений геоинформатики. По каждому из них существует значительный научный 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 представлены подходами snapshot-моделирования, версионного представления, событийных моделей, пространственно-временного куба. Ограничения этих

моделей связаны с ориентацией на представление прошлого и настоящего, с отсутствием онтологического места для прогнозных состояний, с плоской семантикой достоверности.

Методы прогнозирования пространственных процессов разработаны как геостатистические (кригинг и его модификации, пространственная авторегрессия), физико-математические, машинного обучения, агентного моделирования, сценарного анализа. 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 эволюционировали от клиент-серверных решений к веб-сервисным реализациям, инфраструктурам пространственных данных, облачным платформам. Стандарты OGC задали интерфейсы межсистемного обмена. Существующие архитектуры недостаточно поддерживают распределённую обработку в реальном времени, фрагментарно реализуют прослеживаемость на уровне отдельных элементов, фиксируют распределение функций между уровнями без адаптации к переменному составу источников и переменному качеству каналов связи.

Методы интеграции разнородных пространственных данных накопили аппарат трансформаций систем координат, форматных преобразований, базовых процедур слияния. Вносимая каждой процедурой неопределённость отдельно не оценивается; стратегии разрешения конфликтов выбираются эвристически. Формальный аппарат согласования с учётом эпистемологического статуса данных и динамической калибровки надёжности источников в существующих подходах не разработан.

Системы поддержки принятия решений в ситуационных центрах развили сервисы визуализации и аналитического сопровождения; стандарты ISO 19157 определили категории качества пространственных данных. Сервисный слой

остаётся фрагментарным, интеграция аналитики с прогнозированием — недостаточной.

Между задачами оценки текущей обстановки, для которых геоинформатика располагает развитым аппаратом, и задачами адаптивного прогнозирования с прослеживаемой верификацией, для которых аппарата пока нет, лежит методологический разрыв. Разрыв охватывает четыре связанных уровня — модели данных, источники, методы прогнозирования, архитектурные решения; изолированно ни один из них не преодолевается.

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.

Термин «тактическое прогнозирование» используется в значении класса оперативных задач анализа быстро меняющейся пространственно-временной обстановки в реальном или близком к реальному масштабе времени — безотносительно к военно-тактическому контексту; область применимости охватывает как гражданские, так и специальные распределённые системы.

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.

Задачи исследования.

Достижение цели предполагает решение шести 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): 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 Заключение.

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 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 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 $\gamma \in \{0, 1, \dots, 11\}$ и онтологической схемой «объекты — состояния — события — процессы», отличающаяся 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 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, 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 формальным обоснованием весовых коэффициентов сочетанием трёх независимых методов — анализа иерархий (АНР), 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 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.

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.

Практическая значимость работы.

Практическая значимость работы состоит в следующем.

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.

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; теория моделирования динамических систем; теория адаптивного управления; теория информации; методология моделирования и прогнозирования пространственно-временных процессов. К методологической базе примыкают системный подход к анализу сложных распределённых систем и принципы эпистемологической дифференциации знания, вводимые для целей формальной маркировки достоверности.

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, дивергенция Бхаттачарьи, критерий согласия хи-квадрат и статистику нормализованных инноваций; методы байесовского оценивания, включая формулу слияния независимых наблюдений, информационный фильтр и ковариационное пересечение (Covariance Intersection); методы теории фильтрации — фильтр Калмана и его модификации, многомодельная фильтрация (ИММ), метод частиц (Particle Filter) — на концептуальном уровне формирования прогностических классов; методы экспертной оценки — метод анализа иерархий (АНР) и метод swing weighting; методы анализа чувствительности на основе индексов Соболя; методы имитационного моделирования для экспериментальной верификации архитектурных решений; методы геостатистического и сценарного анализа применительно к прогностическим компонентам метода.

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.

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.

Соответствие паспорту специальности 1.6.20.

Содержание диссертации соответствует профилю специальности 1.6.20 «Геоинформатика, картография» по семи пунктам паспорта: п. 1 (общие вопросы и теоретические концепции геоинформатики) и п. 2 (информационное моделирование географического пространства) — методологическим ядром и геоинформационной моделью обстановки; п. 6 (сбор, хранение и обработка пространственно-временных данных, геосенсорные сети) и п. 19 (большие данные, интеграция разнородных пространственно-временных данных) — бортовым контуром и формальным аппаратом интеграции; п. 7 (геоинформационные методы анализа и моделирования процессов и систем) — работой в целом; п. 11 (ГИС, их математическое, информационное и программное обеспечение) и п. 16 (организация данных и знаний на распределённых технологиях, геосервисы) — распределённой архитектурой геоинформационной системы и методикой многофакторной оценки эффективности. Детальное обоснование соответствия приведено в тексте диссертации.

Теоретическая значимость работы.

Теоретическая значимость работы состоит в следующем.

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.

Степень достоверности результатов и апробация работы.

Достоверность теоретических результатов обеспечивается опорой на устоявшийся формальный аппарат геоинформатики, теории фильтрации, теории информации и теории адаптивного управления; 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 верификацией архитектурных решений на имитационной среде в воспроизводимых 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. Эмпирическая достоверность поддерживается фиксацией границ обобщения: компонентная верификация выполнена на имитационной среде с тремя наземными платформами; полная верификация интегрального показателя эффективности на целевом сценарии относится к последующему этапу исследования и зафиксирована как таковая.

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 (Минск, 08–13 апреля 2024 г.) — 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» (Казань, 10–11 апреля 2024 г.) — 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» (Санкт-Петербург, 28 ноября 2025 г.) — доклад «Архитектурная модель АИМТПО-БИУС для задач тактического прогнозирования в многодоменной среде»; «Ситуационные центры: фокус кросс-отраслевых интересов — 2025» (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 (Санкт-Петербург, 27 апреля 2026 г.) — доклад «Применение геоинформационного моделирования для визуализации гидродинамических моделей».

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.

Публикации.

По теме диссертации опубликовано 105 научных работ. Основные научные результаты диссертации в полном объёме отражены в публикациях, в том числе в 17 статьях в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных Высшей

аттестационной комиссией при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации, и в 42 публикациях в изданиях, индексируемых международными базами данных Scopus и Web of Science. Получено 2 свидетельства о государственной регистрации программ для электронных вычислительных машин и баз данных. Теоретическую и методическую основу исследования составили монографии автора «Геоинформационное управление развитием природно-технических систем» (2022) и «Geospatial aspects of managing the development of complex systems» (2023), а также учебные пособия «Основы геоинформатики: практикум в QGIS» (2025) и «Информационные технологии и системы» (2020), отражающие развитие применяемого геоинформационного аппарата.

Количество и качество публикаций соответствуют требованиям пункта 13 Положения о присуждении учёных степеней, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени доктора технических наук.

Внедрение результатов.

Результаты диссертационного исследования внедрены по шести актам: в ООО «НеоБИТ» и ЗАО «Институт телекоммуникаций» (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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, дана характеристика степени её разработанности, сформулированы объект, предмет, цель и задачи исследования, изложены научная новизна и положения, выносимые на защиту, охарактеризована теоретическая и практическая значимость работы, представлены методология и методы исследования, степень достоверности и апробация результатов, сведения о публикациях, личном вкладе автора, структуре и объёме диссертации.

В главе 1 выявляются методологические ограничения геоинформатики применительно к задачам обеспечения ситуационной осведомлённости в условиях распределённых источников и динамической обстановки. Ограничения прослежены так, чтобы за ними проступил не перечень частных пробелов, а связанная система разрывов между требованиями к геоинформационному обеспечению и доступным сегодня аппаратом.

Исходную точку анализа задаёт формализация обстановки. Базовые понятия геоинформатики и функциональная архитектура геоинформационных систем рассматриваются под одним углом: способны ли они описывать обстановку, которая меняется и требует прогноза. Обстановка представлена как пространственно-временная структура

$$S(t) = \langle O(t), A(t), R(t), C \rangle, \quad (1)$$

где $O(t)$ — множество пространственных объектов в момент t ; $A(t)$ — их атрибуты; $R(t)$ — отношения между ними; C — контекстные условия среды. По характерному времени изменений, требованиям к обновлению и потребности в прогнозировании разграничены статическая, медленно изменяющаяся и динамическая обстановка; последняя и выводит за пределы возможностей действующего аппарата. Уже на этом уровне видно исходное ограничение: функциональная архитектура геоинформационных систем организована линейно, и обратная связь от результатов использования информации к моделям и процедурам обработки штатным элементом в ней не является (§ 1.1; таблица 1).

Таблица 1 — Ограничения традиционных ГИС для задач анализа динамических обстановок

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

То же ограничение лежит в основе моделей данных. Snapshot-модели, версионные и событийные представления, пространственно-временной куб

описывают прошлое и настоящее, но онтологического места для прогнозного состояния не предусматривают, а неопределённость приписывают набору данных целиком, а не отдельным его элементам. Прогноз, лишённый равноправного статуса в модели, остаётся внешним по отношению к ней объектом (§ 1.2, рисунок 1).

Распределённые источники делают этот дефицит острее. Беспилотные авиационные системы и иные мобильные сенсорные платформы меняют профиль распределённого мониторинга, однако согласование данных по времени и пространству в действующих системах выполняется без отдельной оценки неопределённости, вносимой каждым источником, а происхождение данных на уровне отдельных элементов при интеграции не сохраняется.

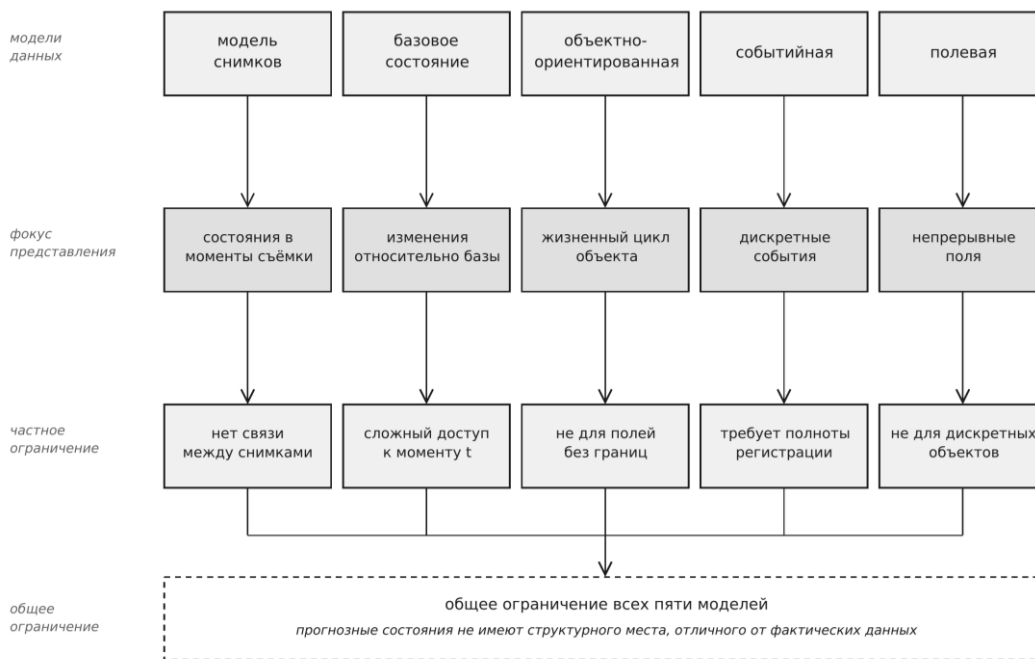


Рисунок 1 — Модели пространственно-временных данных и их ограничения

Теряется то, на чём впоследствии держится верификация, — прослеживаемость преобразований (рисунок 2).

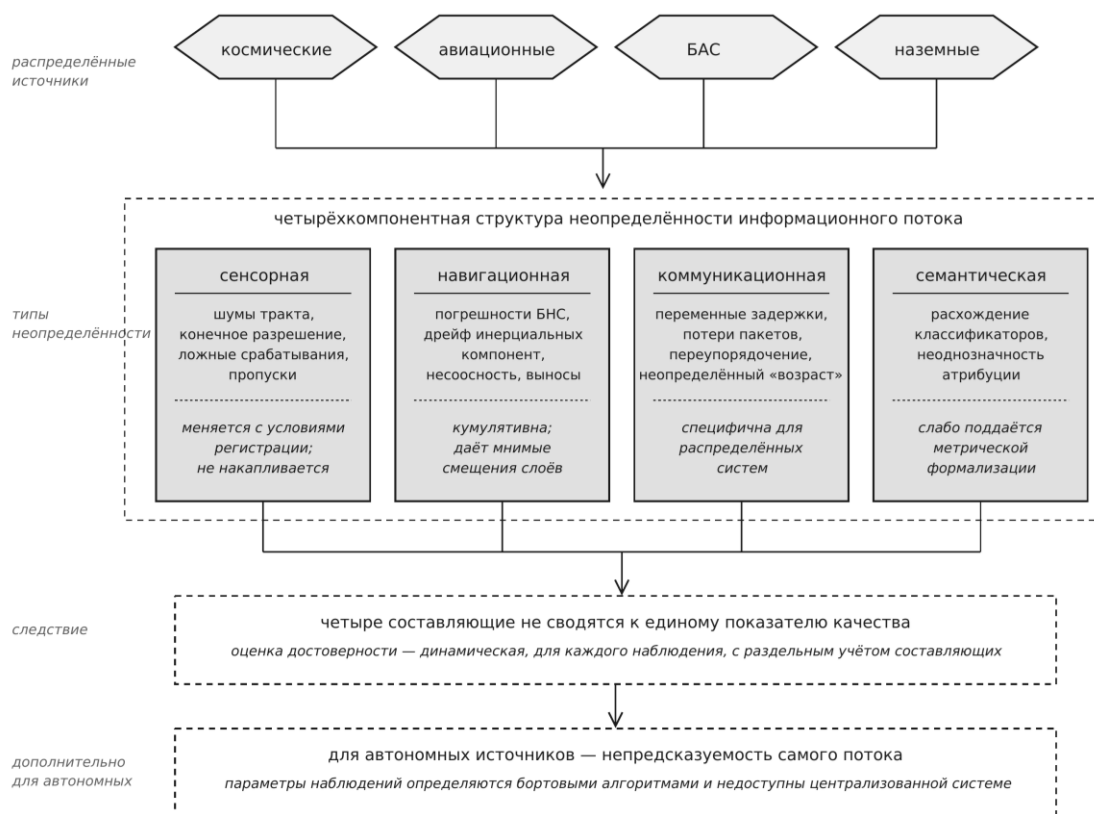


Рисунок 2 — Характеристики распределённых источников и порождаемые проблемы интеграции

Само прогнозирование — геостатистическое, физико-математическое, на основе машинного обучения, агентного моделирования и сценарного анализа — реализуется как внешняя функция: связь прогноза с породившей его моделью при передаче между системами теряется, а результат прогноза не возвращается в обработку как материал верификации и адаптации (§ 1.4). На уровне геоинформационных систем двойного назначения разрыв замыкается. Существующие решения распределяются по трём функциональным классам — управление мобильными источниками, комплексная обработка разведывательной и мониторинговой информации, коммерческие платформы геопространственной обработки. Каждый класс закрывает лишь часть задач; замкнутый контур «наблюдение — прогноз — верификация — адаптация» не реализован ни в одной из рассмотренных платформ (§ 1.5); укрупнённые требования к геоинформационному обеспечению ситуационных центров сведены в таблице 2.

Таблица 2 — Укрупнённые требования к геоинформационному обеспечению ситуационных центров

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

За этими наблюдениями стоит не набор частных пробелов, а один разрыв. Отсутствие места прогнозов в модели данных, потеря происхождения при интеграции, внешний характер прогностической схемы и разомкнутость архитектуры разделяют общую природу: между задачами оценки текущей обстановки и задачами адаптивного прогнозирования с прослеживаемой верификацией пролегает методологическая граница (рисунок 3). Уровни сцеплены. Без места прогнозов в модели данных прогностическое знание невозможно представить корректно; без прослеживаемости в интеграции верификация теряет диагностическую базу; без того и другого контур не замкнуть архитектурно. Поэтому устранение одного ограничения разрыва не снимает — нужен аппарат, работающий сразу на концептуальном, модельном и архитектурном уровнях. Это соответствие между выявленными ограничениями и разрабатываемыми решениями определяет направления исследования и обосновывает Положения 1 и 5.

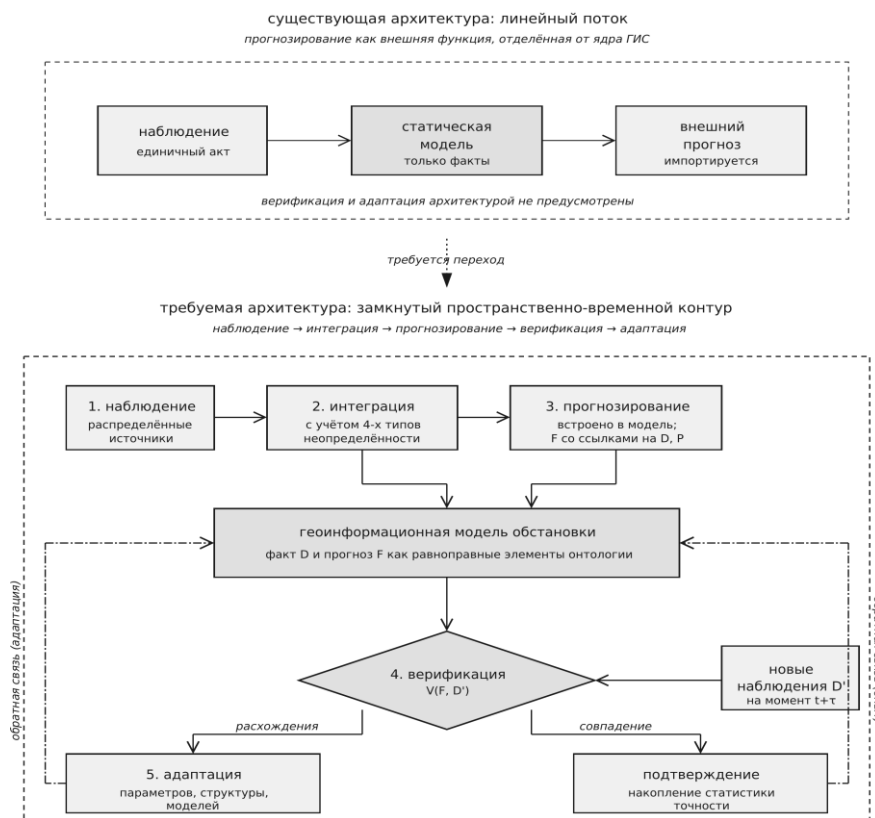


Рисунок 3 — Сравнение существующей и требуемой архитектур

Результаты Главы 1 обосновывают необходимость разработки методологии и метода АИМТПО и образуют исходное основание для построения замкнутого пространственно-временного контура (Положения 1, 5).

В главе 2 излагается методологическое ядро работы — пять связанных конструкций, которые превращают замкнутый контур из качественной идеи в работающий аппарат: принцип контура, модель обстановки, правила интеграции наблюдений, выбор прогностических моделей и механизмы адаптации. Каждая следующая конструкция опирается на предыдущую, а вместе они образуют цикл, возвращающий результат прогноза в обработку.

Отправной пункт методологии — принцип замкнутого пространственно-временного контура (§ 2.1). Контур задан не как метафора цикла, а как последовательность четырёх эксплицитных преобразований: формирование прогнозного состояния, регистрация факта, вычисление расхождения с учётом ковариационной структуры, адаптация модели. Состояние обстановки задано формулой (1); прогножное состояние формализовано в виде:

$$\hat{S}(t + \Delta t | t) = \langle \hat{O}(t + \Delta t | t), \hat{R}(t + \Delta t | t), \hat{U}(t + \Delta t | t) \rangle, \quad (2)$$

где $\hat{U}(t + \Delta t | t)$ — оценки неопределённости, ассоциированные с каждым элементом прогноза; индексация « $t + \Delta t | t$ » подчёркивает условный характер прогноза. Атрибуты объектов в записи (2) включены в свёрнутое описание \hat{O} наряду с объектами и потому отдельной компонентой не выделены. Расхождение между прогнозным и фактическим состоянием задаётся выражением:

$$D(t + \Delta t) = d(\hat{S}(t + \Delta t | t), S(t + \Delta t)), \quad (3)$$

где \hat{S} — прогнозное состояние; S — фактическое состояние; мера расхождения вычисляется в пространстве модели обстановки.

Это расхождение является диагностическим сигналом для адаптации. Эксплицитная формализация преобразований отличает контур от качественных описаний цикла «наблюдение — решение — действие».

Контур нужна модель, в которой прогноз имеет законное место. Такая геоинформационная модель динамической обстановки построена в § 2.2. Её онтологическая основа — четырёхэлементная схема «объекты — состояния — события — процессы», где прогнозное состояние — равноправный элемент наряду с наблюдаемым. Знание маркируется эпистемологически — шестикатегорийной таксономией достоверности: достоверные, вероятные, сомнительные, противоречивые, маловероятные и ложные сведения (таблица 3). Темпоральная актуальность формализована экспоненциальной моделью:

$$\rho(t) = \rho_0 \cdot \exp(-\lambda \cdot (t - t_{\text{last}})), \quad (4)$$

где ρ_0 — достоверность на момент последнего наблюдения t_{last} ; λ — коэффициент затухания, определяемый характером объекта и свойствами его динамики.

Характерный период убывания достоверности составляет $T_{1/2} = \ln 2 / \lambda$. Операторская шкала полноты $\gamma \in \{0, 1, \dots, 11\}$ агрегирует одиннадцать бинарных признаков описания объекта и сводится в четыре категории полноты, обеспечивая сопоставимость оценок между источниками; режимы темпоральной синхронизации систематизированы в таблице 4.

Таблица 3 — Категории достоверности элементов модели обстановки

Категория	Диапазон ρ	Допустимые действия
Достоверные	0,80–1,00	Автоматические решения, экспорт в эталонную базу, основа прогнозирования
Вероятные	0,63–0,79	Автоматические решения с флагом неопределённости
Сомнительные	0,37–0,62	Только мониторинг, запрет автоматических решений
Противоречивые	конфликт	Блокировка использования, генерация события «противоречие данных»
Маловероятные	0,20–0,36	Исключение из принятия решений, ослабленная визуализация
Ложные	0,01–0,19	Только архивное хранение для ретроспективного анализа

Темпоральная составляющая модели задаёт и режим обработки во времени: от синхронного сопровождения обстановки в реальном времени до ретроспективного анализа и имитационного моделирования.

Таблица 4 — 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

Наблюдения от разных источников нужно свести в одну модель, не теряя их разнородности. Формальный аппарат такой интеграции разработан в § 2.3. Первичное доверие к наблюдению задано произведением коэффициента надёжности источника и коэффициента условий наблюдения:

$$P_{\text{initial}} = K_{\text{ист}} \cdot K_{\text{усл}} \cdot P_{\text{обн}}, \quad (5)$$

где $K_{\text{ист}}$ — коэффициент надёжности источника; $K_{\text{усл}}$ — коэффициент условий наблюдения; $P_{\text{обн}}$ — вероятность корректного обнаружения объекта данным источником.

Слияние независимых наблюдений при известной независимости источников выполняется по информационной форме:

$$P_{\text{fused}}^{-1} = \sum_i P_i^{-1}, x_{\text{fused}} = P_{\text{fused}} \cdot \sum_i P_i^{-1} \cdot x_i, \quad (6)$$

где P_i — ковариационная матрица i -го наблюдения; x_i — вектор состояния по i -му наблюдению.

При неизвестной корреляции источников применяется схема ковариационного пересечения:

$$P_{CI}^{-1}(\omega) = \omega \cdot P_1^{-1} + (1 - \omega) \cdot P_2^{-1}, \omega \in [0; 1], \quad (7)$$

где ω — весовой коэффициент, балансирующий вклады источников при неизвестной их корреляции.

Конфликтность наблюдений диагностируется тремя формальными критериями: расстоянием Махаланобиса в пространственных координатах, дивергенцией Бхаттачарьи в пространстве классификационных гипотез и темпоральной несогласованностью.

$$d_M^2 = (x_1 - x_2)^T (P_1 + P_2)^{-1} (x_1 - x_2) > T_M, \quad (8)$$

где x_1, x_2 — векторы координат объекта по двум источникам; P_1, P_2 — их ковариационные матрицы; $T_M = 11,35$ — квантиль распределения χ^2 с тремя степенями свободы при доверительной вероятности 0,99.

Все три критерия используют общие ковариационные структуры, что обеспечивает согласованность с процедурами слияния. Прослеживаемость происхождения данных зафиксирована как условие атрибуции расхождений на этапе адаптации.

Прогноз порождается моделью движения, и выбор этой модели не должен быть произвольным. В § 2.4 он привязан к семантическому типу объекта в модели обстановки: каждому классу объектов сопоставлена прогностическая модель с обоснованием выбора. Критерий связывает онтологический слой модели обстановки с алгоритмическим слоем прогнозирования. Сценарный анализ формализован как множественность прогнозных состояний с явным накоплением неопределённости по горизонту прогнозирования.

Расхождение прогноза с фактом замыкает контур — оно становится сигналом к адаптации (§ 2.5). Диагностика расхождений опирается на статистику нормализованных инноваций

$$v_{\text{norm}} = (z - H \cdot x)^T \cdot S^{-1} \cdot (z - H \cdot x), \quad (9)$$

где z — вектор фактического наблюдения; x — прогнозное состояние; H — матрица наблюдения; S — ковариация инновации, объединяющая неопределённость прогноза и наблюдения. Используется тот же аппарат, что и в критериях конфликтов § 2.3. Адаптация структурирована по четырём уровням — параметрическому, структурному, модельному и мета-уровню (таблица 5). Устойчивость адаптивного процесса формализована рекуррентным соотношением накопления достоверности:

$$D_{i+1} = D_i + (1 - D_i) \cdot d_{i+1}, \quad (10)$$

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

Для этого соотношения доказаны монотонная сходимость при согласованных наблюдениях и ограниченность сверху единицей. Соотношение переводит требование устойчивости из эвристики в формальный критерий.

Таблица 5 — Уровни адаптации геоинформационных моделей

Уровень	Содержание модификации	Условие инициации	Масштаб
Параметрический	Корректировка коэффициентов модели	Систематическое смещение при сохранении формы	Секунды
Структурный	Переключение моделей одного класса	Зависимость расхождения от режима	Десятки секунд
Модельный	Замена класса прогностической модели	Отклонение статистики инноваций	Минуты
Мета	Пересмотр весов, порогов, критериев адаптации	Свидетельства неоптимальности процедур	Стратегический

В § 2.6 пять компонентов сходятся в цикл: принцип замкнутого контура реализуется через структуру модели обстановки; наблюдения интегрируются по сформулированным правилам; прогнозные состояния порождаются выбранными по критерию моделями; расхождения обрабатываются механизмами адаптации и возвращают цикл к исходным принципам. Методология при этом работает на двух уровнях. Пять принципов инвариантны

при смене алгоритмической или технологической реализации; формальные конструкции, реализующие принципы, уточняются под требования прикладного контура. Это разделение позволяет переносить методологию между приложениями, не переписывая её основания.

Результаты Главы 2 обосновывают Положения 1 и 2, а также методологическое ядро Положения 5.

В главе 3 раскрывается архитектурная развёртка метода АИМТПО (рисунок 4). Архитектура построена так, чтобы методологические свойства метода — замкнутость контура, прослеживаемость операций, устойчивость адаптивного процесса — сохранялись при распределённой обработке: от регистрации сенсором на бортовом уровне до долгосрочного обучения моделей в центре консолидации.

В § 3.1 обоснована четырёхуровневая иерархия пространственно-временных контуров обработки: бортовой уровень, уровень предварительной агрегации, наземный уровень, центр консолидации и обучения. Иерархия опирается на двойное количественное обоснование. Вычислительный фактор: попарное сопоставление наблюдений при отождествлении объектов в перекрывающихся зонах даёт квадратичный рост требований по числу источников; перенос предварительного отождествления на промежуточный уровень переводит часть нагрузки в локальные операции. Пропускной фактор: при числе мобильных источников порядка ста суммарный поток после семантического сжатия приближается к гигабиту в секунду на одном наземном узле, что превышает разумные пределы централизованной обработки.

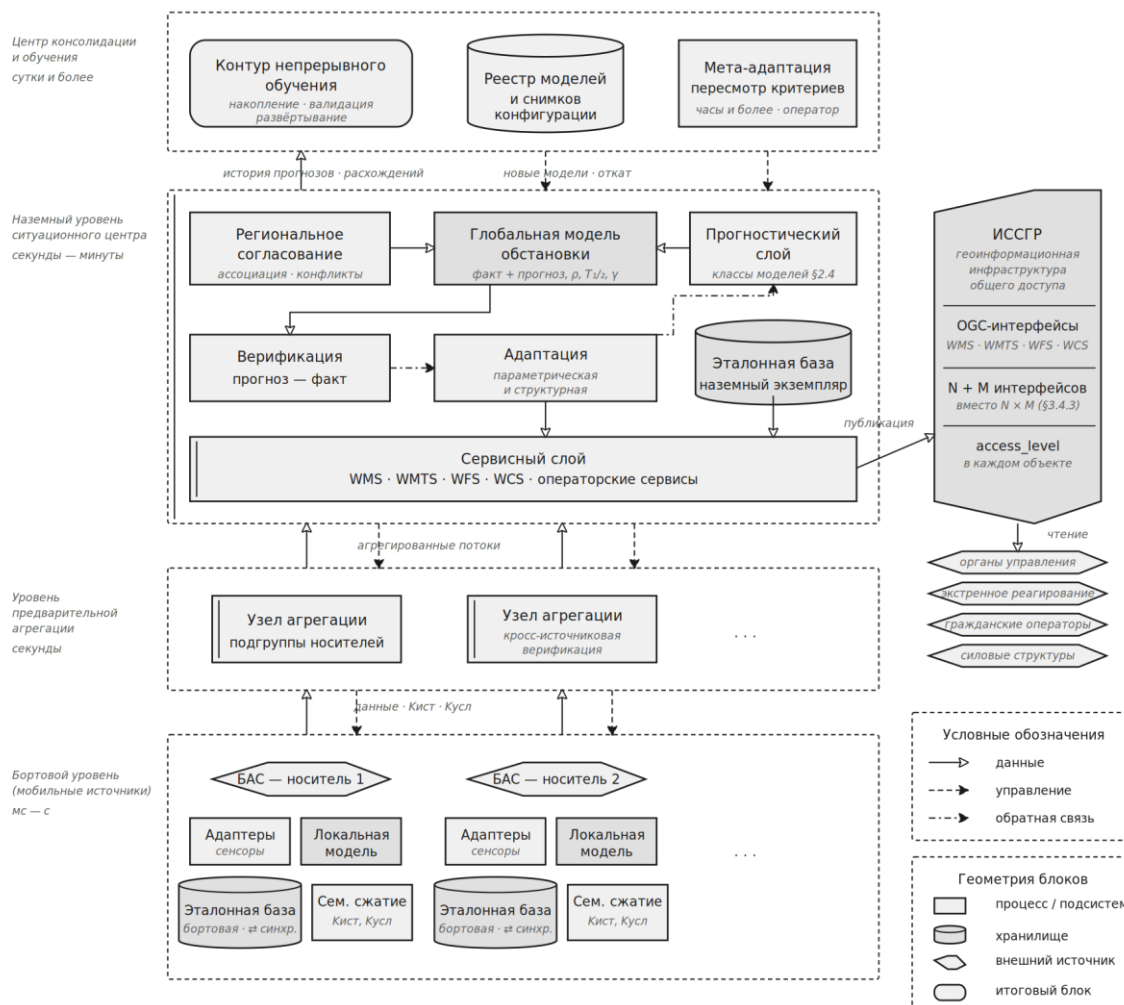


Рисунок 4 — Целевая распределённая архитектура СЦ

Иерархия снимает оба ограничения одновременно. Допустимая задержка обработки нарастает по уровням: миллисекунды на бортовом, секунды на уровне агрегации, секунды-минуты на наземном уровне, часы и сутки в центре. Адаптерная организация подсистемы приёма локализует гетерогенность источников в наборе адаптеров; ядро системы оперирует данными в едином внутреннем представлении на основе WGS-84 и UTC.

Нижний уровень иерархии — бортовой контур подготовки данных (§ 3.2). Три операции, выделенные критерием необратимости, размещены на стороне источника, где исходная информация ещё доступна: семантическое сжатие первичного сенсорного потока, оценка доверия источника по фактическим характеристикам наблюдения, приведение исходящих сообщений к единой геодезической системе и шкале времени. При потере связи с наземным уровнем

носитель сохраняет регистрацию и предобработку, накапливает результаты в буфере и выполняет ранее назначенную задачу автономно.

Именно на наземном уровне замыкается полный контур (§ 3.3). Здесь метод АИМТПО работает на масштабе всей зоны ответственности ситуационного центра: региональное согласование данных, агрегация в общую картину обстановки, аналитический и прогностический слои, формирование интегральных оценок доверия и сопоставление с эталонной картографической основой (рисунок 5).

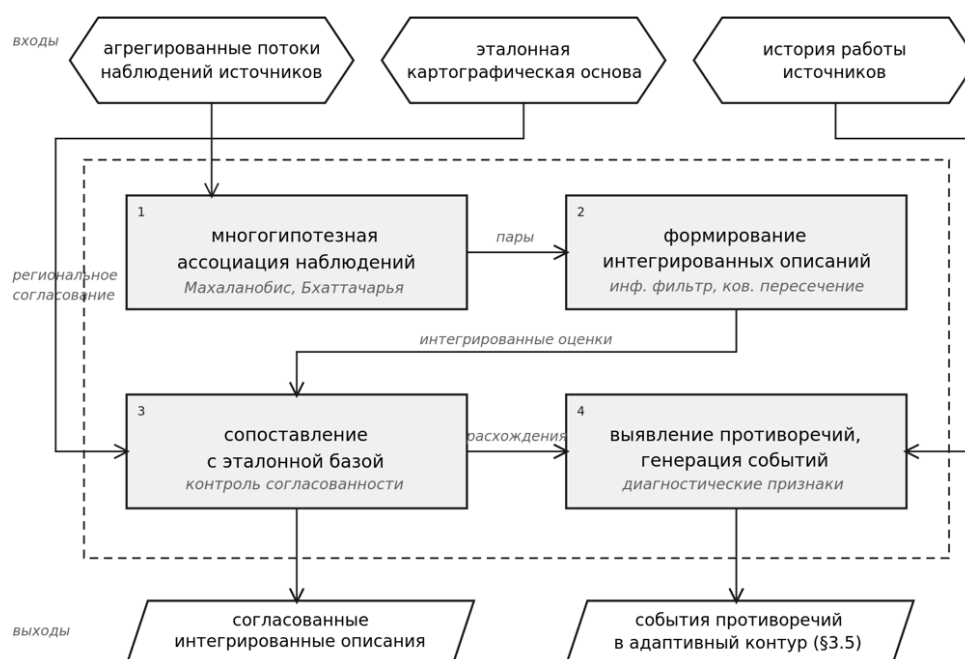


Рисунок 5 — Функциональная организация регионального согласования

Глобальная картина обстановки на наземном уровне и локальная картина на бортовом образуют двухуровневую организацию модели (рисунок 6). Частичная потеря связи с источниками преобразуется в повышение неопределённости интегрированных оценок без прекращения работы контура.

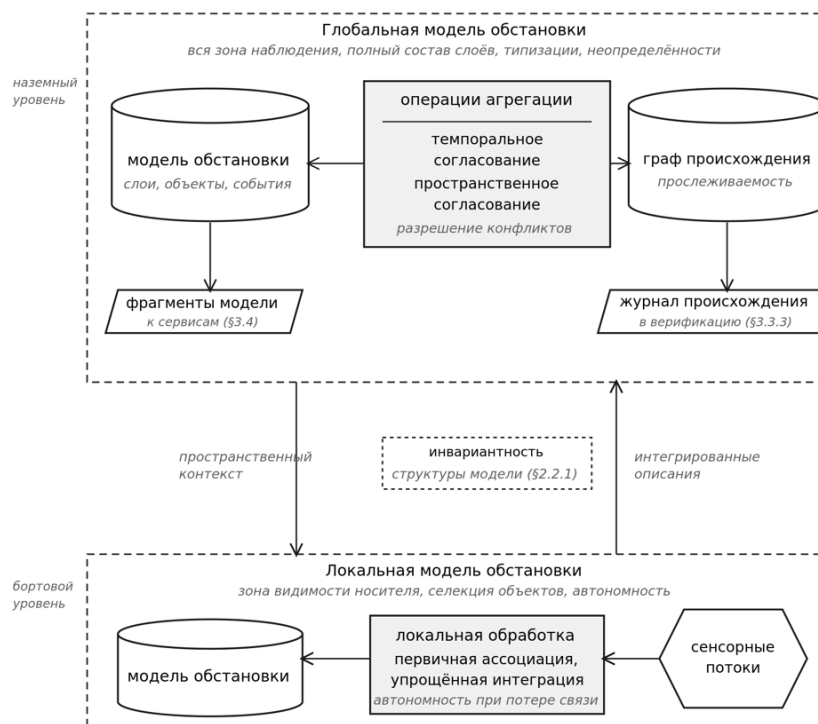


Рисунок 6 — Двухуровневая организация модели обстановки

Выход данных наружу и обмен между ведомствами обеспечивает сервисный слой (§ 3.4). Эталонная геоинформационная база развёрнута в двух экземплярах — наземном и бортовом, что обеспечивает автономную работу бортового контура при потере связи с наземным уровнем. Межведомственный обмен организован через интегрированную сетевую систему геопространственных ресурсов (ИССГР) — геоинформационную инфраструктуру общего доступа со стандартизированными OGC-интерфейсами и форматом GeoJSON. При прямых двусторонних связях между N подсистемами-производителями и M потребителями каждая пара требует собственного интерфейса с согласованным форматом, протоколом и политикой доступа; общее число интерфейсов составляет $N \times M$. При посредничестве ИССГР каждая подсистема поддерживает один интерфейс с инфраструктурой; общее число интерфейсов составляет $N + M$. При числе субъектов порядка десяти разница — 100 интерфейсов против 20, преимущество посредничества становится решающим (рисунок 7). Двухуровневое разграничение доступа — фильтр по профилю потребителя на стороне центра и стандартные механизмы авторизации на стороне инфраструктуры — исключает ситуацию, при которой

ошибка авторизации на стороне инфраструктуры открывает данные, формирование которых было ограничено на стороне центра

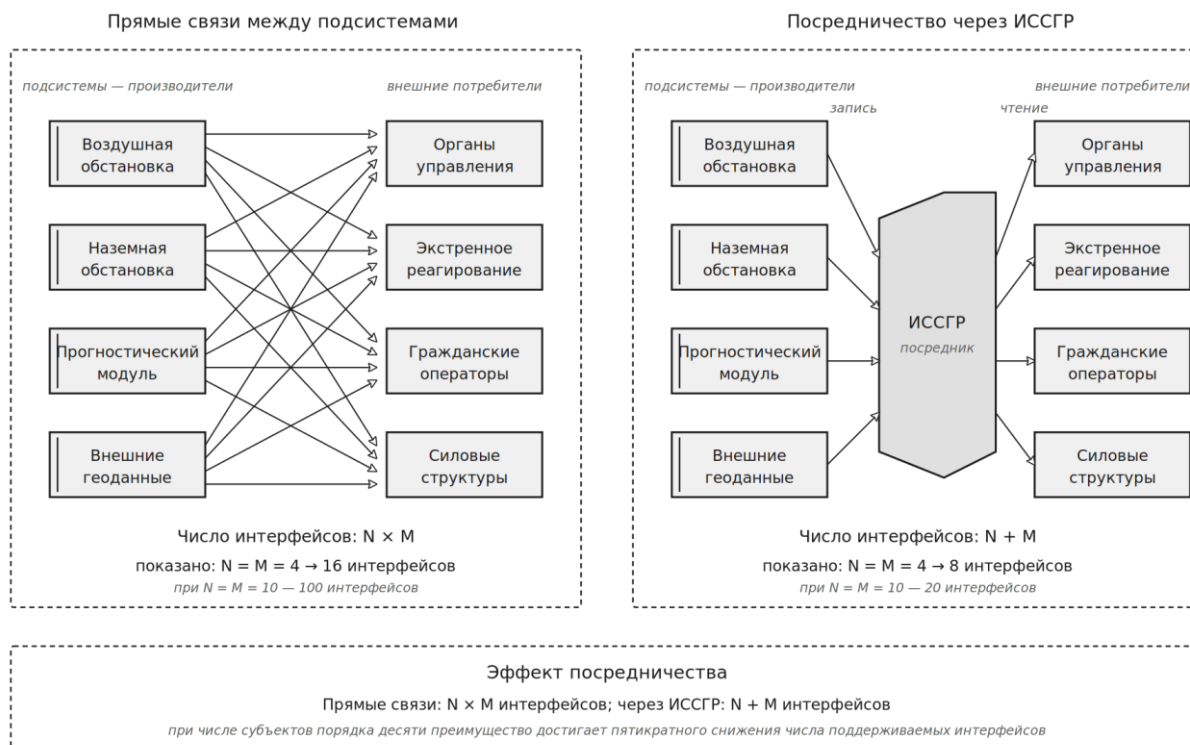


Рисунок 7 — Сравнение прямых связей и посредничества через ИССГР

Адаптация, формализованная в Главе 2, разносится по уровням архитектуры (§ 3.5). Критерий разнесения — темповый: параметрический и структурный уровни работают на наземном узле в окне единиц-десятков секунд, модельный и мета-уровни — в центре консолидации в окне минут и более (рисунок 8). Модельный уровень развёрнут как контур непрерывного обучения с обратимостью адаптационных воздействий: снимки конфигурации перед структурной и модельной адаптацией позволяют выполнить откат при выявлении деградации.

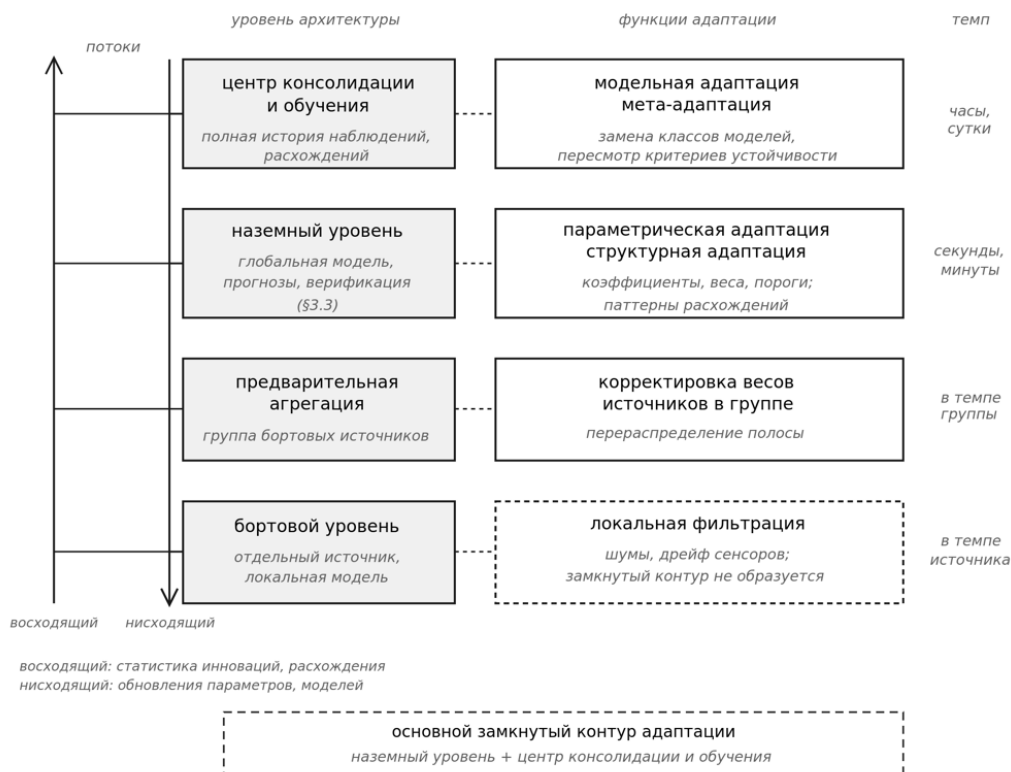


Рисунок 8 — Распределение уровней адаптации по уровням распределённой геоинформационной архитектуры

Пять архитектурных решений — иерархия контуров, адаптерный приём, двухуровневая модель обстановки, эталонная база с ИССГР и контур обратной связи — держатся на одном условии: сквозной прослеживаемости (§ 3.6). Метаданные сопровождают данные на всём пути: идентификаторы носителя, сенсора, цикла обзора и алгоритма обработки в бортовом сообщении; граф происхождения на этапе агрегации; результаты верификации; снимки конфигурации перед адаптацией; журнал расхождений и применённых корректировок. Они позволяют отнести расхождение прогноза с фактом к конкретному источнику или преобразованию. Без прослеживаемости расхождение фиксируется, но не атрибутируется — и замкнутый контур теряет диагностическую способность. Полнота прослеживаемости подтверждена экспериментально: восстановление цепочки происхождения данных занимает 0,4 с (§ 4.5.4 диссертации).

Результаты Главы 3 обосновывают Положение 3, дают архитектурную развёртку Положения 1 и образуют архитектурную составляющую обоснования Положения 5.

Чтобы судить об эффективности метода, нужны метрики, и в **Главе 4** они выстраиваются по трём уровням — от качества отдельных данных к системным свойствам обеспечения и далее к интегральной оценке метода в целом (рисунок 9). Экспериментальная часть проверяет архитектурные решения на имитационной среде и сопоставляет наблюдаемые эффекты с теоретическими предсказаниями.

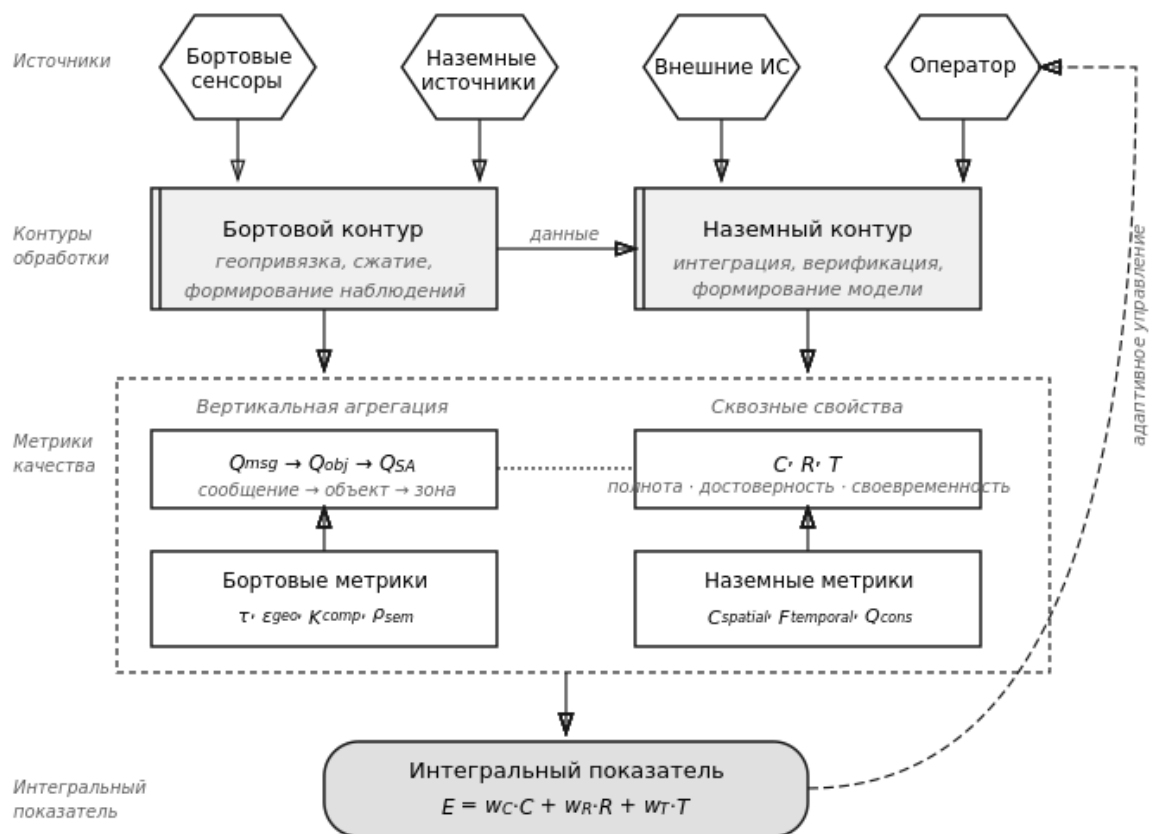


Рисунок 9 — Структура многофакторной оценки эффективности метода АИМТПО в распределённой геоинформационной системе

Компонентный уровень начинается с качества самих геопространственных данных, и оно прослеживается в двойной проекции «бортовой контур \rightarrow наземный контур» (§ 4.1, рисунок 9). На борту вводятся метрики семантического сжатия с коэффициентом $K_{comp} = V_{raw}/V_{sem}$, плотностью полезной информации ρ_{sem} , точностью геопривязки и вариативностью задержек; на земле — метрики

пространственного покрытия с весовой функцией значимости зон, темпоральной актуальности с экспоненциальным затуханием, согласованности интеграции от разнородных источников.

Качество прогнозирования измеряется по четырём осям (§ 4.2): точность прогнозов ($RMSE_{pos}$, $RMSE_{vel}$, Acc_{class}); калибровка прогностической неопределённости K_{calib} через нормализованную инновацию ν_{norm} ; горизонт прогнозирования Δt_{max} и темп деградации β ; верификация замкнутого контура (накопленная достоверность D_N , число шагов сходимости N_{conv} , эффект адаптации R_{adapt}). Метрики калибровки и сходимости опираются на тот же формальный аппарат, что и Глава 2, — оценочный и методологический уровни говорят на одном языке.

$$RMSE_{pos}(\Delta t) \approx RMSE_{pos}(0) + \alpha \cdot \Delta t^\beta, \quad (11)$$

где α и β — параметры модели деградации; $RMSE_{pos}(0)$ — остаточная ошибка в момент формирования прогноза.

Системный уровень оценивает геоинформационные сервисы поддержки принятия решений (§ 4.3) по оперативности, полноте, релевантности и достоверности информационного обеспечения. Системные свойства информационного обеспечения формализованы тремя интегральными показателями — полнотой C , достоверностью R , своевременностью T . Введены метрики интероперабельности с внешними геоинформационными системами $I_{technical}$ и $I_{semantic}$ (рисунок 10).

Ситуационную осведомлённость в зоне интереса измеряют интегральной величиной — качеством зоны, которое агрегирует качество отдельных объектов с учётом их плотности и критичности:

$$Q_{SA}(Z) = \sum_{j \in Z} Q_{obj,j} \cdot \eta_{density}(Z) \cdot (1 - \eta_{critical}(Z)), \quad (12)$$

где $Q_{obj,j}$ — качество j -го объекта зоны интереса; $\eta_{density}(Z)$ — поправка на плотность покрывающих наблюдений; $\eta_{critical}(Z)$ — доля объектов с качеством ниже допустимого порога.

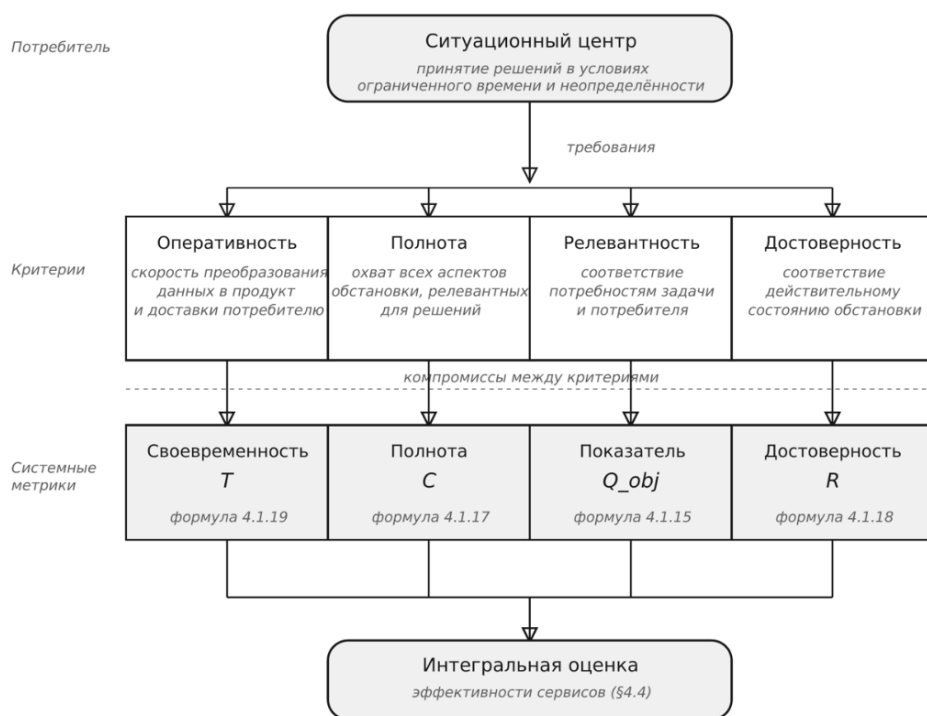


Рисунок 10 — Система критериев эффективности информационного обеспечения

Три уровня метрик сводятся в методику многофакторной оценки эффективности (§ 4.4). Свёртка частных метрик в интегральный показатель выполняется по схеме взвешенного агрегирования

$$E_{\text{level}} = \sum_i w_i \cdot q_i, \quad \sum_i w_i = 1, \quad (13)$$

где q_i — нормированное к диапазону $[0; 1]$ значение i -й метрики; w_i — её весовой коэффициент; n — число метрик уровня.

Весовые коэффициенты обоснованы сочетанием трёх независимых методов. Метод анализа иерархий (АНР): попарное сравнение значимости свойств экспертами; для базового профиля собственный вектор (0,333; 0,466; 0,201) с округлением до операциональных значений $w_C = 0,35$; $w_R = 0,45$; $w_T = 0,20$ при отношении консистентности $CR < 0,1$. Метод swing weighting: прямое ранжирование улучшений через прирост полезности при повышении каждой метрики; результаты согласованы с АНР в пределах 2–3 процентных пунктов. Анализ чувствительности по индексам Соболя: доли вклада компонент в дисперсию интегрального показателя $S_R \approx 0,52$, $S_C \approx 0,33$, $S_T \approx 0,15$ —

ранжирование $R > C > T$ согласовано с АНР. Три независимых метода дают близкие веса, и это делает коэффициенты устойчивыми. Полная система метрик качества данных, лежащая в основе свёртки, сведена в таблице 6. Целевое значение интегрального показателя для базового профиля: $E = 0,35 \cdot C + 0,45 \cdot R + 0,20 \cdot T \geq 0,85$. По ключевым свойствам — адаптации моделей по результатам верификации, пространственно-временной верификации прогнозов, интеграции разнородных источников и адаптивному управлению — метод АИМТПО реализует полный замкнутый контур, тогда как существующие подходы покрывают эти свойства лишь частично.

Таблица 6 — Сводная система метрик качества геопространственных данных

Контур	Аспект качества	Метрика	Тип
Бортовой	Оперативность	$\tau_{total}, \tau_{proc}, \tau_{pack}$	Темпоральный
Бортовой	Сжатие	$K_{comp}, \rho_{sem}, E_{sem}$	Информационный
Бортовой	Геопривязка	$\varepsilon_{geo}, C_{geo}$	Пространственный
Наземный	Покрытие	$C_{spatial}, C_{spatial,w}$	Пространственный
Наземный	Актуальность	$\alpha(x, t), F_{temporal}$	Темпоральный
Наземный	Согласованность	Q_{cons}	Интеграционный
Адаптивный	Направленность	сдвиг $C_{spatial,w}$ по приоритетным районам	Управленческий
Адаптивный	Результативность	рост $F_{temporal}$ и $Q_{SA}(Z)$ в приоритетных районах	Целевой
Сводный	Качество сообщения / объекта / зоны	$Q_{msg}, Q_{obj}, Q_{SA}(Z)$	Агрегационный
Сводный	Полнота / достоверность / своевременность	C, R, T	Системный

Для критичных применений введена комбинированная свёртка, одновременно учитывающая среднее качество компонентов и качество наиболее слабого компонента:

$$E_{combined} = \alpha \cdot E_{weighted} + (1 - \alpha) \cdot E_{min}, \quad (14)$$

где α — параметр баланса между средним качеством и качеством худшего компонента.

Аналитическое обоснование (§ 4.4.2) показывает, что замкнутый контур обработки с верификацией и адаптацией стабилизирует ошибку прогнозирования на уровне неустранимой неопределённости обстановки, 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 проверка выполнена на имитационной среде распределённого мониторинга с тремя мобильными платформами, на полигоне 500×500 м с городской застройкой (§ 4.5). Сопоставлены два варианта организации обработки — централизованный и распределённый.

Преимущество распределённой архитектуры по нагрузке на канал связи. Трафик от одной платформы при централизованной обработке — 28,5 Мбит/с; при распределённой — 2,1 Мбит/с. Снижение на порядок при сопоставимой точности распознавания (0,92 против 0,89); сопоставление вариантов приведено в таблице 7. При увеличении числа источников от трёх к десяткам платформ разрыв между вариантами должен возрастать многократно.

Таблица 7 — Сопоставление архитектурных вариантов организации обработки

Параметр	Централизованная	Распределённая
Трафик от одной платформы, Мбит/с	28,5	2,1
Нагрузка на принимающую подсистему, %	45	8
Задержка до доступности данных, мс	180–220	350–400
Точность распознавания	0,92	0,89
Устойчивость к деградации канала	низкая	высокая
Ретроспективный анализ сырых данных	полный	на источнике

Эффект интеграции наблюдений от двух источников.

Среднеквадратическая ошибка локализации контролируемых объектов: по данным одной платформы — 1,8 м; при интеграции наблюдений двух платформ с пересекающимися ракурсами — 0,9 м. Двукратное снижение СКО превышает теоретическое значение $\sqrt{2}$, ожидаемое для скалярных дисперсий. Причина — анизотропия ковариационных матриц при ракурсном разнесении источников: каждая платформа имеет наибольшую неопределённость вдоль линии визирования и наименьшую поперёк неё. Слияние таких матриц в форме $P_{\text{int}}^{-1} = \sum_{i=1}^N P_i^{-1}$ компенсирует слабые направления одного источника сильными направлениями другого.

$$\sigma_{\text{int}}^2 = \frac{1}{\sum_i \sigma_i^{-2}}, \quad (15)$$

Где σ_i — среднеквадратическая ошибка i -го источника.

Эффект кросс-источниковой верификации. Достоверность объектов, подтверждённых независимыми наблюдениями двух платформ, возросла с 0,87 до 0,94–0,95. Результат согласован с формулой байесовского слияния независимых источников.

Работоспособность замкнутого контура. Сквозная задержка от регистрации сенсорными данными до выработки решения — около 265 мс на сценарии межагентной кросс-верификации. Время восстановления цепочки происхождения данных «источник → наблюдение → интегрированное представление → решение» по запросу оператора — 0,4 с, что достаточно для прослеживаемости в реальном времени. Пример рабочей сцены имитационного эксперимента с формируемой в реальном времени локальной картой занятости пространства приведён на рисунке 11.

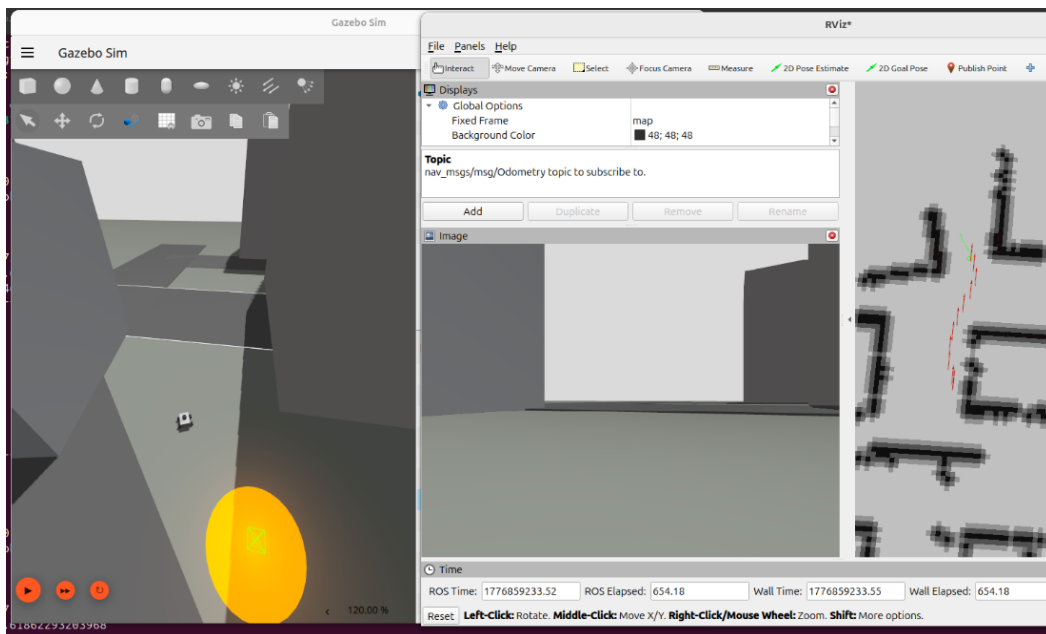


Рисунок 11 — Локальная карта занятости пространства, формируемая в реальном времени

Границы обобщения очерчены явно (§ 4.5.7). Компонентная верификация на среде с тремя платформами подтверждает работоспособность всех подсистем геоинформационного обеспечения, эффект интеграции, преимущество

распределённой архитектуры и операциональность замкнутого контура. При этом численный состав группировки в эксперименте ниже оптимального диапазона 5–50, при котором преимущества метода реализуются полностью. Полная верификация интегрального показателя E на целевом сценарии воздушной мультидоменной группировки отнесена к последующему этапу исследования.

Результаты Главы 4 обосновывают Положение 4 и образуют оценочную составляющую обоснования Положения 5; экспериментальная часть даёт эмпирическое подкрепление Положений 1 и 3.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе разработаны методология адаптивно-интегрированного тактического прогнозирования обстановки в задачах пространственно-временного анализа и реализующий её геоинформационный метод АИМТПО. Метод замыкает пространственно-временной контур «наблюдение — интеграция — прогнозирование — верификация — адаптация». Он работает с распределёнными гетерогенными источниками в условиях динамической обстановки и поддерживает ситуационную осведомлённость на глобальном и локальном уровнях в зоне интереса. Формальный аппарат, архитектурные решения и многофакторная оценка эффективности построены на единой концептуальной основе.

Достижение цели и решение задач исследования.

В соответствии с поставленной целью исследования — разработкой методологии адаптивно-интегрированного тактического прогнозирования обстановки и реализующего её геоинформационного метода АИМТПО — получены аналитические и экспериментальные результаты, подтверждающие достижение цели в пределах установленных границ применимости. Достижение цели проявляется двояко. Во-первых, обеспечен замкнутый режим прогнозирования обстановки с пространственно-временной верификацией и

адаптацией; традиционным подходам он недоступен из-за методологического разрыва, выявленного в Главе 1. Во-вторых, экспериментально подтверждено повышение достоверности формирования модели обстановки.

Аналитическое обоснование показывает главное преимущество замкнутого контура. Контур с верификацией и адаптацией удерживает ошибку прогнозирования на уровне неустраняемой неопределённости обстановки. В разомкнутых системах при дрейфе характеристик обстановки ошибка может расти неограниченно. Интеграция множественных источников с оптимальным взвешиванием даёт точность, превышающую точность любого отдельного источника. Экспериментальная верификация 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.

Достижение цели обеспечено решением шести исследовательских задач. Задача 1 (анализ существующих подходов и обоснование методологического разрыва) решена в Главе 1: проанализированы пространственно-временные модели данных, источники и методы прогнозирования; зафиксирован трёхуровневый методологический разрыв на концептуальном, методологическом и архитектурном уровнях. Задача 2 (разработка методологических оснований метода АИМТПО) решена в Главе 2: введены принцип замкнутого пространственно-временного контура, геоинформационная модель динамической обстановки, формальный аппарат интеграции, классификация прогностических моделей и механизмы адаптации. Задача 3 (разработка архитектурных решений распределённой ГИС) решена в Главе 3: обоснована четырёхуровневая иерархия пространственно-временных контуров обработки, адаптерная архитектура нормализации источников, посредническая схема межведомственного взаимодействия через ИССГР, контур адаптивной обратной связи. Задача 4 (разработка методики многофакторной оценки

эффективности) решена в § 4.1–§ 4.4: сформирована трёхуровневая иерархия метрик и методика многофакторной оценки с обоснованием весовых коэффициентов сочетанием трёх независимых методов. Задача 5 (экспериментальная верификация) решена в § 4.5 в части компонентной верификации на имитационной среде; подтверждены работоспособность подсистем геоинформационного обеспечения, эффект интеграции наблюдений и преимущество распределённой архитектуры. Задача 6 (обобщение результатов в методологию) решена распределённо в Главах 2–4 и зафиксирована в Заключение: сформулированы пять принципов методологии и пять переориентаций геоинформатики, объединяющие результаты задач 2–5 в единую методологическую конструкцию.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК

1. **Петров Я. А.** Разработка методики детекции деревьев на основе YOLOv8 с использованием специализированной базы данных / К. А. Мартын, И. А. Мартын, Е. П. Истомина // Геоинформатика. — 2026. — № 1. — С. 112–122. (К2)
2. **Петров Я. А.** Оптимизационная задача определения грузового состава перевозок на ледовых трассах по оценке грузоподъёмности ледяного покрова / Е. П. Истомина, И. А. Мартын // Геоинформатика. — 2025. — № 2. — С. 4–12. (К2)
3. **Петров Я. А.** Автономное картирование лесной растительности группировкой беспилотных воздушных судов (часть 1) / М. Р. Вагизов, П. И. Кузин [и др.] // Геоинформатика. — 2025. — № 4. — С. 37–44. (К2)
4. **Петров Я. А.** Построение оптимального логистического маршрута на морской акватории в условиях ледовой обстановки по данным беспилотных летательных аппаратов / Е. П. Истомина, И. А. Мартын // Информация и космос. — 2025. — № 2. — С. 103–108. (К2)

5. **Петров Я. А.** Оценка изменчивости климатических характеристик Карского моря для безопасного и эффективного использования Северного морского пути / Е. П. Истомин, И. А. Мартын, Е. С. Новожилова // Геоинформатика. — 2024. — № 2. — С. 45–53. (К2)
6. **Петров Я. А.** Анализ пространственно-временной изменчивости течений в Керченском проливе / Е. П. Истомин, И. А. Мартын, Е. С. Новожилова // Геоинформатика. — 2024. — № 3. — С. 30–36. (К2)
7. **Петров Я. А.** Методика определения батиметрии по данным изображений Landsat. Определение глубины зоны проникновения / Е. П. Истомин, И. А. Мартын, И. Е. Истомин // Информация и космос. — 2024. — № 2. — С. 173–179. (К2)
8. **Петров Я. А.** Моделирование поля течений и уровня моря с применением программного комплекса CARDINAL / Е. П. Истомин, И. А. Мартын // Геоинформатика. — 2023. — № 2. — С. 26–31. (К2)
9. **Петров Я. А.** Расчёт распространения примеси с применением программного комплекса CARDINAL / Е. П. Истомин, И. А. Мартын // Геоинформатика. — 2023. — № 2. — С. 32–35. (К2)
10. **Петров Я. А.** Реализация мониторинга гидрометеорологической обстановки и структуры базы данных для обеспечения безопасности деятельности морских объектов с применением ГИС-технологий / Е. П. Истомин, И. А. Мартын [и др.] // Информация и космос. — 2023. — № 2. — С. 95–99. (К2)
11. **Петров Я. А.** Геопространственные аспекты управления развитием территории / Е. П. Истомин, М. А. Жарикова, Е. С. Новожилова [и др.] // Процессы в геосредах. — 2023. — № 2 (36). — С. 2006–2012. (К3)
12. **Петров Я. А.** Моделирование волновых процессов на замкнутых акваториях мелководных районов / Е. П. Истомин, В. Л. Михеев, И. А. Мартын // Геоинформатика. — 2021. — № 3. — С. 30–35. (К2)
13. **Петров Я. А.** Геомоделирование предельного усиления цуга волн при выходе на шельф / Е. П. Истомин, В. Л. Михеев, И. А. Мартын // Информация и космос. — 2021. — № 3. — С. 78–85. (К2)

14. **Петров Я. А.** Разработка метода защиты геоинформационных систем и пространственных данных на основе нейронной сети / Т. М. Татарникова, С. Ю. Степанов, А. Ю. Сидоренко // Программные продукты и системы. — 2020. — № 2. — С. 229–235. (К1)
15. **Петров Я. А.** Методика дешифрирования и инвентаризации лесных насаждений средствами ГИС AutoCAD Map / М. Р. Вагизов, С. Ю. Степанов, А. Ю. Сидоренко // Геоинформатика. — 2020. — № 4. — С. 20–27. (К2)
16. **Петров Я. А.** Концептуальная модель анализа состояния территорий по данным дистанционного зондирования Земли / Т. М. Татарникова, С. Ю. Степанов [и др.] // Информация и космос. — 2020. — № 3. — С. 124–130. (К2)
17. **Петров Я. А.** Программный модуль для анализа состояния территорий по данным дистанционного зондирования Земли / Т. М. Татарникова, С. Ю. Степанов [и др.] // Информация и космос. — 2020. — № 4. — С. 107–114. (К2)
- Наиболее значимые публикации индексируемые в базах Scopus/WoS**
18. **Petrov Ya.** [et al.] Model for Forecasting the Hydrometeorological Situation as a Component of the Development of the Transport and Logistics System of the Arctic Region // Springer, 2024. — DOI 10.1007/978-3-031-54589-4_25.
19. **Petrov Ya.** [et al.] Seasonal and Long-Term Variability of Ice Conditions in the Western Arctic // Springer, 2024. — DOI 10.1007/978-3-031-54589-4_24.
20. **Petrov Ya.** [et al.] Zoning of the Water Area by Ocean Surface Temperature Using Cluster Analysis // Springer, 2024. — DOI 10.1007/978-3-031-54589-4_23.
21. **Petrov Ya.** [et al.] Decision Aid Digitalization in Geopolitical Risks Management for Maritime Logistics // Springer, 2022. — DOI 10.1007/978-3-030-81619-3_80.
22. **Petrov Ya.** [et al.] Decision Support Digitalization for Large Environmental Logistic Projects // Springer, 2022. — DOI 10.1007/978-3-030-81619-3_75.
23. **Petrov Ya.** [et al.] Digitalization of Geo-Information Support for Northern Sea Route Management // Springer, 2022. — DOI 10.1007/978-3-030-96380-4_138.

24. **Petrov Ya.** [et al.] Digitalization of Ice Waters Maritime Activity Management // Springer, 2022. — DOI 10.1007/978-3-030-96380-4_139.
25. **Petrov Ya.** [et al.] Digitalization of Large Arctic Projects Geo-Information Support Under Climate Change and COVID-19 // Springer, 2022. — DOI 10.1007/978-3-030-96380-4_137.
26. **Petrov Ya.** [et al.] Geo-Information Support Digitalization for Northern Sea Route Logistics in the Context of Climate Change and COVID-19 // Springer, 2022. — DOI 10.1007/978-3-030-81619-3_71.
27. **Petrov Ya.** [et al.] GIS Conceptual Model as a Modern Tool in the Arctic Navigation // Springer, 2022. — DOI 10.1007/978-3-030-96380-4_141.

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ и БД

28. **Петров Я. А.**, Информационная система поддержки принятия решений в погодозависимых отраслях : свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № RU 2019611769 / Е. П. Истомин, А. А. Фокичева, Н. В. Яготинцева. — № 2018619936 ; заявл. 18.09.2018 ; опубл. 04.02.2019.
29. **Петров Я. А.** База данных метеорологических рисков : свидетельство о государственной регистрации базы данных № RU 2019620208 / Е. П. Истомин, А. А. Фокичева, Н. В. Яготинцева. — № 2018621294 ; заявл. 18.09.2018 ; опубл. 04.02.2019.

Монографии

30. **Петров Я. А.** Геоинформационное управление развитием природно-технических систем : монография / Е. П. Истомин, В. Л. Михеев [и др.] ; под общ. ред. Е. П. Истомина. — Санкт-Петербург : Своё издательство, 2022. — 419 с.
31. **Petrov Ya.** Geospatial Aspects of Managing the Development of Complex Systems / E. Istomin, V. Mikheev, S. Prisyazhnyuk, A. Sokolov. — Cham : Springer, 2023. — VII, 413 p. — (Earth and Environmental Sciences Library, ISSN 2730-6674). — ISBN 978-3-031-33165-7. — DOI 10.1007/978-3-031-33166-4.

Учебные пособия и иные публикации

32. **Петров Я. А.** Основы геоинформатики: практикум в QGIS : учебное пособие по выполнению лабораторных работ / М. Р. Вагизов, С. Ю. Степанов, Х. А. Гарсиа Эскалона. — 2-е изд. — Санкт-Петербург : Реноме, 2025. — 70 с. — ISBN 978-5-00256-125-4.
33. **Петров Я. А.** Информационные технологии и системы : учебное пособие для студентов высших учебных заведений. Ч. 1 / М. Р. Вагизов, М. А. Новикова [и др.]. — Санкт-Петербург : СПбГЛТУ им. С. М. Кирова, 2020. — 78 с. — ISBN 978-5-00125-439-3.