

Ивакин Ян Альбертович

**Методы интеллектуализации промышленных
геоинформационных систем на основе онтологий**

Специальность 05.13.06 – “Автоматизация и управление технологическими
процессами и производствами”

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Санкт-Петербург - 2009

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете “ЛЭТИ”

Научный консультант: Заслуженный деятель науки Российской Федерации, член-корреспондент РАН Юсупов Рафаэль Мидхатович

Официальные оппоненты:

Заслуженный деятель науки и техники,
Доктор технических наук, профессор

Кобзев Валентин Васильевич;

Доктор технических наук, профессор

Гаврилова Татьяна Альбертовна;

Доктор технических наук, профессор

Биденко Сергей Иванович.

Ведущая организация – Закрытое акционерное общество «Транзас»

Защита состоится “ _____ ” _____ 2009 г. в _____ часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.238.07 Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета (“ЛЭТИ”) им. В.И. Ульянова (Ленина) по адресу: 197376, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета.

Автореферат разослан “ _____ ” _____ 2009 г.

Ученый секретарь
совета по защите докторских и кандидатских
диссертаций Д 212.238.07

Цехановский В.В.

1. Общая характеристика диссертационной работы

Актуальность темы диссертационного исследования. В настоящее время существуют два принципиально разных подхода к описанию пространственных (географических) объектов, базирующихся на фундаментальных положениях о дискретном или непрерывном представлении пространства и пространственных процессов. Первый подход предполагает разделение непрерывного пространства на множество элементов, каждый из которых представляет собой малую, но вполне определенную часть земной поверхности. Вторым подходом представления географического пространства предполагается задание точных пространственных координат объектов в непрерывном пространстве явным образом (вектором). Оба указанных подхода могут быть использованы для представления географического пространства. Однако второй подход обладает потенциально лучшей возможностью позиционирования объектов в пространстве. При этом практическая точность позиционирования объектов определяется целесообразной точностью оцифровки и обработки первичных картографических данных.

В рассматриваемой части географического пространства может находиться некоторое конечное множество объектов, каждый из которых перемещается со вполне определенными, присущими ему целями. Совокупность перемещений этих объектов составляет пространственный процесс. Любые перемещения объектов в пространстве потенциально опасны как для них самих, так и для окружающих их объектов. В районах с высокой интенсивностью пространственных процессов безопасность их реализации, как правило, должна обеспечиваться централизованным управлением (диспетчеризацией). Для целей диспетчеризации создаются специальные человеко-машинные (организационно-технические) системы, управление которыми осуществляется с диспетчерского пункта, включающего ряд автоматизированных рабочих мест (АРМ) диспетчеров.

Современный уровень развития автоматизированных систем диспетчеризации пространственных процессов (АСДПП) предполагает включение в их состав географических информационных систем (ГИС), представляющих собой ядро аппаратно-программных инструментальных средств реализации геоинформационных технологий (ГИТ) в целях адекватного позиционирования и отображения пространственных объектов в зоне ответственности диспетчера. Типовая ГИС является аппаратно-программным комплексом, который обеспечивает сбор, передачу, обработку, хранение и визуальное отображение различной картографической информации, а также текущей информации о пространственных процессах в целях ее наглядного представления диспетчеру. При этом для адаптации к целям диспетчеризации пространственных процессов ГИС кроме реализации базовой ГИТ должна обеспечивать диспетчеру как лицу, принимающему решение (ЛПР), поддержку принятия решений по организации и корректуре перемещений отдельных объектов.

Разработка ГИС для АСДПП представляет собой наукоемкий вид проектной деятельности, сложность которого определяется необходимостью моделирования не только объективных характеристик собственно пространственных процессов и внешней среды (видимость, скорость ветра и т.п.), но и субъективного человеческого фактора, определяемого квалификацией и психофизиологическим состоянием

ем как диспетчера, так и лиц, осуществляющих управление пространственными объектами. Многообразие возможных вариантов развития пространственных процессов и необходимость учета человеческого фактора обуславливает необходимость диалектического качественного анализа этих процессов, что предопределяет внедрение в состав ГИС элементов **искусственного интеллекта (ИИ)**. Однако, анализ отдельных разрозненных попыток внедрения элементов ИИ в прикладное программное обеспечение промышленно выпускаемых ГИС показывает, что эмпирический и не системный характер интеллектуализации ГИС, ориентированных на применение в составе АСДПП, не способен обеспечить необходимое качество диспетчеризации пространственных процессов и их безопасность в условиях бурного роста интенсивности транспортных потоков.

Предметная область диспетчеризации пространственных процессов предъявляет характерные требования к прикладному программному обеспечению, создаваемому на основе ГИС. Применение промышленно-выпускаемых (серийных) ГИС для диспетчеризации пространственных процессов ограничено отсутствием сервисов:

- 1) предметно-обусловленного отображения текущей пространственной ситуации в зоне ответственности диспетчера;
- 2) поддержки и усиления психофизиологических возможностей диспетчеров при большой интенсивности и разнообразии транспортных потоков;
- 3) анализа и оценки пространственных процессов.

Наличие данных ограничений определяет существование **научно-технической проблемы интеллектуализации промышленных ГИС, применяемых в АСДПП для диспетчеризации пространственных процессов.**

Данная научно-техническая проблема лежит в области исследований научной специальности **05.13.06 – “Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами”** и отвечает требованиям формулы этой специальности, т.к. ее решение направлено на разработку комплекса методов проектирования интеллектуальных ГИС как средства повышения качества управления транспортными потоками и обеспечения их безопасности на основе автоматизации функций диспетчера по планированию, анализу и оценке пространственных процессов.

Целью исследования является повышение качества промышленных геоинформационных систем за счет их интеллектуализации, с целью включения в состав автоматизированных систем диспетчеризации пространственных процессов.

Объект исследования — промышленные геоинформационные системы, используемые при построении автоматизированных систем диспетчеризации пространственных процессов.

Предмет исследования — методы интеллектуализации промышленных геоинформационных систем и их адаптации к предметной области управления пространственными процессами.

Для достижения поставленной цели в ходе исследования должны были быть решены следующие **научные задачи**:

1. Анализ состояния предметной области проектирования промышленных ГИС, применяемых при диспетчеризации пространственных процессов, и на этой основе обосновать направления их дальнейшей интеллектуализации.

2. Разработка метода создания онтологий для ГИС, ориентированных на диспетчеризацию пространственных процессов, как метода точной спецификации предметной области диспетчеризации пространственных процессов с помощью средств специализированной среды инженерии знаний.

3. Разработка информационной технологии сценарной репрезентации знаний о пространственных процессах, опирающуюся на онтологии пространственных ситуаций.

4. Разработка метода оценки безопасности диспетчеризируемых пространственных процессов, базирующийся на методологии системно-информационного анализа и опирающийся на онтологии пространственных ситуаций.

5. Разработка комплекса квалиметрических методик формирования системы показателей качества созданной онтологии ГИС, позволяющий в процессе проектирования оценивать качество и недостатки текущего варианта онтологии и определять целесообразные направления ее совершенствования.

6. Разработка методики планирования процесса разработки онтологий для совершенствования интеллектуализированной ГИС, определяющую последовательность и содержание этапов ее проектирования.

7. Экспериментальная оценка работоспособности и эффективности результатов исследования на примере разработки конкретного программно-аппаратного комплекса диспетчеризации пространственных процессов на море, включающего ГИС, использующую конкретный набор ГИТ.

Для решения задач диссертационного исследования были использованы следующие **фундаментальные методы**: объектно-ориентированный подход к созданию сложных программных систем (в т.ч. ГИС), методы инженерии знаний, системно-информационного анализа, квалиметрии, комплексного системного проектирования сложных систем, эргономики и инженерной психологии.

Методологическую основу настоящей диссертационной работы, посвященной проблеме интеллектуализации ГИС в целях их ориентации на решение задач диспетчеризации пространственных процессов, составляют результаты научных исследований А.М. Берманта, С.И. Биденко, Б. Боэма, М.Н. Воронина, Т.А. Гавриловой, Ю.М. Горского, В.Г. Евграфова, Л. Заде, В.В.Кобзева, П.И.Падерно, В.В. Поповича, Б.Я. Советова, Р.П. Сорокина, В.Н. Филатова, Н.В. Хованова, М.Ш. Цаленко, В.Я. Цветкова, Р.М. Юсупова, А.И. Яшина и др.

Логика, этапы и база исследования:

1 этап (2002-2003 г.г.): Первичный анализ проблемы, выявление противоречий, изучение принципов построения и функциональной организации АСДПП и ГИС, определение функций программного обеспечения.

2 этап (2003-2004 г.г.): Изучение передового отечественного и зарубежного опыта разработки и внедрения элементов ИИ в ГИС. Начало выполнения ОКР на тему "Создание программно-аппаратного комплекса (ПАК) автоматизации процесса управления функциональной системой освещения обстановки в

составе интегрированной автоматизированной системы управления пространственными процессами на море”.

3 этап (2004-2005 г.г.): Обоснование метода разработки онтологий для ГИС, ориентированных на диспетчеризацию пространственных процессов, и информационной технологии сценарной репрезентации этих процессов. Подготовка к публикации монографии и статей в изданиях по перечню ВАК РФ.

4 этап (2005-2006 г.г.): Разработка метода оценки безопасности диспетчеризируемых пространственных процессов и комплекса квалиметрических методик формирования системы показателей качества онтологии ГИС. Экспериментальная проверка работоспособности и эффективности результатов исследования. Публикация статей в изданиях по перечню ВАК РФ.

5 этап (2006-2008 г.г.): Обобщение результатов исследования и оформление рукописи диссертационной работы.

На защиту выносятся:

1. Метод разработки онтологий для интеллектуализации ГИС в АСДПП.
2. Информационная технология сценарной репрезентации пространственных процессов в интеллектуализированных ГИС.
3. Метод оценки безопасности диспетчеризируемых пространственных процессов в интеллектуализированной ГИС.
4. Комплекс квалиметрических методик формирования системы показателей качества для оценки онтологии интеллектуализированной ГИС.
5. Методика планирования процесса разработки онтологий интеллектуализированной ГИС.

Новизна первого научного результата состоит в том, что разработанный метод позволяет развить базовую обобщенную онтологию диспетчерской деятельности путем учета многофакторности пространственных процессов.

Новизна второго научного результата заключается в том, что репрезентация знаний перешла на качественно новый уровень за счет дополнения ее технологии научно-методическим инструментарием создания сценариев типовых пространственных процессов диспетчеризации

Новизна третьего научного результата состоит в обеспечении получения необходимой и качественной оценки уровня безопасности на основе комплексного анализа пространственной ситуации.

Новизна четвертого научного результата заключается в том, что совокупность показателей оценки конкретных вариантов онтологий интеллектуализированных ГИС организуется в иерархическую структуру.

Новизна пятого научного результата состоит в том, что в результате его разработки теория аналитического планирования эксплицирована на разработку онтологий интеллектуализированной ГИС

Достоверность первого научного результата определяется тем, что учет многофакторности пространственных процессов осуществляется без искажений и упрощений базовой онтологии диспетчерской деятельности.

Достоверность второго научного результата определяется тем, отсутствием противоречий с базовыми способами и процедурами репрезентации знаний и отсутствием искажения теоретических положений, принятых для репрезентации знаний

Достоверность третьего научного результата подтверждается совпадением до деталей результатов оценки пространственной безопасности на основе традиционных методов и предлагаемого метода.

Достоверность четвертого научного результата определяется базированием на общих методах оценки качества программного и информационного обеспечения, корректным их применением для построения иерархических структур и агрегаций показателей качества онтологии.

Достоверность пятого научного результата определяется тем, что ограничивающие положения теории проектирования сложных программных систем не нарушаются, а экспликация процедур аналитического планирования обоснована при соблюдении этих положений.

Значимость результатов исследования для науки состоит в:

- упрощении процессов формализации и интеграции знаний о диспетчеризации пространственных процессов при достижении лучшего качества результатов указанных процессов;
- улучшении качества и расширение возможностей актуализации более полного экспертного знания о пространственных процессах диспетчеризации;
- быстром и качественном анализе пространственной безопасности;
- оснащении анализа онтологий интеллектуализированных ГИС инструментами создания иерархических структур и агрегаций показателей качества онтологии;
- расширении возможностей по выявлению и исключению цикличности выработки проектных решений при разработке онтологий интеллектуализированных ГИС.

Результаты внедрены в ОКР “Алеврит” (СПИИРАН), ОКР “Трасса” (ЗАО “Фирма “Пассат”), ОАО «Концерн ОКЕАНПРИБОР» (ОКР«Кижуч»), ЗАО «Транзас» (ОКР «Багрень-2»), ФНПЦ ОАО «НПО “Марс”» (ОКР «Море-99»), образовательный процесс СПбГЭТУ (ЛЭТИ) и ВМИРЭ.

Результаты работы апробированы на 9 международных, всероссийских и межвузовских конференциях.

По теме диссертации опубликовано: 1 монография, 1 учебное пособие, 11 статей в журналах, рекомендованных ВАК РФ, 8 статей и 16 докладов в других изданиях. Материалы диссертации использованы в 3 итоговых отчетах по НИР. Зарегистрировано и размещено 5 новых алгоритмов, разработанных в ходе диссертационного исследования, в Государственных фондах алгоритмов и программ. Всего по теме диссертации опубликовано 46 работ.

Структура и объем диссертационной работы: диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка использованной литературы и приложений. Общий объем – 371 с., из которых: оглавление - 2 с., список сокращений - 1 с., основного текста – 344 с. (таблиц – 82, рисунков – 88), библиография – 11 с. (154 наименования), приложения - 12с.

2. Содержание диссертационной работы

Во введении обоснована актуальность темы, определены противоречия, существующие в исследуемой предметной области, сформулирована научно-техническая проблема. Определены цель, объект, предмет и задачи диссертационного исследования, набор фундаментальных методов, используемых для решения проблемы интеллектуализации ГИС, а также логика, этапы и база исследования. Сформулированы выносимые на защиту результаты, обоснованы их

научная новизна и достоверность. Определены теоретическая значимость и практическая ценность полученных результатов.

Первая глава – “Анализ геоинформационных систем и технологий, применяемых при диспетчеризации пространственных процессов, обоснование проблемы и постановка задач исследования” – посвящена анализу предметной области с позиций требований к современным автоматизированным системам диспетчеризации пространственных процессов и входящим в их состав геоинформационным системам с учетом степени внедрения в их структуру элементов искусственного интеллекта.

Определены общие принципы построения промышленно выпускаемых (серийных) ГИС, которые являются основой компьютерных инструментальных средств реализации ГИТ для различных предметных областей, в том числе и для диспетчеризации пространственных процессов. В рамках ГИС должны осуществляться процедуры моделирования пространственных ситуаций на основе электронной карты. При этом содержание информации, участвующей в моделировании пространственной ситуации с помощью электронной карты, должно включать :

1. Описательная информация, присутствующая на карте:
 - 1.1. в явном виде (цвет линии, спецсимволы, шрифт надписи и т.д.);
 - 1.2. в неявном виде (результаты решения вычислительных задач)
2. Метрическая информация (масштаб, картографическая проекция, система координат)
3. Пространственная информация в явном виде (связь пространственных объектов) и неявном виде (маршруты движения)
4. Географические объекты – элементы пространственной ситуации (береговая черта, канал, остров, судно и т.п.)
5. Язык описания пространственной ситуации (точки, линии, символы, надписи и т.д.)

Принято разделять промышленно выпускаемые ГИС на базовые (инвариантные к предметной области) и прикладные. В обоих видах ГИС эффективность обработки и презентации информации о пространственной ситуации прямо определяется качеством онтологии той предметной области, к которой относится отображаемый класс пространственных ситуаций. Современные ГИС имеют соответствующие инструментальные средства, с помощью которых реализуется функциональность представления пространственно- географических и атрибутивных данных. Эффективность ГИС во многом зависит от интеграции этих данных. Обработка названных выше двух видов данных осуществляется путем картографического моделирования, включающего процедуры разработки модели, ее отладки и верификации.

В результате анализа возможностей применения технологий ИИ в ГИС осуществлено упорядочение результатов научных исследований в рассматриваемой предметной области на основе триады “Теория - технология - практика”. На этой базе произведена классификация основных прикладных информационных технологий ИИ, используемых в ГИС. Определены требования к применимости технологий ИИ в ГИС и установлены причины их невыполнения. Для исключения факторов, сдерживающих внедрение средств ИИ в ГИС, пред-

ложено использовать технологии экспертных систем (ЭС), а именно, — модели представления знаний, построенные на основе онтологий.

Использование технологий ЭС в рамках интеллектуализации ГИС подразумевает, прежде всего, интеграцию в состав программного обеспечения ГИС машины логического вывода. В результате такого внедрения в рамках ГИС становится возможным решение двух видов задач:

- 1) распознавания текущих ситуаций, сложившихся в ходе диспетчеризации пространственных процессов;
- 2) выработки рекомендаций диспетчеру для принятия адекватных решений по управлению диспетчеризируемыми пространственными процессами.

Распознавание текущей пространственной ситуации в ГИС производится на основе интеграции картографических данных и данных по активным диспетчеризируемым объектам, полученным от средств наблюдения. Распознавание текущей пространственной ситуации базируется на выявлении набора типовых ситуаций. Соответствующее подмножество такого набора может являться множеством опасных ситуаций. Под распознаваемой ситуацией, в данном случае, понимается такая совокупность событий, имеющих предметную интерпретацию в деятельности пользователя, которая может трактоваться как факт качественного изменения состояния предметной области (наступления события более высокого уровня абстракции). Пример, поясняющий данное определение, приведен в табл.1.

Таблица 1

Пример распознавания ситуации

№ п/п	Совокупность событий	Ситуация
1.	Курс судна1 изменился	Угроза столкновения судна 1 с судном 2
	Линия движения судна1 пересекает линию движения судна 2	
	Дистанция между судами 1 и 2 сокращается с течением времени	
	Пеленг с судна1 на судно2 не меняется	
2.	Курс судна отличен от рекомендованного на фарватере	Судно опасно сошло с фарватера
	Осадка судна критична к соблюдению режима фарватера	
	Дистанция от судна до оси фарватера больше ширины фарватера	

При этом обоснована необходимость разработки “репозитория типовых пространственных ситуаций”. Определено, что для оценки тенденций развития пространственных ситуаций с использованием расчетных моделей необходимо, во-первых, определить группу показателей, по которым идентифицируются тенденции развития ситуаций, и, во-вторых, дать содержательно-смысловую интерпретацию каждому из них. Именно такая интерпретация с наглядным представлением оценки выявленной тенденции развития пространственной ситуации на электронной карте должна являться прерогативой интеллектуализации ГИС.

Установлено, что прямое аналитическое оценивание пространственной ситуации применимо для ограниченного числа задач, решаемых диспетчером. В свою очередь, моделирование развития пространственной ситуации позволяет получить статистически обоснованные оценки для различных тенденций в развитии текущей пространственной ситуации при возможности многократного ее моделирования с учетом случайного характера исходных данных.

При моделировании сложных пространственных процессов в ГИС должна решаться не традиционная для ЭС задача управления процессом моделирования, а задача использования сложных сценариев, расчетов и анализа вероятностных характеристик пространственной ситуации на основе методов вероятностного моделирования и естественно-языкового интерфейса. Последнее позволяет использовать интеллектуализированную ГИС в процессе обучения и тренировки специалистов-диспетчеров. Поскольку принято, что интеллектуализация ГИС осуществляется в целях повышения эффективности диспетчеризуемых пространственных процессов, то был проведен критический анализ современного состояния ГИС и программных технологий, применяемых при диспетчеризации пространственных процессов. Анализу были подвергнуты, во-первых, универсальные ГИС (ARC/INFO, MapInfo, AutoCAD Map, Нева, TopPlan 2007). Кроме того, рассмотрены специализированные ГИС (dKart Hydrographer, dKart Navigator ECS/ECDIS, Карта 2005, Метео).

Определено, что АСДПП являются классом АСУ, имеющим ряд отличительных признаков, основным из которых следует считать наличие совокупности активных объектов, управление которыми осуществляется в ходе человеческой деятельности. На основе выявленных отличительных признаков построена обобщенная типовая структура АСДПП (рис. 1).

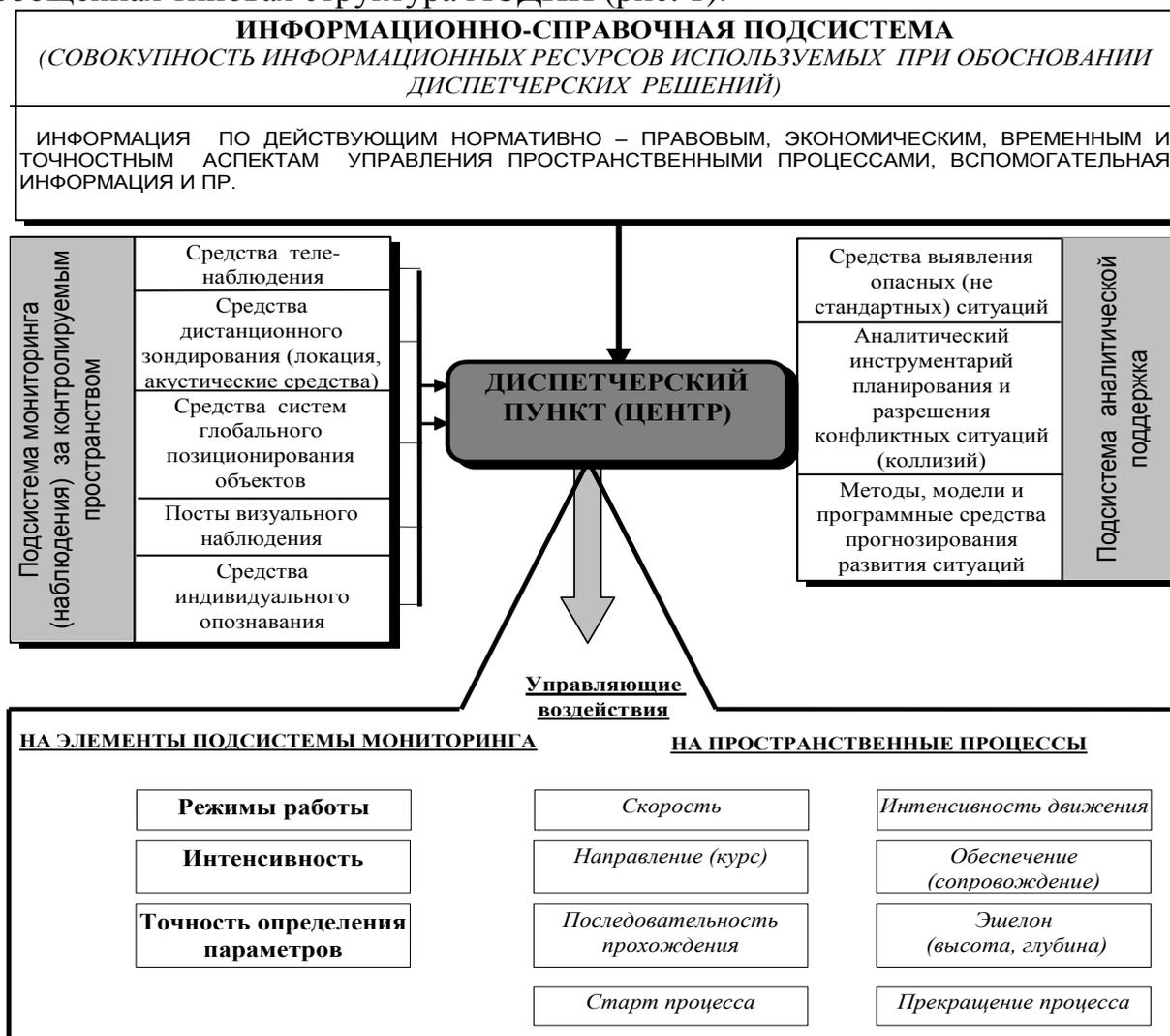


Рис. 1. Типовая структура АСДПП в обобщенном виде

Анализ взглядов на понятие “диспетчеризация” позволил установить, что “эффективная диспетчеризация предполагает реалистичный баланс между целями обеспечения безопасности и производственными целями”. Принципиальная организация перемещений пространственного объекта с применением современных АСДПП приведена на рис. 2, где выделены потоки как неформализованной, так и формализованной информации, а также управляющие воздействия, вызывающие изменение параметров движения управляемых объектов и реакции на них.

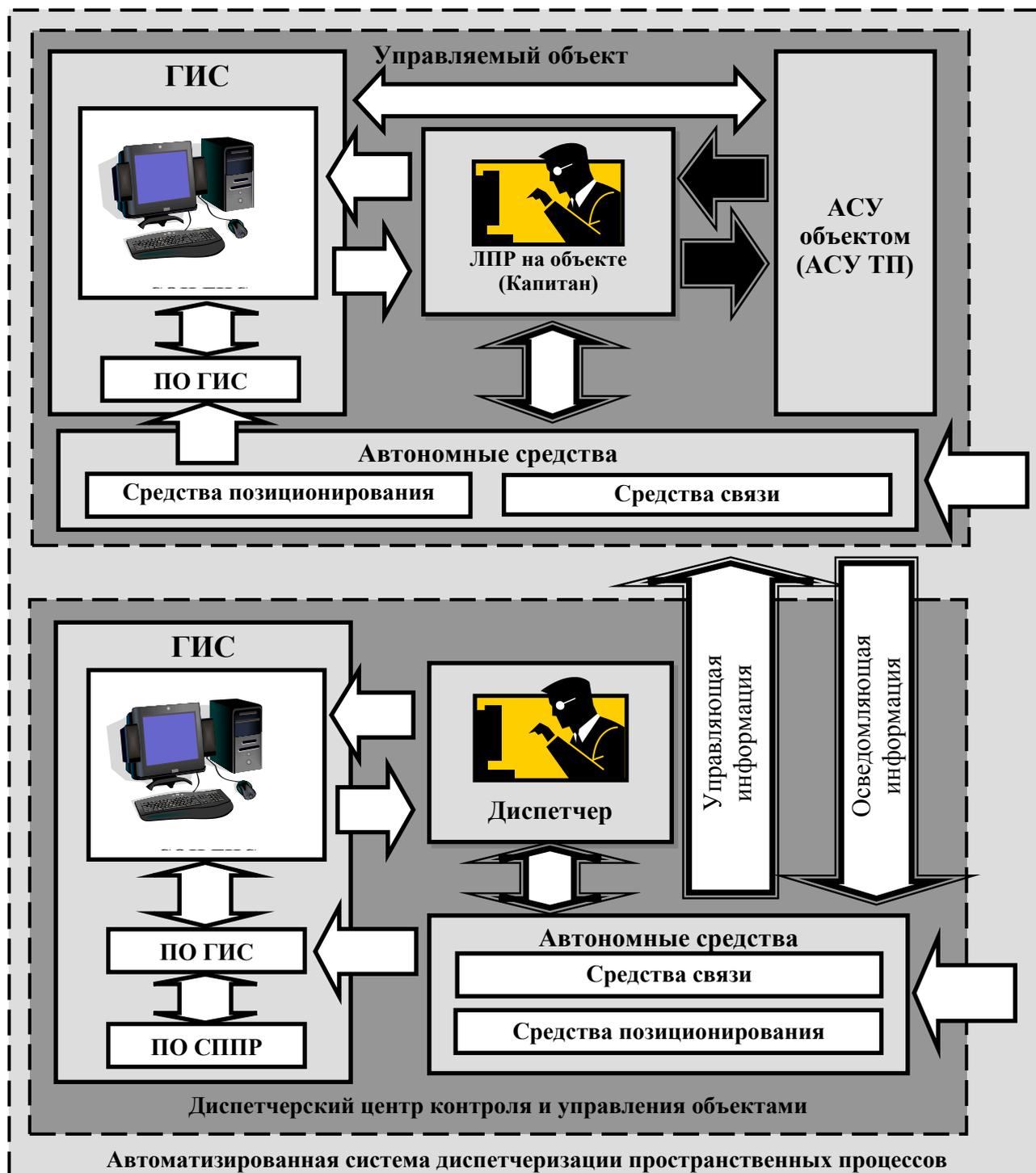


Рис. 2. Принципиальная организация диспетчеризации перемещений пространственного объекта с применением современных АСДПП

Сделан вывод, что ключевыми элементами АСДПП являются лица, принимающие решение по управлению объектами, перемещающимися в зоне диспетчеризации, и состав диспетчерского центра. Поэтому общее направление развития ГИС обозначено как направление адаптации ГИС к специфике деятельности названных ЛПР.

Из сказанного вытекает основное противоречие в функционировании АСДПП и решении задач управления активными пространственными объектами: наличие в системе двух видов информации (формализованной и неформализованной), которое может быть разрешено на основе информационной технологии ИИ. Такая технология применительно к проектированию перспективных ГИС в настоящее время отсутствует. Ее разработка позволит в определенной мере устранить негативное влияние человеческого фактора на эффективность и безопасность пространственных процессов.

Результаты вышеприведенного анализа позволили сделать следующие выводы:

1. Базисной основой автоматизации деятельности диспетчеров АСДПП являются ГИС, в которые интегрируются расчетно-аналитические программные средства поддержки принятия решений.

2. Диспетчер должен самостоятельно активизировать средства анализа пространственных ситуаций и поддержки принятия решений, что приводит к необоснованному росту числа вспомогательных операций в деятельности диспетчера при решении любой из задач диспетчеризации, а значит и времени решения задач диспетчеризации пространственных объектов.

3. Размеры зон ответственности АСДПП и высокая интенсивность движения в них приводят к психофизической перегрузке диспетчеров. Следствием этого является несвоевременность выявления опасных ситуаций, а в отдельных случаях — возникновение аварий и катастроф.

4. Очевидно противоречие между интенсификацией пространственных транспортных потоков, порождающей объективно интенсивное развитие АСДПП, и экстенсивным развитием ГИС как элемента, составляющего основу АСДПП и автоматизации деятельности диспетчеров. Это противоречие определяет необходимость интеллектуализации ГИС, ориентированных на АСДПП.

5. Интеграция на базе ГИС разнородных моделей (расчетных модулей) элементов ИИ, имитационных средств и др. подразумевает разработку функциональной иерархии прикладных программных компонентов ГИС. На верхнем уровне этой иерархии должны быть средства ИИ, которые непосредственно вырабатывают рекомендации диспетчеру, а на нижестоящих уровнях — программные компоненты, осуществляющие мониторинг и диагностику безопасности диспетчеризируемых процессов, выработку данных, необходимых для реализации процедур логического вывода в средствах ИИ.

В диссертации в дополнении к приведенному выше основному противоречию выявлены еще две группы частных технологических противоречий: 1) группа противоречий, присущих процессам разработки систем с элементами ИИ и современной геоинформатики; 2) группа противоречий в области интеграции ГИС-интерфейса и машины логического вывода, в области интеграции, гармонизации и слияния геоинформации, а также в сфере обеспечения универ-

сальности технических и технологических решений, принимаемых при проектировании ГИС с элементами ИИ.

На основе изложенного выше констатируется, что единой, взаимосвязанной теории построения и методов проектирования интеллектуализированных ГИС пока не существует. Имеемые теоретические и практические наработки, способные составить основу названных теории и методов, не структурированы, формулируются по междисциплинарному принципу и во многом носят не системный характер. Следовательно, на сегодняшний день имеет место эмпирический путь развития прикладных ГИС-технологий.

Вторая глава — “Метод разработки онтологий для интеллектуализации ГИС в автоматизированных системах диспетчеризации пространственных процессов ” — содержит основные положения метода разработки онтологий для ГИС, включающие: 1) технологию гармонизации, интеграции и слияния информации для формирования онтологий понятий, характерных для диспетчеризации пространственных процессов; 2) многоуровневую модель обработки информации в АСДПП; 3) обоснование возможности конфигурирования предметной области диспетчеризации пространственных процессов в виде онтологий; 4) типовую программную архитектуру ГИС, ориентированных на диспетчеризацию пространственных процессов.

Установлено, что одной из важнейших задач является разработка модели прохождения информации от первичного датчика до диспетчера АСДПП. При этом целесообразно для построения модели и разработки на ее базе информационной технологии обработки и подготовки данных для ГИС использовать современные механизмы гармонизации, интеграции и слияния информации применительно к АСДПП.

Процедура гармонизации информации предполагает распределение основных понятий и их отношений между ними (онтологии) по соответствующим направлениям деятельности диспетчера АСДПП. Гармонизация информации обеспечивает доступ к возможно большему числу первичных источников информации, возможность преобразования информации в удобный для диспетчера вид и доступ к существующим информационным ресурсам. Таким образом, гармонизация информации должна обеспечивать возможность доступа запросов ГИС к источникам информации путем введения в рамках АСДПП единого протокола обмена информацией. Показан эффект применения процедуры гармонизации информации в АСДПП. При этом АСДПП рассматривается как состоящая из конечного множества подсистем $Q = \{q_i\}$. Для каждой q_i задаются следующие конечные множества: $\Phi_{q_i} = \{\phi_j\}$ ($j = \overline{1, l}$) — множество функций, выполняемых подсистемой q_i ; $O_{q_i} = \{o_s\}$ ($s = \overline{1, k}$) — множество интерфейсов представления функций; $I_{q_i} = \{i_r\}$ ($r = \overline{1, m}$) — множество всех интерфейсов входных данных. Отображение $f_q : \Phi_q \rightarrow O_q$ обладает свойством $\forall \phi_j \in \Phi_q \exists o_s \subset O_q$, а отображение $f_q : \Phi_q \rightarrow I_q$ — свойством $\forall \phi_j \in \Phi_q \exists i_r \subset I_q$. Возможны два случая: 1) функцию представляет только один интерфейс; 2) функцию представляет некоторое конечное число интерфейсов. При этом выходной интерфейс подсистемы

темы q_i должен быть тождественен входному интерфейсу подсистемы q_j . Следовательно, в АСДПП множество входных и выходных интерфейсов $R = I \cup O$, а множество внутрисистемных интерфейсов $\bar{R} = I \cap O$.

На приведение информации j -ой функции к нужному виду (интерфейсу) расходуется время t_s , а для подсистемы q_i , имеющей n интерфейсов, требуется

время $T_{q_j} = \sum_{i=1}^n t_i$. При приведении всех интерфейсов к одной модели представ-

ления данных (гармонизация) время расходуется только на первое преобразование, остальные интерфейсы получаются путем копирования первого. Для всех функций подсистемы q_i приведение к нужному интерфейсу занимает вре-

мя $T_q = \sum_{j=1}^l T_{q_j}$. Для АСДПП в целом затрачивается время $T = \sum_{q=1}^Q T_q$. Таким об-

разом, повышается оперативность работы АСДПП за счет использования еди-

ной модели представления данных (гармонизации): $\sum_{q=1}^Q \sum_{j=1}^l \sum_{i=1}^n t_{qij} > \sum_{q=1}^Q \sum_{j=1}^l t_{qj}$.

Кроме повышения оперативности гармонизация информации позволяет получить положительный эффект и при создании программного обеспечения для ГИС и для АСДПП в целом. При этом может использоваться два вида ресурсов: 1) S_Φ для создания функций; 2) S_R для создания интерфейсов, который подразделяется на ресурс S_A для создания входных интерфейсов и ресурс S_B для создания выходных и внутренних интерфейсов. В случае приведения всех интерфейсов взаимодействия подсистем внутри АСДПП к одной модели представления данных можно программным путем создать один интерфейс, а остальные получить путем его копирования, т.е. снизить трудозатраты на разработку программного обеспечения перспективных АСДПП.

Процедура интеграции информации обеспечивает объединение информации от различных источников и доступ к информационным ресурсам при решении текущих задач диспетчеризации пространственных процессов (ДПП) с использованием ГИС. Интеграция информации не предполагает физического объединения информации у локального пользователя, а заключатся в разработке и реализации специализированных форматов данных, единых для всех подсистем АСДПП. Это позволяет создать текущую онтологию, обеспечивающую единство представления предметной области диспетчеризации в ГИС и программных средствах других подсистем АСДПП.

Процедура слияния информации рассматривается как процесс организации и структуризации информации с целью ее ориентации на решение определенной задачи (группы задач) диспетчеризации пространственных процессов или на конкретного пользователя (диспетчера). В результате слияния информации повышается ее качество и сокращается объем.

Наряду с механизмами гармонизации и слияния информации обоснована необходимость конфигурирования (репрезентации и идентификации структуры объекта при его декомпозиции) представления предметной области диспетчеризации пространственных процессов в виде онтологий (множества объектов и

связей между ними). Целесообразно применительно к предметной области ДПП рассматривать два вида онтологий, содержащих, во-первых, конкретные классы и объекты этих классов, а, во-вторых, — абстрактные классы, соответствующие обобщенным понятиям. На определенном уровне абстракции может быть выделена обобщенная онтология, инвариантная к виду ДПП и описывающая диспетчерскую деятельность в абстракциях, которые в дальнейшем позволяют конкретизировать и адаптировать ее представление к любой области ДПП. Поэтому необходимо унифицировать процесс разработки АСДПП и входящей в нее ГИС и создавать единую сетевую онтологию, порождаемую единственной обобщенной онтологией.

Исходя из сказанного определено, что конкретизированные онтологии диспетчерской деятельности для различных видов ДПП и видов географического пространства изоморфны к обобщенной онтологии, а их структура гомеоморфна. Это положение обосновывается с помощью аппарата категорно-функтурной теории. На основе данной теории представлены структуры конкретизированных и обобщенной онтологий предметной области ДПП:

1. Всякая конкретизированная онтология S предметной области T ДПП рассматривается как алгебраическая система вида

$$T \Rightarrow S : S = \langle R, Y, \Omega \rangle, \quad (1)$$

где: R — множество описаний понятий предметной области; Y — совокупность операций на множестве понятий; Ω — множество отношений между понятиями.

2. Обобщенная онтология S предметной области ДПП на заданном уровне абстракции $I(T)$ имеет вид

$$I(T) \Rightarrow S' : S' = \langle R', Y', \Omega' \rangle. \quad (2)$$

При этом в общем случае $R \neq R'$.

3. Отношения $w_i \in \Omega$ и $w'_i \in \Omega'$ рассматриваются как морфизмы и тогда S — категория, описывающая конкретизированную онтологию, S' — категория, описывающая обобщенную онтологию ДПП. При категорно-функтурном рассмотрении онтология реализуется в виде графа G , в котором вершины — это категории, а дуги — отношения между ними. Отношение S' и S в одной и той же предметной области должно рассматриваться как отображение Φ множества Ω в множество Ω' при ранее определенном соответствии классов R и R' .

4. Онтология предметной области T вида $S = \langle H, \Omega \rangle$, H — конечное множество понятий предметной области при представлении ее как совокупности конкретизированной и обобщенной онтологий есть семейство категорий S' и S с задаваемым биективным функтором $\Phi : \Omega \leftrightarrow \Omega'$.

5. Изоморфность конкретизированных и обобщенной онтологий определяется выполнением необходимых и достаточных условий изоморфности функтора

$$\Phi = [\Omega \cong \Omega'] \Rightarrow \phi(w_1 w_2). \quad (3)$$

Кроме понятий обобщенной и конкретизированной онтологий введены понятия “базовой” и “текущей” онтологий. Базовая онтология — программная реализация совокупности понятий предметной области ДПП и связей между ними. Текущая онтология — программная реализация совокупности понятий предметной области ДПП и связей между ними в ходе диспетчеризации про-

странственных процессов при фактическом функционировании ГИС и АСДПП. Создание и использование базовых онтологий при общем описании предметной области ДПП и оперативное формирование текущих онтологий в процессе функционирования АСДПП с ГИС позволит повысить их эффективность.

Определено, что на базе онтологий должна создаваться типовая программная архитектура ГИС, ориентированных на ДПП. В отличие от традиционной трехуровневой модели обработки информации, используемой в существующих АСДПП СУДС “Росмопорт”, “Виктория” Минтранса РФ и др., предложена шестиуровневая модель, которая реализует процедуры гармонизации, интеграции и слияния информации. Взаимосвязь уровней обработки информации с математическими методами и программным обеспечением показана на рис. 3.

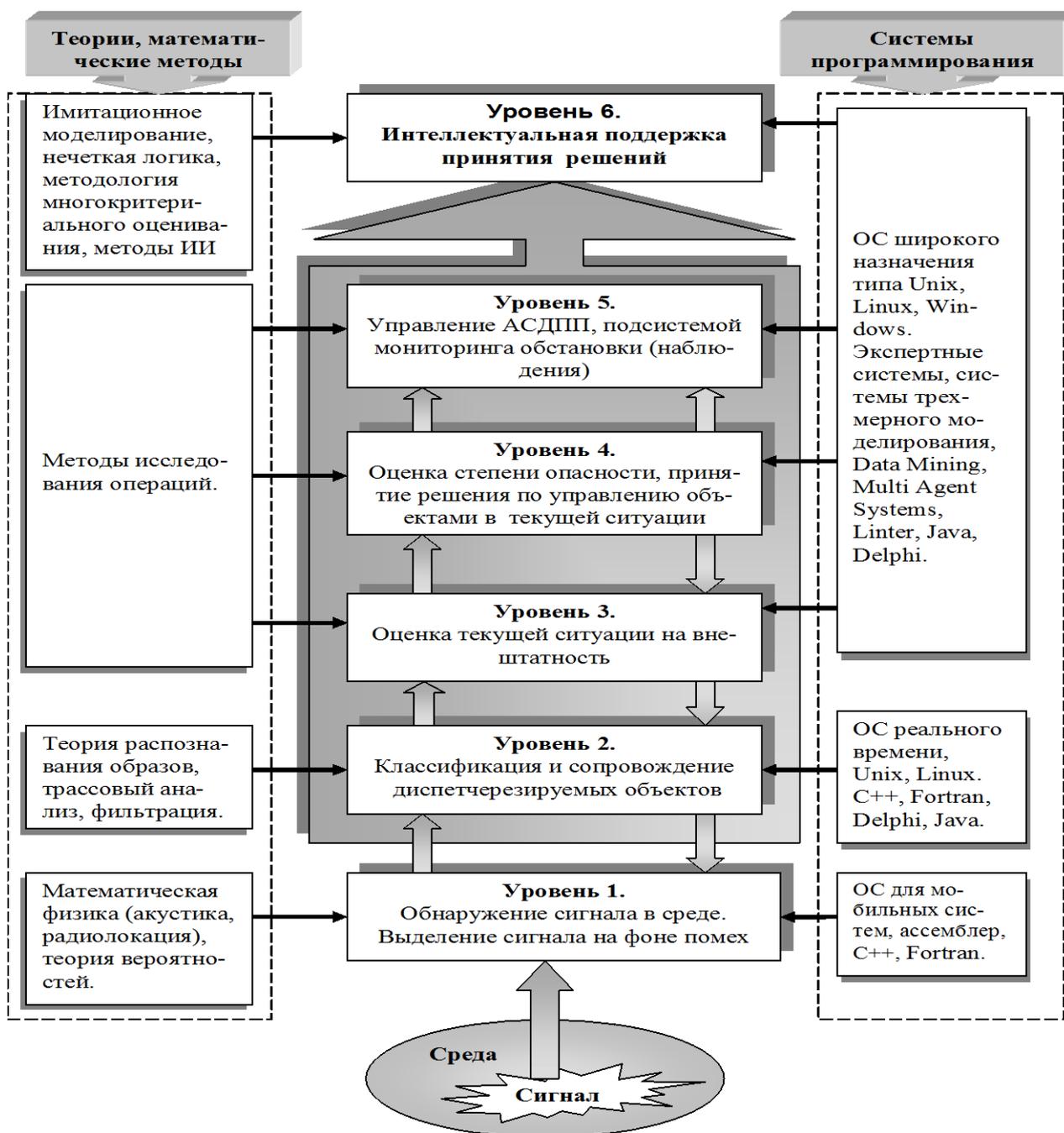


Рис. 3. Взаимосвязь уровней интеграции информации с математическими методами и программным обеспечением

С учетом многоуровневой модели обработки информации разработана информационная технология гармонизации, интеграции и слияния информации. Эта технология представляет собой единый процесс, приведенный на рис. 4. При этом учитывается тот факт, что АСДПП выступает по отношению к ГИС в качестве метасистемы. Это позволяет выявить системные функции и характеристики ГИС как подсистемы АСДПП (внешние по отношению к ГИС).

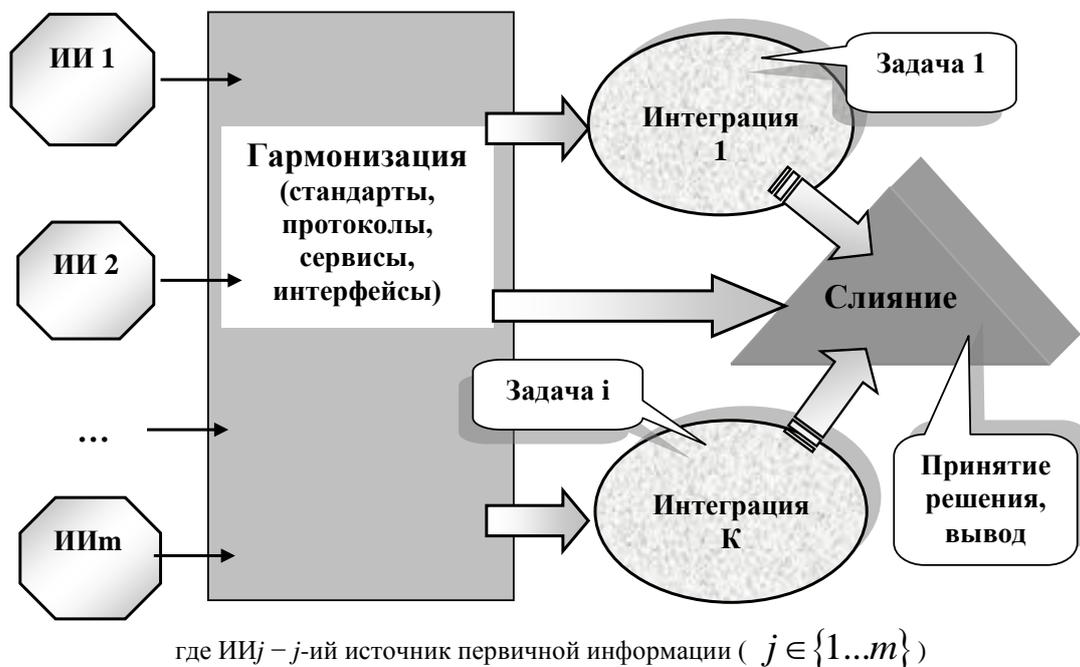


Рис. 4. Обобщенное представление предлагаемой информационной технологии

Исходя из структуры многоуровневой модели обработки информации в АСДПП, обобщены и сформулированы шесть основных и пять дополнительных требований к архитектуре интеллектуализированной ГИС. Установлено, что данным требованиям отвечает технология *Enterprise Application Integration (EAI)*, которая обеспечивает решение всего множества проблем, характерных для современных АСДПП и, прежде всего, ее составная часть — сервис-ориентированная архитектура (*SOA*).

На основе выше указанного тезиса и имеемого в ЛЭТИ и СПИИРАН опыта разработки геоинформационных приложений, интегрирующих в себя средства ИИ, обоснован состав компонент обобщенной архитектуры ГИС, ориентированных на использование в составе АСДПП. В него вошли:

- 1) инструмент разработки баз знаний и редактирования онтологий;
- 2) ГИС-интерфейс;
- 3) сервер картографической информации;
- 4) сервер *JBossRules*, исполняющий роль машины логического вывода;
- 5) сервер администрирования;
- 6) система обмена данными с взаимодействующими системами;
- 7) сервер объектов;
- 8) сервер гидрометеоинформации;
- 9) совокупность математических моделей.

Структура ГИС, состоящей из перечисленных компонент, приведена на рис. 5. Она показала свою работоспособность в ряде разработок, выполненных с участием соискателя.

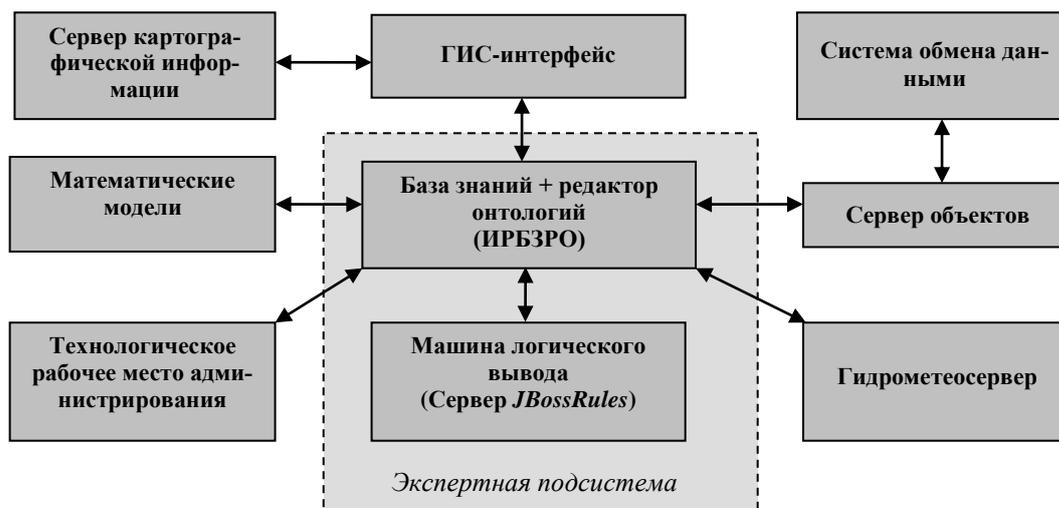


Рис. 5. Пример конкретизации архитектуры интеллектуализированной ГИС

Третья глава — “Информационная технология сценарной репрезентации пространственных процессов в интеллектуализированных ГИС” — включает принципы сценарной репрезентации пространственных процессов, методику сценарной репрезентации знаний о пространственных процессах, средства программной реализации сценарной репрезентации и общую процедуру разработки ГИС с использованием онтологий и сценарной репрезентации знаний о пространственных процессах.

Сформулированы основные принципы сценарной репрезентации (СР) пространственных процессов. Первым из них является принцип своевременного выявления признаков нештатной ситуации при ДПП на основе циркулирующей в ГИС информации. Принципиально решение задачи выявления нештатных ситуаций при ДПП сведено к следующей последовательности процедур:

1. Презентация знаний о ДПП на основе формализованного представления текущей пространственной ситуации.

2. Создание сценария ДПП.

3. Моделирование утвержденного сценария в реальном масштабе времени в ГИС параллельно с фактическим развитием ДПП. В результате в средствах отображения ГИС пространственный процесс должен быть представлен в двух видах: стандартном (эталонном) и реальном (фактическом).

4. Текущий и прогнозный анализ соответствия сценария и реального ДПП.

Второй принцип регламентирует в ГИС построение и использование иерархической системы моделей экспертных знаний в целях выявления нештатных ситуаций. Пусть на множестве моделей экспертных знаний существует модель $M = \{m_i\}$ ($i = \overline{1, n}$) бинарного отношения $r_M = \langle M, R_M \rangle$, $R_M \subseteq M \times M$. Вводится понятие уровня моделирования: m_i является моделью (i - j)-го уровня по отношению m_j ($j = \overline{1, n}$). При этом некоторая упорядоченная пара моделей $\langle m_i, m_j \rangle$

($i > j$) связана отношением моделирования $m_i r_M m_j$. Предполагается, что введенное отношение обладает свойствами рефлексивности, антисимметричности, транзитивности и полноты. Первые три свойства определяют наличие на множестве моделей M частичного (нестроого) порядка, а последнее превращает этот порядок в строгий (линейный).

Третий принцип определяет особенности представления экспертных знаний на каждом из уровней моделирования. Во-первых, содержательная (концептуальная) модель экспертных знаний должна быть представлена в виде онтологии предметной области. Дополнительно должны быть введены положения правоустанавливающих документов, руководств, инструкций и т.п., используемых для описания стандартной пространственной ситуации. Во-вторых, структурно-содержательная модель экспертных знаний, т.е. структура системы понятий в явном виде. В-третьих, структурно-формальная модель экспертных знаний, т.е. формализация содержательной составляющей средствами некоторого формального языка. В-четвертых, формальная модель экспертных знаний (продукционная, сетевая, фреймовая). В-пятых, программная модель экспертных знаний как результат представления формальной модели с помощью соответствующих программных и инструментальных средств. Комплекс моделей должен быть включен в базу знаний ГИС с элементами ИИ, которая и является средством формирования отдельных стандартных пространственных ситуаций и сценариев ДПП.

С использованием сформулированных принципов разработана методика СР знаний о ДПП. Реализация методики проводится в пять этапов, первым из которых является синтез текущей онтологии ГИС из ряда базовых онтологий, ее представление в виде дерева классов, а затем — на языке представления знаний.

Второй этап методики — построение сценария развития ДПП в графических примитивах. В процессе построения сценария каждому графическому примитиву присваивается соответствующее ему действие или преобразование. Затем осуществляется построение схем сценариев моделируемых ДПП с помощью манипулятора. Заканчивается построение созданием экземпляра класса “Сценарий” и заполнения его слотов. При этом последовательно выполняется построение схем частей сценариев моделируемых ДПП, реализация блоков решений в частях сценариев путем создания необходимых подклассов класса “Правило-Решение” для каждой типовой ситуации принятия решения, реализация отдельных действий с использованием подклассов класса “Правило-Действие”.

Третий этап методики — реализация предметных знаний, генерация правил в базе знаний на основе текущей онтологии и схем сценариев. Данный этап полностью автоматизирован. Генерация осуществляется с помощью специального программного приложения на базе редактора онтологий.

Четвертый этап методики, — привязка сценария к конкретному ДПП — имеет целью выявление наличия нештатной ситуации в ДПП. Она осуществляется в процессе использования ГИС при создании каждого нового сценария.

Пятый этап методики — тестирование базы знаний путем проигрывания отдельных действий, решений, частей сценария и сценария в целом. На основе опыта разработки СР для перспективных АСДПП и ГИС определена рациональная архитектура этих программных средств, основой которой является машина логического вывода, построенная на базе алгоритма RETE.

Конкретная реализация архитектуры может быть различной. Примером варианта компоновки программных средств, реализующих архитектуру, может служить набор открытого программного кода Open Sours: Protégé-редактор онтологий, JBossRules- машина логического вывода на базе RETE алгоритма, OpenMap – библиотека ГИС, Groovy- интерпретатор сценариев на язык для виртуальной Java-машины.

В конце третьей главы предложена общая процедура разработки ГИС с использованием онтологий и СР знаний о ДПП (рис. 6).

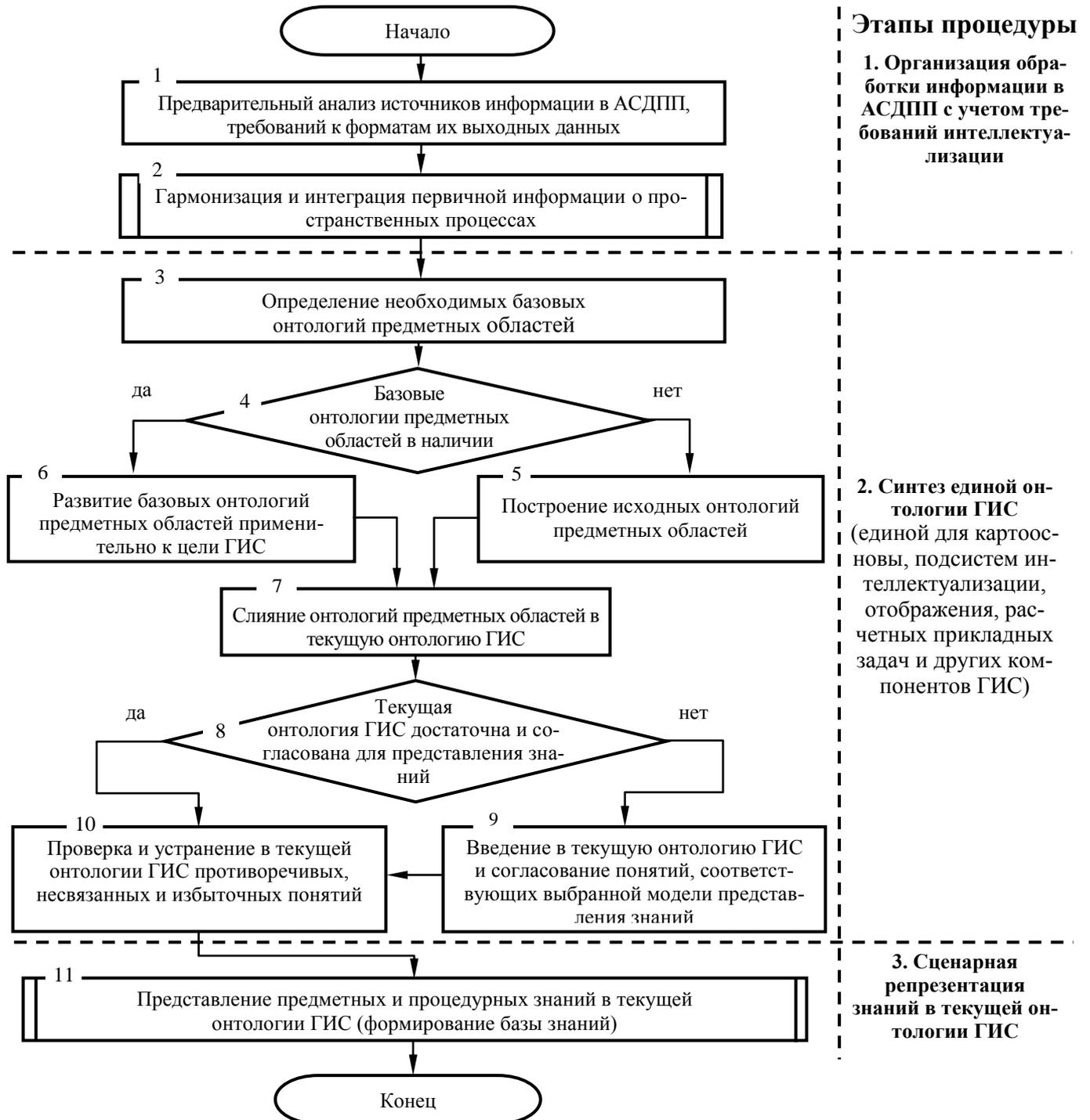


Рис. 6. Обобщенная процедура разработки ГИС, ориентированной на диспетчеризацию пространственных процессов

При этом формулируется база знаний за счет специализированного представления предметных и процедурных знаний о развитии ДПП.

Четвертая глава — “Метод оценки безопасности диспетчеризируемых пространственных процессов в интеллектуализированной ГИС” — содержит обоснование основы оценки степени безопасности ДПП в интеллектуализированных ГИС. Она включает: 1) анализ соотношения эффективности и безопасности пространственных процессов; 2) обоснование целесообразности формализации и количественной оценки понятия “безопасность ДПП” и связанных с ним понятий “штатная (нештатная) пространственная ситуация” на основе понятий неупорядоченности, неорганизованности и полезной информации управления системно-информационного анализа; 3) модели прагматической оценки информации о безопасности пространственных процессов; 4) схему агрегирования частных показателей неорганизованности пространственных ситуаций на основе текущей онтологии ГИС.

Разработка метода имела целью обоснование и разработку комплекса математических моделей и процедур, обеспечивающих: 1) оценку соответствия параметров планируемых пространственных процессов некоторому нормативному уровню безопасности; 2) оценку необходимости корректуры управляемых параметров фактических пространственных процессов в случаях снижения их безопасности ниже некоторого нормативного уровня.

В качестве исходных данных для решения этих задач используется текущая онтология ГИС и технология сценарной репрезентации знаний о пространственных процессах.

Согласно представленной выше технологии сценарной репрезентации пространственных процессов их безопасность в каждый из моментов времени может быть оценена на основе сравнения параметров текущей пространственной ситуации с параметрами той эталонной пространственной ситуации, которая соответствует текущей и представлена в сценарии развития рассматриваемых пространственных процессов. Множество параметров, по которым должно производиться сравнение и оценка степени различия текущих и соответствующих им эталонных ситуаций адекватно описывается текущей онтологией ГИС. Анализ подходов к разработке метода оценки безопасности пространственных ситуаций выявил целесообразность применения в этих целях аксиоматики системно-информационного анализа в трактовке Ю.М. Горского.

Все цели управления рассматриваются только в “узком” смысле. В общем случае цель в “узком” смысле задается в n -мерном пространстве существенных параметров x_1, x_2, \dots, x_n , являющихся частными показателями эффективности системы. Идеальная точечная цель в этом пространстве определяется концом вектора цели $x_{эм}$. Однако на практике в любой области деятельности обычно имеют дело с целями, которые задаются некоторой областью. Причем имеются внешние “опасные” границы, обозначаемые как $l(x_{ог})$ — за ними цели полностью не достигаются, и “внутренние” границы, представляемые в виде $l(x_{вг})$. Определение “ущерба” производится путем оценки неупорядоченности и неорганизованности системы, а также полезной информации управления. Неупорядоченность — это мера различия какого-либо выбранного параметра x_j в отношении эталона порядка $x_{эм}$, которая стремится к нулю при $x_j \rightarrow x_{эм}$. Неоргани-

зованность — это обобщенная за рассматриваемое число ситуаций, временных интервалов характеристика неупорядоченности системы отношении определенных показателей ее функционирования. Полезной информацией являются те характеристики неорганизованности системы и окружающей среды, которые, будучи использованными в исполнительных органах, способны уменьшить неорганизованность функционирования АСДПП в отношении рассматриваемой j -ой цели. На основе аксиоматики системно-информационного анализа в диссертации обоснованы следующие положения:

1. Все цели функционирования АСДПП формулируются в “узком” смысле. За формулировку i -ой цели управления в “узком” смысле понимается ее задание в виде: а) эталонного значения $x_{эм}$, определяющего абсолютное достижение i -ой цели; б) радиуса r_i границы $l(x_{оэ})$ области полного достижения i -ой цели; в) радиуса R_i границы $l(x_{оэ})$ области частичного достижения i -ой цели.

2. Все информационные процессы для их прагматической оценки следует рассматривать только в отношении целей, заданных в узком смысле.

3. Все подцели K_i одной цели K в отношении их влияния на цель делятся на две группы — определяющие ($K_{о_i}$) и дополняющие ($K_{д_i}$). *Определяющая подцель* $K_{о_i}$ — это подцель, полное недостижение которой приводит к полному недостижению цели K , а полное достижение цели K возможно только при полном достижении каждой из этих подцелей $K_{о_i}$. Достижение подцелей $K_{о_i}$ является необходимым условием достижения цели K . *Дополняющая подцель* $K_{д_i}$ — подцель, полное недостижение которой приводит к частичному недостижению цели K . Достижение подцелей $K_{д_i}$ является достаточным условием достижения цели K .

4. В соответствие любой из рассматриваемых подцелей K_i цели K может быть поставлен параметр x_i пространственной ситуации, который является показателем результативности достижения рассматриваемой подцели K_i .

В диссертации обоснована целесообразность принятия в качестве показателя неупорядоченности достижения подцели K_i ДПП оценки вероятности достижения этой подцели в виде:

$$q_i = \frac{\sum_{j=1}^n (x_{ij} - x_{эм_i})^2}{nR_i^2} . \quad (4)$$

где: $x_i - x_{эм_i}$ — абсолютное отклонение показателя x_i от эталона $x_{эм_i}$; q_i — вероятность недостижения цели K_i ; R_i — радиус $l(x_{оэ})$ области определения x_i .

Зависимость (4) определяет вид функции φ в модели $L_Q = \langle \bar{X}, \varphi, \bar{Q} \rangle$ единой шкалы измерения показателей $\{x\}$, что, в свою очередь, дает возможность, абстрагируясь от качественной стороны характеристик пространственных процессов, разработать систему прагматической оценки информационных процессов в АСДПП, а в терминах теории эффективности — определить вид функции ψ полезности достигнутого значения показателя x_i для достижения соответствующей ему подцели K_i обеспечения безопасности этих процессов. В качестве основания для выбора возможных видов функции ψ в шкале $L_O = \langle \bar{Q}, \psi, \bar{O} \rangle$ из-

мерения неорганизованности и в шкале $L_I = \langle \bar{Q}, \psi, \bar{I} \rangle$ измерения информации в диссертации рассматривались данные инженерной психологии и психофизики, в которых формулируется положение о существовании некоторой единой, общечеловеческой системы предпочтений в отношении качества оцениваемых процессов и результатов деятельности. В качестве основной закономерности этой системы предпочтений указывается логарифмический характер зависимости оценок качества процессов от показателей этих процессов.

С учетом указанной закономерности в диссертации обоснована целесообразность определения основных характеристик пространственных ситуаций в следующем виде:

1. Абсолютная неупорядоченность y_i^a по i -му показателю как вероятность q_i (1) недостижения сформулированной в “узком” смысле цели K_i

$$y_i^a = q_i, \quad (5)$$

где эталон порядка $q_{\varepsilon mi} = 0$ при $x_i = x_{\varepsilon mi}$.

2. Сравнительная неупорядоченность y_i^c по i -му показателю как

$$y_i^c = \frac{q_i}{\varepsilon(q)} - 1, \quad (6)$$

где: $\varepsilon(q)$ — q на границе $l(x_{\varepsilon z})$ области полного достижения цели K_i

3. Единичная неорганизованность O_i по i -му показателю как

$$O_i = \log_2 \frac{q_i}{\varepsilon(q)}. \quad (7)$$

При $q_i < \varepsilon(q)$ величина y_i^c отрицательна, и понятие неорганизованности теряет смысл. В данном случае пространственный процесс по показателю x_i полностью организован и имеет место, так называемая, избыточная упорядоченность. В диссертации обосновано, что для ДПП избыточную упорядоченность следует считать полезной при оценке в (5) абсолютной неупорядоченности y_i^a и бесполезной при оценке сравнительной неупорядоченности и неорганизованности, т.е. при $q_i < \varepsilon(q)$ в (6,7) следует принимать $q_i = \varepsilon(q)$.

Пусть безопасность текущей пространственной ситуации оценивается по i -ому показателю, характеризующемуся абсолютной неупорядоченностью $q_i \geq \varepsilon(q_i)$.

Если цель АСДПП формулируется как обеспечение безопасности пространственных процессов, т.е. как исключение возможности возникновения опасных ситуаций, то качество организации рассматриваемого пространственного процесса оценивается относительно опасной ситуации, характеризуемой $q_i^{on} = 1$, по формуле

$$I_i^{on-тек} = O_{on} \iff O_{тек} = \log_2 \frac{1}{q_i}, \text{ где } \varepsilon(q) > 0. \quad (8)$$

Показатель (8) может быть использован для классификации рассматриваемой текущей ситуации как “штатной” или “нештатной” путем задания условно опасной границы (УОГ) достижения цели K_i . УОГ задается экспертами, исходя

из особенностей рассматриваемых пространственных процессов, путем задания некоторого значения $q_i^{on} > q_i^{um} \geq \varepsilon(q)$ до достижения которого течение рассматриваемого пространственного процесса рассматривается как “штатное”, а при превышении – как “нештатное”. Другими словами, при $q_i > q_i^{um}$ неорганизованность пространственного процесса рассматривается как недопустимая, а полезность управляющих воздействий, оцениваемая по (8), – как недостаточная. Соответственно, при $q_i > q_i^{um}$ и сама текущая пространственная ситуация рассматривается как “нештатная” и требующая корректуры.

Тогда оценка “штатности” текущей пространственной ситуации на основе (8) сводится (рис. 7):

1) к оценке количества полезной информации реализуемой средствами АСДПП на УОГ (q_i^{um}) достижения цели ее функционирования

$$I_i^{on-um} = O_{on} \Leftrightarrow O_{um} = \log_2 \frac{1}{q_i^{um}}, \text{ где } \varepsilon(q) > 0. \quad (9)$$

2) к оценке “штатности” текущей ситуации по критерию

$$\begin{cases} I_i^{on-тек} \geq I_i^{on-um} & \text{– штатная ситуация,} \\ I_i^{on-тек} < I_i^{on-um} & \text{– нештатная ситуация} \end{cases}. \quad (10)$$

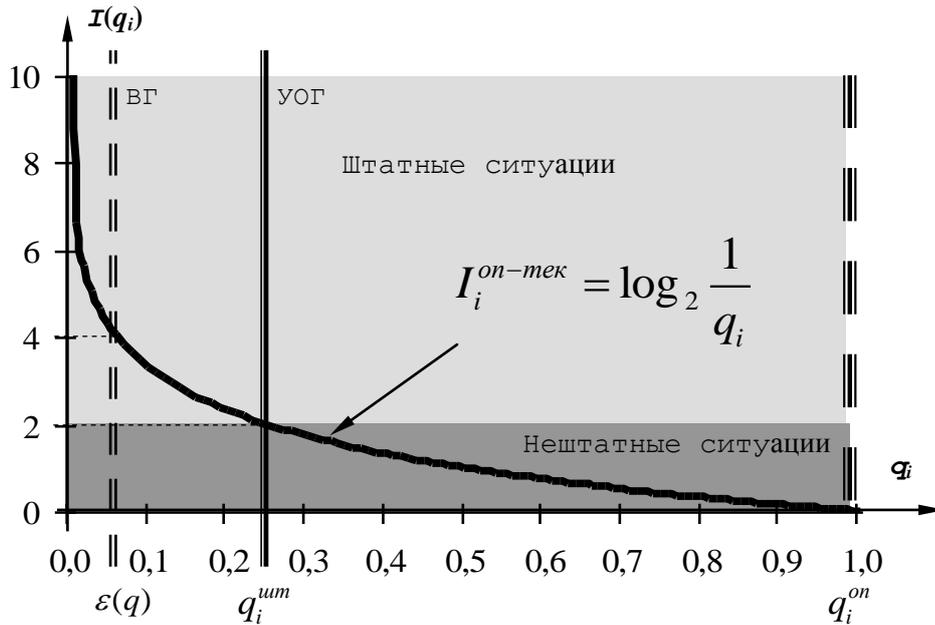


Рис. 7. Идентификация “штатных” и “нештатных” ситуаций по критерию (10) при $q_i^{um} = 0,25$

Если цель АСДПП формулируется как обеспечение “штатного” ($q_i \leq q_i^{um}$) протекания пространственных процессов, то оценка осуществляется относительно неорганизованности “штатной” ситуации и определяет дефицит в АСДПП полезной управляющей информации

$$I_i^{тек-um} = O_{тек} \Leftrightarrow O_{um} = \log_2 \frac{q_i}{q_i^{um}}. \quad (11)$$

При таком подходе оценка “штатности” текущей ситуации (рис.8) осуществляется по критерию

$$\begin{cases} I_i^{\text{тек-шт}} \leq 0 & - \text{штатная ситуация,} \\ I_i^{\text{шт-тек}} > 0 & - \text{нештатная ситуация} \end{cases} \quad (12)$$

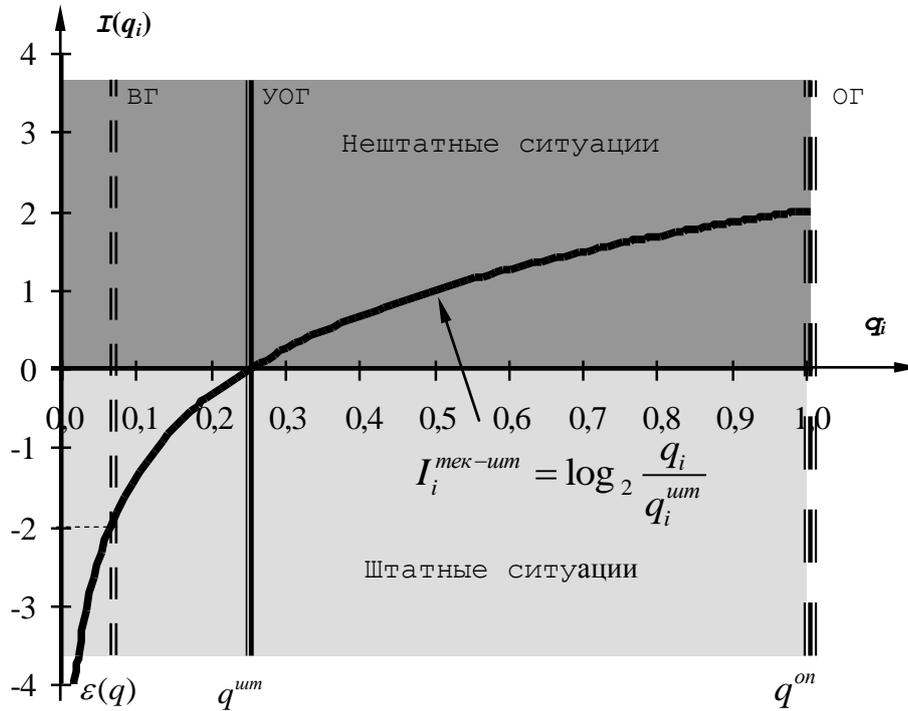


Рис. 8. Идентификация “штатных” и “нештатных” ситуаций по критерию (12) при $q_i^{\text{шт}} = 0,25$

Полезную информацию по всему комплексу параметров пространственной ситуации целесообразно определить на основе понятий определяющей (K_{o_i}) и дополняющей (K_{∂_i}) подцелей. Тогда вероятность q недостижения цели K определится известным выражением

$$q^{\text{тек}} = 1 - \left[\prod_{i=1}^l (1 - q_{o_i}) \right] \left(1 - \sum_{i=l+1}^n m_i q_{\partial_i} \right), \text{ при } \sum_{i=l+1}^n m_i \leq 1, \quad (13)$$

где: q_{o_i}, q_{∂_i} – q_i определяющих и дополняющих подцелей; m_i – вес дополняющей подцели.

При подстановке $q^{\text{тек}}$ в (11,12) можно получить оценки, обобщенные по всему множеству рассматриваемых показателей.

Приведенные выше модели обеспечивают оценку качества управления пространственными процессами при любом конечном множестве их учитываемых характеристик, что определяет целесообразность их применения для оценки текущих пространственных ситуаций в ГИС. Однако рассмотренные процедуры имеют одно ограничение, которое связано со структурой оцениваемых характеристик (показателей). Суть этого ограничения состоит в том, что в (13) все объединяемые неупорядоченности рассматриваются как одноуровневые, т.е. принадлежащие к одному уровню иерархии. Данное ограничение не соот-

ветствует природе пространственных ситуаций, которая характеризуется иерархической структурой используемых для ее описания понятий, а значит и иерархической структурой показателей, позволяющих идентифицировать и оценивать рассматриваемую ситуацию.

Оцениваемая пространственная ситуация описывается текущей онтологией ГИС, которая графически может быть представлена в виде упорядоченного графа — дерева. Представление текущей онтологии ГИС в виде дерева классов позволяет описать эту онтологию на языке представления знаний в соответствующих специализированных программных средах ИИ (например: CLIPS, JEES, Prolog, Lisp, JBossRules и др.). Если в описании каждого из понятий определить необходимость его использования для оценки организованности пространственного процесса, указать соответствующий показатель и характер влияния его неупорядоченности и неорганизованности на стоящие на более высоком уровне иерархии понятия, то сама текущая онтология ГИС определит иерархическую структуру показателей неупорядоченности пространственной ситуации. Данное свойство онтологии позволяет применить для оценки “штатности” пространственных ситуаций известный в теории эффективности принцип “вложения” показателей.

Пусть вершина B_{ij} , расположенная на j -ом уровне иерархии онтологии (рис. 9), раскрывает ее i -ую частную характеристику, оцениваемую показателем $T_{k,j-1}$, представленным вершиной $B_{k,j-1}$. Вершина B_{ij} характеризуется показателем T_{ij} , включающем в себя более частные показатели, представленные множеством вершин $\{B_{r,j+1}\}$. Вершина B_{ij} принадлежит пучку связей с корневой вершиной $B_{k,j-1}$ и множеством порожденных вершин $\{B_{ij}\} (i = \overline{1, n})$ и порождает пучок связей с множеством вершин $\{B_{r,j+1}\} (i = \overline{1, m})$.

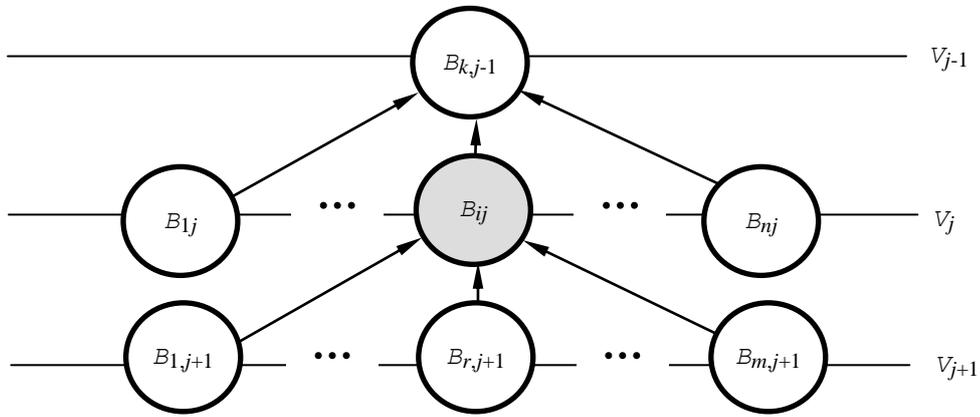


Рис. 9. Принцип организации показателей на упорядоченном графе (дереве)

В диссертации обосновано, что для приведенной на рис. 9 структуры, принцип вложения можно представить в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} Q(B_{ij}) &= Q[m(B_{ij}), s(M_{j+1}^{ij})] && \text{для } \forall B_{ij} \in \{B_k\}; \\ Q(B_{ij}) &= Q[m(B_{ij}), s(B_{ij})] && \text{для } \forall B_{ij} \notin \{B_k\}; \\ Q(B_{01}) &= s(M_1^{01}) \end{aligned} \right\}, \quad (14)$$

где: $Q(B_{ij})$ – обобщенная оценка качества в вершине B_{ij} ; M_{j+1}^{ij} – множество вершин $B_{l,j+1}$, принадлежащих пучку связей с корневой вершиной B_{ij} ; $s(M_{j+1}^{ij})$ – вложенное качество вершины B_{ij} , измеряемое показателями, характеризующими вершины $B_{l,j+1} \in M_{j+1}^{ij}$; $\{B_{\kappa}\}$ – множество корневых вершин; B_{01} — исходная вершина дерева, $m(B_{ij})$ – значимость показателя оценки $Q(B_{ij})$ при его агрегировании в показатель более высокого уровня, для которого выполняется условие

$$\exists M_{j+1}^{ij} \left(M_{j+1}^{ij} \in D \right) \wedge \{Q(B_{ij})\} \left(B_{ij} \in M_{j+1}^{ij}; i = \overline{1, n} \right) \rightarrow \bigcup_{i=1}^n m(B_{ij}) = a, \quad (15)$$

где под $\bigcup_{i=1}^n m(B_{ij}) = a$ понимается необходимость выполнения некоторого правила a оценки значимости объединяемых показателей.

Тогда, если показатели, которые характеризуют конечные вершины дерева, представлены в одной и той же количественной шкале, оценка любого корневого показателя дерева сводится к

$$s(M_{j+1}^{ij}) = \bigcup_{i=1}^n m_{i,j+1}^{ij} Q(B_{l,j+1}^{ij}) = F\left(Q(B_{l,j+1}^{ij}), m_{i,j+1}^{ij}\right) \text{ при } \bigcup_{i=1}^n m(B_{ij}) = a, \quad (16)$$

где: $B_{l,j+1}^{ij}$ – вершины, которые входят в пучок M_{j+1}^{ij} , образуемый корневой вершиной B_{ij} ; $Q(B_{l,j+1}^{ij})$ – значения показателей в вершинах $B_{l,j+1}^{ij}$; $m_{i,j+1}^{ij}$ – значимость этих показателей при их агрегировании в показатель более высокого уровня.

Другими словами, если структура частных показателей представлена в виде дерева, построение системы вложенных показателей сводится к определению в (16) вида функции $F\left(Q(B_{l,j+1}^{ij}), m_{i,j+1}^{ij}\right)$, обеспечивающей корректность агрегирования некоторого конечного множества одноуровневых частных показателей. Данному требованию и отвечает функция (13), которая: 1) обеспечивает агрегирование любого конечного множества одноуровневых частных показателей; 2) определяет корректную процедуру агрегирования частных показателей с учетом их значимости для показателя более высокого уровня иерархии. Единственным препятствием для применения (13) в отношении текущей онтологии ГИС, является наличие в ней вершин (понятий), которые не влияют на оценку организованности рассматриваемой пространственной ситуации. Для устранения этого препятствия достаточно при описании таких вершин идентифицировать их как дополняющие показатели с весом $m_i = 0$.

Разработанный метод соответствует своему целевому предназначению и обеспечивает решение задачи оценки безопасности текущих пространственных процессов и задачи рационального планирования пространственных процессов.

Пятая глава — “Комплекс квалиметрических методик формирования системы показателей качества для оценки онтологии интеллектуализированной ГИС” — включает общие положения об оценке качества проекта онтологии ГИС как совокупности ее свойств и ряд методик: 1) определения состава показателей качества проекта онтологии ГИС, 2) определения вида групповых и инте-

грального показателей, 3) построения иерархической сети показателей, 4) структурной адаптации иерархической сети показателей, 5) оценки значимости и удаления малозначимых показателей, 6) учета нечеткости информации о показателях качества проекта онтологии ГИС.

Качество онтологии ГИС рассматривается как совокупность свойств, оцениваемая интегральным показателем. При этом некоторые свойства оцениваются единичными, а некоторые — групповыми показателями. Установлено, что отдельные оценочные методы и методики целесообразно использовать как некоторые индикаторы недостатков проекта онтологии ГИС, которые должны быть устранены в процессе создания и сопровождения. Из сказанного следует, что предложить универсальную совокупность частных и групповых показателей, образующих интегральный показатель “качество онтологии ГИС”, не представляется возможным. Следовательно необходим подход, который позволил бы для каждого конкретного проекта онтологии ГИС эффективно синтезировать совокупность разноуровневых показателей, адекватно оценивающих качество конкретного проекта онтологии ГИС. Для выработки значений единичных, групповых и интегрального показателя качества проекта онтологии ГИС необходим комплекс квалиметрических методик, позволяющих создавать иерархическую сеть частных показателей, а затем агрегировать их в интегральный показатель. Разработанный в диссертации комплекс методик базируется на методологии оценки качества программного обеспечения Боэма и ее развитии для баз знаний ЭС.

Комплекс методик, во-первых, включает методику определения состава показателей качества проекта онтологии ГИС. Принято, что интегральный показатель качества проекта онтологии ГИС должен иметь вид

$$Y = f(y_1(c_1), y_2(c_2), \dots, y_i(c_i), \dots, y_n(c_n)), \quad (17)$$

где: $y_i(c_i)$ ($i = \overline{1, n}$) — оценка качества по i -му элементарному показателю c_i ; n — число элементарных показателей у онтологии ($n < \rho$); ρ — общее число частных показателей, анализируемых при оценке качества онтологии.

Состав частных показателей, определяющих форму интегрального показателя, зависит от используемых шкал, возможности их нормирования и математической формы интегрального показателя. Наиболее широкое разнообразие возможных эквивалентных шкал измерения частных (единичных и групповых) показателей может быть получено при любом монотонном преобразовании $\varphi: R \rightarrow R$ исходной шкалы действительных чисел R .

Оценки $Y = \{y_i\}$ ($i = \overline{1, n}$) частных показателей в произвольной шкале $\varphi(R)$, индуцированной монотонным преобразованием $\varphi: R \rightarrow R$, могут быть представлены в виде $\tilde{q}_i = \tilde{q}(y_i)$. При этом $q(y_i) = N(y_i)$, $y_i \in R$, $N(y_i) \in \overline{\{0, n\}}$, где $N(y_i) \in \overline{\{0, n-1\}}$ — число проектов онтологии ГИС, имеющих значения $q(y_i)$ меньше, чем у j -го проекта онтологии. Если интерпретировать оценки $Y = \{y_i\}$ ($i = \overline{1, n}$) как реализации некоторой случайной величины \hat{y} , имеющей функцию распределения $F(y, \hat{y})$, то монотонное преобразование $\varphi: R \rightarrow R$ можно пред-

ставить в виде $\tilde{q}_i = F(y, \hat{y})$, $y \in R$. При выполнении условий $\mu = M(\hat{y})$, $\sigma^2 = D(\hat{y})$ можно получить значение частного показателя $q(y) = \frac{1}{\sigma} y - \frac{\mu}{\sigma}$.

Показано, что при возникновении необходимости сравнения значения у показателя с эталоном y_0 , следует использовать выражение $q(y) = \frac{y}{y_0}$, $y, y_0 \in R$, $y_0 > 0$, которое учитывает как степень несовпадения, так и его направление. Пусть заданы некоторые эталонные значения $y = y_-$ и $y = y_+$, $y_- < y_+$. Тогда может быть использован простейший кусочно-линейный частный показатель вида

$$q(y) = \begin{cases} 0, & \text{при } y \leq y_- \\ \frac{y - y_-}{y_+ - y_-} & \text{при } y_- < y \leq y_+ \\ 1, & \text{при } y > y_+ \end{cases}, \quad (18)$$

монотонно неубывающий при росте уровня исследуемого свойства, т.е. его увеличение вызвано повышением уровня оцениваемого свойства. В случае, если увеличение показателя вызвано понижением уровня оцениваемого качества, то может быть использован частный показатель вида

$$q(y) = \begin{cases} 1, & \text{при } y \leq y_- \\ \frac{y_+ - y}{y_+ - y_-} & \text{при } y_- < y \leq y_+ \\ 0, & \text{при } y > y_+ \end{cases}, \quad (19)$$

монотонно невозрастающий при росте уровня исследуемого свойства.

Установлено, что основным практическим результатом выбора монотонных преобразований частных показателей проекта онтологии ГИС является переход от вектора $y = (y_1, \dots, y_m)$, $y_i \in R$, в котором все показатели измерены в различных шкалах, к вектору нормированных частных показателей $\tilde{q} = (\tilde{q}_1, \dots, \tilde{q}_m)$, $\tilde{q}_i \in [0, 1]$, где все показатели представлены в одной и той же шкале. Последнее обеспечивает корректность процедуры агрегирования частных показателей. При этом все показатели должны измеряться в шкале (0-9) и упорядочиваться по степени их влияния на качество онтологии ГИС в целом. Интегральный показатель в операторной форме, примет вид

$$Y = \hat{F}^1, \dots, \hat{F}^i, \dots, \hat{F}^m (y_1(c_1), \dots, y_n(c_n)), \quad (20)$$

где оператор $\hat{F}^m : y^{i+1} \rightarrow y^m$, что предполагает многоуровневую группировку частных показателей, т.е. реализацию принципа “вложения” показателей “снизу вверх”.

Вторая методика разработана для определения вида групповых и интегральных показателей качества онтологии ГИС. При этом обоснован ряд ограничений на вид агрегируемых показателей: существования, непрерывности, независимости

по приращению и предпочтению. Выполнение этих ограничений позволяет представить интегральный показатель качества онтологии ГИС в аддитивной

$Y(C_n) = \sum_{i=1}^n y_i(c_i)$, в нормированной аддитивной $Y(C_n) = \sum_{i=1}^n k_i y_i(c_i)$ и в мультипли-

кативной $Y(C_n) = \prod_{i=1}^n y_i(c_i)$ формах. Экспериментальная проверка валидности мето-

додики показала, что число единичных показателей, агрегируемых в групповые, для разных вариантов онтологии ГИС различно и находится в пределах от 30 до 50. Результаты эксперимента показали, что при независимости двух единичных показателей все групповые и интегральный показатели качества онтологии ГИС могут быть представлены в виде нормированных аддитивных показателей.

Третья методика позволяет построить иерархическую сеть показателей качества онтологии ГИС. Синтез сети показателей осуществлен путем опроса экспертов о структуре связей показателей, построения на этой основе сетевой структуры с последующей ее адаптацией к конкретным условиям оценивания качества онтологии ГИС (четвертая методика). В ходе опроса экспертов формируются исходные матрицы предпочтений $\|a_{ij}^k\|$ экспертов, на их основе синтезируется промежуточная матрица $\|z_{ij}\|$ группового мнения экспертов и строится матрица строгого порядка $\|d_{ij}\|$, которая определяла отношения доминирования. На основе последней синтезируется структура G иерархической сети показателей качества онтологии ГИС. При этом обосновано, что вероятность того, что из k экспертов r выскажется за отношение строгого порядка между множеством показателей распределена по нормальному закону. Это позволяет использовать стандартный аппарат проверки вероятностного вывода для испытаний Бернулли, где число испытаний равно числу k экспертов.

Исходя из сказанного, найдено граничное число экспертов S_k , высказавшихся за отношение строгого порядка из всего числа k экспертов, которое позволяет с заданной степенью риска α определять это отношение (принято $\alpha=0,1$), т.е.

$$S_k \geq \frac{1}{m} [K + t_\alpha \sqrt{K(m-1)}], \quad (21)$$

где: m — число исходов, K — общее число экспертов, участвующих в опросе, t_α — квантиль нормального распределения.

Определено правило преобразования промежуточной матрицы $\|z_{ij}\|$ в матрицу строгого порядка $\|d_{ij}\|$, которая описывает полную структуру G иерархической сети показателей качества онтологии ГИС. Таким образом, сеть показателей качества онтологии ГИС представляет собой двойку $G = \langle C, U \rangle$, где C — множество вершин, соответствующих показателям, U — множество дуг сети, соответствующих отношениям строгого порядка $\|d_{ij}\|$, но без транзитивно замыкающих, которые удовлетворяют условию $\forall c_i, c_j, c_k \in C ((c_i \prec c_j) \& (c_j \prec c_k) \& (c_i \prec c_k))$, где знак “ \prec ” есть отношение доминирования.

Четвертая методика позволяет проводить структурную адаптацию иерархической сети показателей качества к оценке экспертом конкретного проекта онтологии ГИС. Учтено, что для эксперта предельное число альтернатив не должно

превышать числа Ингве-Миллера $\xi = 7 \pm 2$. Адаптация сети G к условиям восприятия эксперта осуществляется путем введения ряда мнимых вершин в декомпозицию сложного показателя путем расщепления вершины c_i с целью группировки дочерних вершин с числом меньшим ξ . Процесс группировки реализован на основе метода кластерного анализа с использованием признака “расстояния” между одноранговыми показателями в определенном матричном пространстве $\bar{\rho}[y(c_i), y(c_j)]$. При этом должно быть установлено “расстояние”, при котором два показателя можно считать близкими. Введены понятия “непосредственного” и “системного” признаков. Первые имеют строгую физическую трактовку и могут быть оценены объективными методами (их мало). Вторые — только косвенными методами в ходе моделирования процесса использования онтологии ГИС.

Сформулированы требования к метрике $\bar{\rho}[y(c_i), y(c_j)]$: 1) расстояние от показателя качества до самого себя минимально $\bar{\rho}[y(c_i), y(c_j)] \geq \bar{\rho}[y(c_i), y(c_i)]$; 2) расстояние от показателя $y(c_i)$ до показателя $y(c_j)$ равно расстоянию от $y(c_j)$ до $y(c_i)$, то есть $\bar{\rho}[y(c_i), y(c_j)] = \bar{\rho}[y(c_j), y(c_i)]$; 3) расстояние между двумя показателями, измеренное по прямой, короче расстояния, измеренного по любой другой линии. Выбор конкретного типа метрики осуществляется исходя из семантического значения показателей и особенностей конкретной реализации проекта онтологии ГИС. Процесс кластеризации показателей – это многошаговый процесс объединения ряда показателей в кластеры по степени их близости в соответствии с признаком группировки, которым является значение E обоснованности связи, определяемое экспертным путем. Расстояние между кластерами определяется на одномерном пространстве (прямой) с линейной метрикой $\bar{\rho}(E_i, E_j) = |E_i - E_j|$. Пошаговая группировка показателей по множеству связей U_{ij} осуществляется либо по известному правилу с использованием алгоритмов “ближнего соседа”, “дальнего соседа” или “средней связи”, либо по специально адаптированной формуле пошаговой группировки. Графически результаты иерархической группировки представляются в виде дендрограммы.

Пятая методика направлена на оценку значимости показателей качества онтологии ГИС и удаления малозначимых показателей из структуры иерархической сети G . В ней использован метод анализа иерархий, позволяющий рассчитывать вектор, характеризующий порядок предпочтительности показателей ближайшего верхнего уровня. Следовательно, для каждой декомпозиции структуры сети показателей G необходимо (путем экспертного опроса и попарного сравнения) сформулировать на базе специальной шкалы относительной важности (табл. 2) матрицу $V = \|V_{ij}\|$ парных сравнений важности дочерних вершин, где V_{ij} - сравнительная оценка важности (“веса”, “интенсивности”) участия i -го показателя перед j -м в композиционно общем для них показателе.

Задача нахождения степени композиционного взаимодействия простых показателей в составе сложных сведена к нахождению собственного вектора W матрицы V , элементы $w_i \in W$ которого являются локальными приоритетами данной композиции показателей.

Шкала парных сравнений

Оценка важности	Качественная оценка	Смысловая интерпретация
1	Равная важность	Равный вклад двух показателей в композиционно сложный показатель (свойство, характеристику)
3	Слабое превосходство	Опыт и суждения экспертов дают предпочтение одному показателю (характеристике) перед другим
5	Существенное или сильное превосходство	Опыт и суждения экспертов дают надежные доказательства существенного превосходства одного показателя над другим
7	Очевидное (значимое) превосходство	Существуют убедительные свидетельства в пользу большей важности одного показателя по сравнению с другим, что становится практически значительным
9	Абсолютное (очень сильное) превосходство	Максимально подтверждается предпочтительность одного показателя перед другим, что в высшей степени убедительно
2, 4, 6, 8.	Промежуточные значения между соседними оценками	Применяются в компромиссном случае

Предложена формула определения оценки собственного вектора матрицы V в виде

$$W_i = \frac{\sqrt[n]{\prod_{j=1}^n V_{ij}}}{\sum_{i=1}^n \left(\sqrt[n]{\prod_{j=1}^n V_{ij}} \right)}, \quad (22)$$

где n - размерность матрицы парных сравнений.

По собственному числу матрицы парных сравнений $D_{\max} \approx \sum_{j=1}^n \left[\left(\sum_{i=1}^n V_{ij} \right) w_i \right]$,

определяются индекс согласованности $ИС = \frac{(D_{\max} - n)}{n - 1}$ и отношение согласо-

ванности $ОС = \frac{ИС}{\bar{\eta}} * 100\%$ ($\bar{\eta}$ - случайная согласованность матрицы $\|V_{ij}\|$ по-

рядка n), при этом величина $ОС$ должна быть не более 10-20%. На основе локальных приоритетов, удовлетворяющих требованиям достаточной согласованности, определяются глобальные приоритеты каждого показателя $c_i \in C$ в иерархической сети G , которые показывают степень влияния свойства онтологии ГИС на ее качество.

Шестая методика — это методика учета нечеткости исходной информации о показателях качества онтологии ГИС, реализуемая на основе опроса экспертов, мнения которых имеют качественный нечеткий характер. Для этого использована теория нечетких множеств. Экспертам предложено оперировать при оценке единичных показателей терминами, приведенными в табл. 3.

Таблица 3

Шкала оценивания элементарных показателей (свойств)

Числовое значение	Определение	Объяснение
0	Несовпадение	Очевидное полное несовпадение
1	Слабое совпадение	Совпадение практически незаметно нет уверенности в нем
3	Умеренное совпадение	Существуют недостаточно убедительные показания о совпадении
5	Существенное или сильное соответствие	Существенное совпадение альтернатив, существуют хорошие доказательства и логические критерии, которые указывают на это
7	Значительное соответствие	Существуют убедительные свидетельства совпадения альтернатив
9	Абсолютное соответствие	Свидетельство в пользу совпадения в высшей степени убедительно
2, 4, 6, 8	Промежуточные значения между соседними значениями	Компромиссный случай

На базе числовых значений шкалы путем экспертного опроса заданы функции принадлежности $\mu(U)$, описывающие значения лингвистической переменной B = “совпадение с потенциальным качеством” в T и π формах. Результаты определения параметров функций принадлежности $\mu_T^B(U)$, где T – числовое значение термина; a – коэффициент, b^\wedge – расстояние между точками перехода, т.е. точками, в которых функция $\mu_T^B(U) = \exp(-a(T-U)^2)$ при $a = 4Ln \frac{0,5}{b^\wedge^2}$ принимает значение 0,5, приведены в табл. 4.

Таблица 4

Значения функций принадлежности термов лингвистической переменной B = “совпадение с потенциальным качеством” для шкалы оценивания единичных показателей

№ п/п	Терм-множество B^\wedge	Параметры функций принадлежности			
		T	b^\wedge	a	$\mu_T^B(U)$
1	“слабое”	1	$\approx 0,46$	$\approx -13,1$	$\mu_T^B(U) = e^{-13,1(1-U)^2}$
2	“умеренное”	3	$\approx 1,38$	$\approx -1,46$	$\mu_T^B(U) = e^{-1,46(1-U)^2}$
3	“существенное”	5	$\approx 2,80$	$\approx -0,35$	$\mu_T^B(U) = e^{-0,35(1-U)^2}$
4	“значительное”	7	$\approx 3,22$	$\approx -0,27$	$\mu_T^B(U) = e^{-0,27(1-U)^2}$
5	“абсолютное”	9	$\approx 4,14$	$\approx -0,16$	$\mu_T^B(U) = e^{-0,16(1-U)^2}$

Значения оценок вышестоящих показателей определяются по значениям локальных или глобальных приоритетов с использованием урвневых множеств,

базирующихся на монотонном характере изменения $\mu_T^B(U)$, когда каждый участок монотонности может быть описан конечным числом точек.

Показано, что при анализе и интерпретации результатов оценки качества онтологии ГИС в условиях нечеткости возможны два принципиальных случая наложения рассчитанной кривой функции принадлежности оценки на шкалу термов: 1) оцениваемая онтология ГИС по анализируемому показателю лучше слабо совпадающей с идеальной, но хуже умеренно совпадающей; 2) оцениваемая онтология ГИС имеет количественные характеристики рядом стоящих термов, определяемые пересечением рассчитанной кривой функции принадлежности с ними, например, $B^{\wedge} = \{ \text{“умеренно”}/0,7; \text{“существенно”}/0,6 \}$.

Следовательно, данная методика позволяет: 1) принять решение о качестве проекта онтологии ГИС в условиях нечеткости исходной информации; 2) обеспечить качественную интерпретацию результатов количественной оценки качества онтологии ГИС в рамках принятой терминологической нотации термов лингвистической переменной $B = \text{“совпадение с потенциальным качеством”}$; 3) количественно анализировать и учитывать степень нечеткости получаемых оценок качества онтологии ГИС; 4) оперировать при работе с экспертами лингвистическими переменными.

Шестая глава — “Методика планирования процесса разработки онтологий интеллектуализированной ГИС и оценка эффективности результатов исследования” — включает, во-первых, обоснование выбора метода планирования процесса разработки онтологии ГИС, модели и алгоритмы выработки текущей стратегии проектирования онтологии ГИС, методику планирования процесса разработки онтологии для ГИС. Во-вторых, в этой главе приводятся результаты реализации положений, выводов и рекомендаций диссертационного исследования в программно-аппаратном комплексе (ПАК) “Онтомап”, а также экспериментальная оценка эффективности полученных результатов диссертационной работы.

Обоснованы основные требования к стратегии проектирования онтологии ГИС: 1) линейность процесса проектирования, 2) объективизация процесса проектирования, 3) разделение работы проектировщиков на поиск рациональных вариантов онтологии и на осуществление контроля и оценки самой схемы стратегии проектирования, 4) рассмотрение двух сторон процесса проектирования: отображения результатов проектирования как для заказчика, так и для разработчиков. Исходя из названных требований выбран метод комплексного системного проектирования. Реализация принципов комплексного системного проектирования может быть осуществлена на базе использования методов аналитического планирования. Определено основное содержание каждого из 9 методов, их параметры и форма аналитического результата.

Установлена целесообразность использования простых и сложных стратегий проектирования онтологии ГИС. Первые нацелены на достижение заданного значения частного показателя качества онтологии ГИС в ходе многоэтапного ее улучшения. Вторые используют результаты работы экспертов, осуществляющих оценку качества текущей реализации онтологии ГИС в целом. Обосновано, что при проектировании онтологии ГИС должны быть использованы два вида аналитического планирования: 1) прямое – от существующего качества онтологии к желаемому, 2) обратное – обеспечение кратчайшего пути достижения желаемого качества онтоло-

гии ГИС. Осуществлена постановка задачи оптимизации планирования процесса комплексного системного проектирования онтологии ГИС.

Пусть рассматривается множество $\{S_j\}$ стратегий, из которых должна быть выбрана оптимальная стратегия S^V в соответствии с показателем $P_{S_j} = f(\bar{b}_{S_j}, \bar{d}_{S_j}, \bar{r}_{S_j})$, где: \bar{b}_{S_j} - глобальный приоритет влияния реализации S_j на показатели в вершинах сети G ; \bar{d}_{S_j} - оценка возможностей разработчиков реализовать стратегию S_j (шкала $0 \div 9$); \bar{r}_{S_j} - оценка трудозатрат на реализацию стратегии S_j . Целевая функция $P^* = \max(P_{S_j})$. Ограничения формулируются в зависимости от конкретных условий разработки. Выделены три основных типовых ситуации: 1) ограничения ресурсов, 2) ограничения возможностей разработчиков, 3) ограничения ресурсов и возможностей разработчиков

Схема объединения прямого и обратного процессов планирования совершенствования онтологии ГИС в ходе ее проектирования представлена на рис. 10.



Рис. 10. Схема объединения прямого и обратного процессов планирования совершенствования онтологии ГИС

В рамках данной модели выбор стратегий совершенствования онтологий ГИС должен производиться только для показателей $\{y(c_i)\}$, не удовлетворяющих требуемому качеству. Поэтому вводится алгоритм вычленения из сети G древовидного подграфа G^- , включающего множество показателей, не удовлетворяющих требованиям качества текущей стадии проектных работ, и множество связей между ними с характеризующими их значениями локальных приоритетов. Второй алгоритм — алгоритм гомеоморфного преобразования подграфа G^- с целью упрощения. Затем рассчитываются значения локальных при-

оритетов дуг и осуществляется их нормализация. Полученный взвешенный граф G^v позволяет разработчикам онтологии ГИС выбрать оптимальную стратегию ее совершенствования на следующих этапах проектирования. Выбранная стратегия позволяет установить варианты действий разработчиков по улучшению каждого из частных показателей путем детализации процедур прямого и обратного планирования.

Рассмотренные методы, модели и алгоритмы планирования процесса разработки проекта онтологии ГИС позволили создать методику планирования процесса разработки проекта онтологии ГИС с применением программных средств. Схема процесса реализации этой методики приведена на рис. 11.

Использование различных частей иерархической сети G на соответствующих стадиях и этапах проектирования онтологии ГИС позволяют вырабатывать обобщенные оценки текущего качества онтологии ГИС и выбирать оптимальную стратегию ее совершенствования.

Предложенная методика позволяет не только получить заключение о достигнутом уровне качества разрабатываемой онтологии ГИС, но и интерпретировать его как объективную основу для планирования ее совершенствования на последующих стадиях (этапах) разработки за счет выбора наиболее эффективной стратегии проектирования.

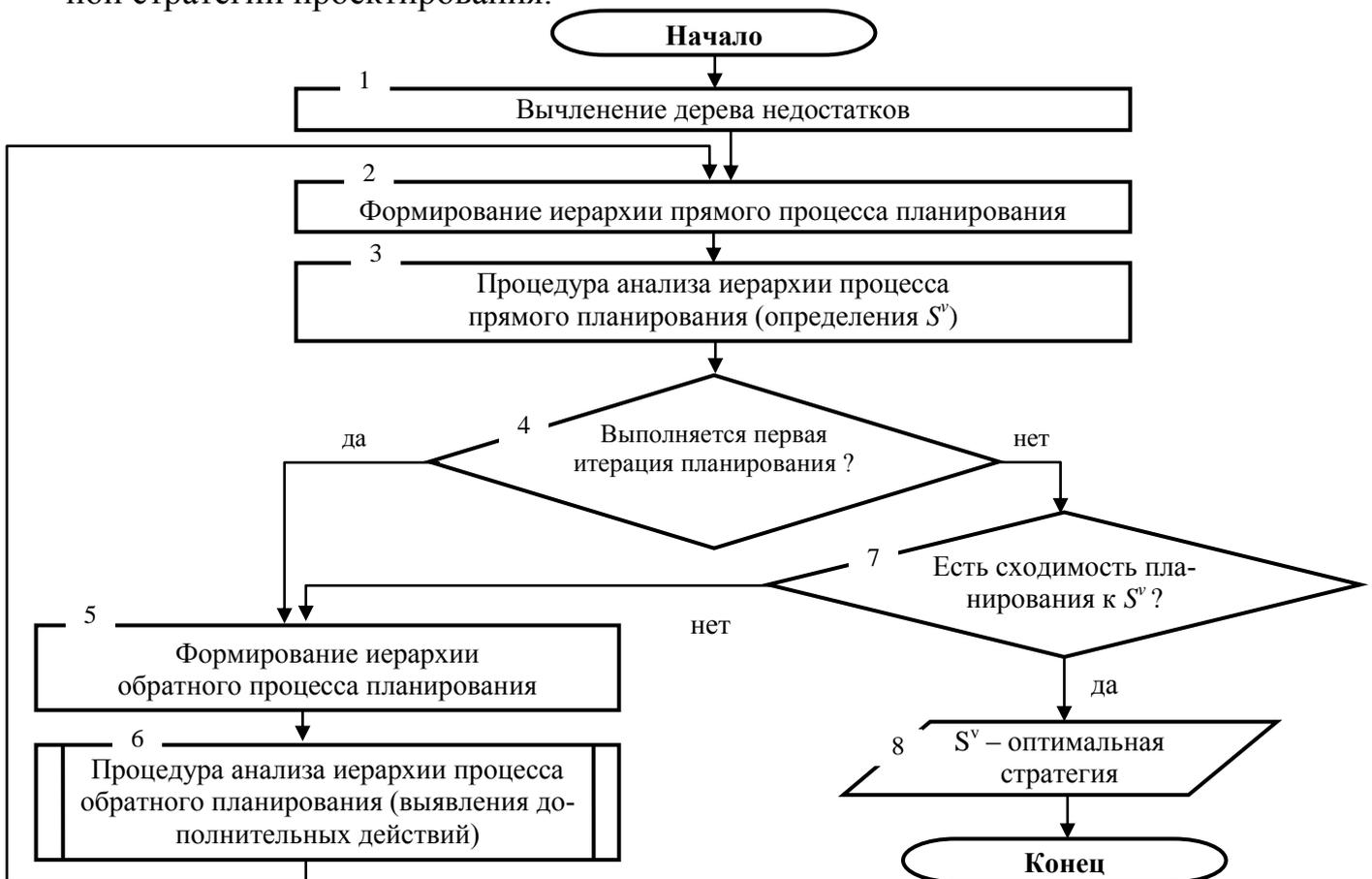


Рис. 11. Блок-схема обобщенной методики планирования процесса разработки онтологии ГИС

Проверка новизны и достоверности результатов диссертационного исследования проведена в рамках ОКР “Создание программно-аппаратного комплекса автоматизации процесса управления функциональной системой освещения обстановки в составе интегрированной АСУ пространственными процессами на море” (шифр “Алеврит”), выполненной в СПИИРАН в 2003-2007 годах. Определен перечень задач управления пространственными процессами на море, из которых наиболее экстремальной является 10-ая группа задач — оповещение в нормативные сроки и передача необходимой информации диспетчеру при возникновении нештатной ситуации ДПП.

Для решения этих задач средствами ИИ в ПАК “Онтотоп” были включены следующие подсистемы: геоинформационная (картографическая), онтологий, экспертная, преобразования электронных документов, комплекса расчетных моделей. Для функционирования названных подсистем разработан специализированный комплекс программных средств, включающий общесистемное и прикладное программное обеспечение.

В конце главы приведены результаты экспериментальной оценки эффективности полученных в диссертационной работе методов, моделей, методик, положений, выводов и рекомендаций при построении АСДПП для системы управления движением судов (СУДС) ФГУП “Росморпорт”. Проектирование ГИС с элементами ИИ для ФГУП “Росморпорт” произведено в рамках ОКР “Алеврит”. Оценка прототипа разрабатываемой ГИС проводилась по итогам каждого этапа проектирования. В табл. 4 представлены итоговые результаты экспертной оценки альтернативных вариантов интеллектуализации ГИС, которые показывают, что результаты данного диссертационного исследования (вариант 3) наиболее полно обеспечивают ориентацию ГИС на решение задач ДПП.

В дополнении к экспертной оценке эффективности разработанной в диссертации методологии интеллектуализации ГИС для АСДПП проведена оценка ее эффективности с использованием математического аппарата теории биматричных игр. При этом процесс разработки подсистем интеллектуализации ГИС, в частности, ее онтологии, рассматривается как неантагонистическая игра. Участники игры: 1) инженер-системотехник, стратегия которого заключается в повышении качества онтологии ГИС (трудозатраты второстепенны); 2) эксперт, стратегия которого заключается в снижении трудозатрат на репрезентацию знаний (качество онтологии ГИС второстепенно).

Ценой игры v_{ij} является значение комплексного показателя

$$v_{ij} = \varpi_1(9 - S_i)b'_i - \varpi_2W_{ji}, \quad (23)$$

где: ϖ_1, ϖ_2 - весовые коэффициенты, варьировавшиеся в ходе эксперимента от 0,2 до 0,8; S_i - оценка достигнутого качества онтологии ГИС по i -му показателю на предыдущем этапе технологического процесса; W_{ji} - оценка трудозатрат, необходимых для развития качества, используя j -ый метод представления информации (данных и знаний); b' - значение глобального приоритета i -го свойства на шкале [0,9], определяемое как $b'_i = 9b_i$.

Таблица 4

**Результаты оценки конкурирующих вариантов разработки ГИС для
СУДС ФГУП “Росморпорт”**

№ п/п	Методы, положенные в основу разработки альтернативного проекта	Результат экспертной оценки альтернативного проекта	Вывод в отношении базового метода разработки
1	Внедрение скелетной экспертной системы в состав типовой ГИС обеспечения навигационной безопасности	Решение не обеспечивает нового качества интеллектуализации управления; ограничены возможности совершенствованию ГИС, подключению новых задач, отдельных баз знаний. Отсутствует возможность изменения интерфейса подсистемы интеллектуализации ГИС	Не позволяет реализовывать ГИС в АСДПП на уровне современных требований к интеллектуальной поддержке ЛПР в реальном масштабе времени для динамических пространственных процессов
2	Использование типового решения по интеллектуализации ГИС на основе технологий ESRI	Недостаточное удобство, негибкость пользовательского интерфейса. Нет возможности изменять, совершенствовать систему, подключать новую функциональность, базы знаний, базовые онтологии собственной разработки.	Позволяет реализовывать современные ГИС в АСДПП, однако решения являются не модифицируемыми и строго предопределенными разработчиком программного кода.
3	Применение разработанных методов, технологий и методик интеллектуализации ГИС, ориентированных на ДПП (ПАК “ОНТОМАП”)	Решение обеспечивает максимальный уровень адаптации к требованиям пользователя; достаточные возможности по совершенствованию интеллектуальной подсистемы ГИС, наращиванию совокупности формализованных знаний. Обеспечивает новое качество интеллектуализации процессов диспетчеризации (управления) подвижными объектами	Позволяет получить новое качество ГИС в АСДПП; оценить уровень разработки; обосновать и спланировать решения по дальнейшему развитию подсистемы интеллектуализации в виде последовательностей простых и сложных стратегий совершенствования

Для каждой из стадий проектирования разработаны игровые (платежные) матрицы. Рассматриваемая игра — игра с полной информацией, которая имеет седловую точку. Найденная в седловой точке цена игры определяет оптимальный набор стратегий игроков.

Для платежной матрицы, приведенной в работе в качестве примера, цена игры $v_1 = 5,75$ — при использовании разработанных в диссертации методов, а без их использования — $v_1 = 5,17$. Тогда эффект от использования разработанной совокупности методов равен $\Delta_v = 5,75 - 5,17 = 0,58$. Аналогичные значения Δ_v получены для остальных платежных матриц, рассмотренных в качестве различных вариантов учета важности оценок из (23). Проведен анализ значимости полученных значений Δ_v с использованием t -распределения Стьюдента. Расчеты подтвердили статистическую значимость полученных результатов.

В заключении представлены формулировки пяти результатов исследования, определены перспективные направления дальнейших исследований в области интеллектуализации ГИС.

Основные выводы и рекомендации

1. Совокупность полученных в настоящем диссертационном исследовании научных результатов составляет теоретическую базу интеллектуализации ГИС, ориентированных на диспетчеризацию пространственных процессов.

2. Разработанная теоретическая база обеспечивает решение научно-технической проблемы интеллектуализации ГИС в целях их ориентации на решение задач диспетчеризации пространственных процессов.

3. Рост качества управления пространственными процессами и их безопасности на основе автоматизации в ГИС рутинных функций диспетчера по анализу и оценке пространственных процессов может быть гарантирован, если в процессе разработки ГИС в составе АСДПП будут использованы:

- метод разработки онтологий для интеллектуализации ГИС в АСДПП, реализующий механизмы гармонизации, интеграции и слияния информации, циркулирующей в АСДПП, а также категорно-функтурные модели предметной области диспетчеризации пространственных процессов;

- информационная технология сценарной репрезентации пространственных процессов в интеллектуализированных ГИС, обеспечивающая диспетчеру возможность наглядного сравнения эталонных и фактических состояний диспетчеризируемых пространственных процессов;

- метод оценки безопасности диспетчеризируемых пространственных процессов в интеллектуализированной ГИС, обеспечивающий планирование безопасных пространственных процессов и активизацию внимания диспетчера на тех диспетчеризируемых процессах, в ходе развития которых возникла или прогнозируется нештатная пространственная ситуация;

- комплекс квалиметрических методик формирования системы показателей качества для оценки онтологии интеллектуализированной ГИС, обеспечивающий количественную оценку качества и недостатков рассматриваемого проекта онтологии ГИС;

- методика планирования процесса разработки онтологий интеллектуализированной ГИС, обеспечивающая линейность и исключения случаев цикличности процесса проектирования онтологии ГИС на основе обоснованного выбора стратегии разработки онтологии и ее корректуры по этапам выполнения проектных работ.

4. Прогностический потенциал полученных научных результатов обусловлен следующими принципиальными возможностями:

1) возможностью обеспечения планирования безопасных пространственных процессов и активизации внимания диспетчера на фактических пространственных процессах с угрозой возникновения опасных (нештатных) ситуаций;

2) возможностью обеспечения линейности и исключения случаев цикличности процесса проектирования онтологии ГИС;

3) возможность объективной оценки качества и недостатков принятых проектных решений по разработке онтологии ГИС, выработки стратегий их корректуры и совершенствования.

5. Полученные в результате исследования научные результаты, выводы и рекомендации носят обобщенный характер, что позволяет их использовать:

- для разработки документов, уточняющих ЕСКД (ЕСПД) и регламентирующих процесс проектирования ГИС с элементами искусственного интеллекта на всех стадиях выполнения проектных работ;
- для организации перспективных НИОКР с целью адаптации ГИС к предметным областям и целям тех систем управления, в состав которых она входит;
- для разработки автоматизированных тренажерно-обучающих систем профессиональной подготовки диспетчерского состава, осуществляющего управление различными видами транспортных потоков.

6. С учетом указанного выше вынесенные на защиту научные результаты являются новыми, достоверными, теоретически и практически значимыми. Они могут быть квалифицированы как совокупность технических и технологических решений, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие экономики страны и повышение ее обороноспособности.

3. Список публикаций по теме диссертации

Публикации в изданиях по перечню ВАК Минобрнауки РФ

1. **Ивакин, Я.А. Введение в проблему компьютерной интерпретации прикладных, формализуемых теорий** [Текст] / Я.А. Ивакин // Информационно-управляющие системы. – 2003. - №1. – С. 26-31.
2. **Ивакин, Я.А. Компьютерная интерпретация прикладных формализуемых теорий** [Текст] / Я.А. Ивакин, М.В. Шпаков // Инновации. 2003. - №10(67).–С. 65-72.
3. **Ивакин, Я.А. Пути и методы развития функциональной системы электронного документооборота ВМФ** [Текст] / Я.А. Ивакин, А.В. Панькин, С.В. Сайтов // Морской сборник. – 2004. -№ 8 (1893). – С. 30 – 33.
4. **Ивакин, Я.А. Геоинформационные системы с элементами искусственного интеллекта** [Текст] / Я.А. Ивакин // Известия высших учебных заведений. Северо-кавказский регион. Технические науки: научн.сб., спец. выпуск: Проблемы водного транспорта. Часть 2.- Новороссийск: НГМА, 2006. – С.37-41.
5. **Ивакин, Я.А. Представление диспетчерской деятельности в интеллектуальной геоинформационной системе на базе обобщенной и конкретизированной онтологий** [Текст] / Я.А. Ивакин // Известия высших учебных заведений. Северо-кавказский регион. Технические науки: научн.сб., спец. выпуск: Проблемы водного транспорта. - Часть 2. - Новороссийск: НГМА, 2006. – С. 42-49.
6. **Ивакин, Я.А. Изоморфность обобщенной и конкретизированных онтологий диспетчерской деятельности** [Текст] / Я.А. Ивакин, А.В. Панькин // Вестник Санкт-Петербургского университета. Прикладные методы процессов управления. -2008. - серия 10, вып. 1. - С. 75-86.
7. **Ивакин, Я.А. Системно-информационный подход к оценке безопасности пространственных процессов в интеллектуальных геоинформационных системах** [Текст] / Я.А. Ивакин, А.Н. Печников // Проблемы управления рисками в техносфере.–2008. - вып.3 [7]. – С. 66-75.
8. **Ивакин, Я.А. Оценка безопасности пространственных ситуаций в интеллектуальных геоинформационных системах, ориентированных на диспетчеризацию пространственных процессов** [Текст] / Я.А. Ивакин, А.Н. Печников // Проблемы управления рисками в техносфере.–2008. - вып.3 [7]. – С. 19-23.

9. **Ивакин, Я.А. Экспертиза проектов информатизации в Военно-морском флоте** [Текст] / Я.А. Ивакин, С.В. Саитов // Морской сборник. – 2008. - № 2 (1932). – с. 42–46.

10. **Ивакин, Я.А. Эффективность автоматизированных систем диспетчеризации пространственных процессов** [Текст] / Я.А. Ивакин // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2009. - № 1 (74). – С.39-43

11. **Ивакин, Я.А. Универсальная модель данных для интеллектуальной ГИС** [Текст] / Я.А. Ивакин // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2009.- № 1 (74). – С.46-50

Монография

12. **Ивакин, Я.А. Методы интеллектуализации промышленных геоинформационных систем для диспетчеризации пространственных процессов** [Текст]: монография / Я.А. Ивакин; под ред. Р.М.Юсупова. – СПб.: СПИИРАН, 2008.- 239 с.

Учебное пособие

13. **Ивакин, Я.А. Информационная технология корабельных АСУ** [Текст]: Учебное пособие / Я.А. Ивакин, В.Н.Наумов. – СПб.: ВМИРЭ, 1999.- 135 с.

Статьи и доклады

14. **Ивакин, Я.А. Концептуальная модель данных для географических информационных систем** [Текст] / Я.А. Ивакин, В.В. Попович, А.В. Панькин, Р.З. Фейзов // Восьмая Санкт-Петербургская международная конференция «Региональная информатика - 2006»: сб.тр. - С-Пб, Издание СПОИСУ, 2006 г. – С. 119 – 125

15. **Ивакин, Я.А. Развитие функциональной подсистемы электронного документооборота на основе XML-технологий** [Текст] / Я.А. Ивакин // Журнал «Индустрия». – 2004. - №1(35).– С.96-97.

16. **Ивакин, Я.А. Изоморфность обобщенной и конкретизированных онтологий диспетчерской деятельности в интеллектуальной ГИС** [Текст] / Я.А. Ивакин // Информация и космос. – 2007. - № 2. - С. 23-30.

17. **Ивакин, Я.А. Обобщенная и конкретизированные онтологии диспетчерской деятельности в интеллектуализированной геоинформационной системе** [Текст] / Я.А. Ивакин // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2008. - № 4(4).– С.44-56.

18. **Ивакин, Я.А. Компьютерная интерпретация теории поиска подвижных объектов** [Текст] / Я.А. Ивакин // Международный научный семинар «Интеграция информации и геоинформационные системы 2003»: сб.тр.- С.Петербург, СПИИРАН, 2003г.- С.112-126.

19. **Ивакин, Я.А. Применение методов искусственного интеллекта в геоинформационных системах** [Текст] / Я.А. Ивакин, Р.П. Сорокин // Международный научный семинар «Интеграция информации и геоинформационные системы 2005»: сб.тр.- С.Петербург, СПИИРАН, 2005г.- С.105-114.

20. **Ивакин, Я.А. Проблемы разработки корпоративной информационной системы регионального уровня** [Текст] / Я.А. Ивакин, В.В. Попович, Р.З. Фейзов // Международная научно-практическая конференция "Электронная культура и новые гуманитарные технологии XXI века": сб.тр. - Астрахань, Издание Астраханского государственного университета, 2007г. – С. 108 –132.

21. **Ivakin, Y. Theory of search for moving objects** [Text] (Теория поиска подвижных объектов) / Y.Ivakin, V.Popovich, S.Shaida // The conference "Oceans 2002 MTS/IEEE": Proc. - Biloxi, Mississippi, USA.- October 29-31.- 2002 – pp. 1319-1330.

22. **Ivakin, Y. Data for GIS [Text]** (Данные для ГИС) / Y.Ivakin, V.Popovich, A.Pankin // The 11th International Conference on Urban Planning and Regional Development in the Information Society CORP2006: Proc. - Vienna, Austria. - February 13-16th. - 2006. – pp. 958-962.

Авторские свидетельства, патенты, информационные карты, алгоритмы

23. **Алгоритм расчета данных по наведению и целеуказанию маневренным силам ВМФ [Текст]:** Описание алгоритма и программной модели. Включено за № 08.4644м в Центральный фонд алгоритмов и программ Военно-морского флота // Ивакин Я.А., Силла Е.П., Потапычев С.Н., Шульдешов Ю.Л.; заявитель: Учреждение Российской академии наук Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации; правообладатель: Министерство обороны РФ - Директива Начальника Главного штаба ВМФ от 15 декабря 2008 года № 713/2/151; заявл. 18.12.07; включено – 30.12.08 – 12с: ил.

24. **Расчет данных для организации поиска объектов в морском районе силами и средствами ВМФ [Текст]:** Описание алгоритма и программной модели. Включено за № 08.4647м в Центральный фонд алгоритмов и программ Военно-морского флота // Ивакин Я.А., Потапычев С.Н., Попович В.В., Ермоленко А.А., Шайда С.С.; заявитель: Учреждение Российской академии наук Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации; правообладатель: Министерство обороны РФ - Директива Начальника Главного штаба ВМФ от 15 декабря 2008 года № 713/2/1511; заявл. 18.12.07; включено – 30.12.08 – 12с: ил.

25. **Алгоритм построения и сопровождения трасс целей, по совокупности информации, поступающей от различных средств обнаружения БСН ВМФ и взаимодействующих систем [Текст]:** Описание алгоритма и программной модели. Включено за № 08.4643м в Центральный фонд алгоритмов и программ Военно-морского флота // Ивакин Я.А., Ермолаев В.И., Волгин П.Н., Силла Е.П.; заявитель: Учреждение Российской академии наук Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации; правообладатель: Министерство обороны РФ - Директива Начальника Главного штаба ВМФ от 15 декабря 2008 года № 713/2/1511; заявл. 18.12.07; включено – 30.12.08 – 12с: ил.

26. **Алгоритм расчета местоположения и контроля действий сил ВМФ в заданной зоне в соответствии с первоначальным планом [Текст]:** Описание алгоритма и программной модели. Включено за № 08.4642м в Центральный фонд алгоритмов и программ Военно-морского флота // Ивакин Я.А., Васильев П.В., Сорокин Р.П., Панькин А.В., Силла Е.П.; заявитель: Учреждение Российской академии наук Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации; правообладатель: Министерство обороны РФ – Директива Начальника Главного штаба ВМФ от 15 декабря 2008 года № 713/2/1511; заявл. 18.12.07; включено – 30.12.08 – 12с: ил.

25. **Метод характеристической оценки баз знаний экспертных систем [Текст]:** Описание алгоритма и программной модели реализации (программного средства). Включено в Гос. Фонд Алгоритмов и Программ (ЛЭТИ) за № Гос.ФАП – 50900004 от 12.04. 1997 // Ивакин Я.А., Грехов А.А., Календарев А.С.; Заявитель и правообладатель: Высшее Военно-морское училище радиоэлектроники имени А.С.Попова – Отношение проректора СПГЭТУ по НР от 05.04.1996 №37/0/85; заявл. 07.02.96; включено – 12.04.96.