



## **РЕЗУЛЬТАТЫ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ПРОГРАММАМ СО РАН**

В 2011 году проводились исследования по 7 проектам приоритетных направлений фундаментальных исследований по программам СО РАН на 2010–2012 гг.

**Приоритетное направление III.24. Теория систем, общая теория управления сложными техническими и другими динамическими системами, в том числе единая теория управления, вычислений и сетевых связей, а также теория сложных информационно-управляющих систем, групповое управление и распределенное управление.**

**Программа III.24.1. Теория управления динамическими системами и методы их исследования.**

**Проект III.24.1.1. Методы и вычислительные технологии исследования задач управления с приложениями к социальным, экономическим, природным и техническим системам.**

*№ гос. регистрации: 01201001349*

*Научный руководитель – д.ф.-м.н. В.А. Батулин.*

Разработан метод редукции для задач оптимального управления импульсными гибридными системами в форме дифференциальных уравнений с мерами при смешанных ограничениях. Получены необходимые условия оптимальности в форме принципа максимума для задач управления импульсными гибридными системами.

Разработан алгоритм поиска глобального экстремума в задаче оптимального управления со скалярным релейным управляющим воздействием. Алгоритм ориентирован на динамические системы, требующие значительного процессорного времени для решения задачи Коши.

Для управляемых систем на плоскости предложена вычислительная технология поиска оптимального управления.



Разработаны новые алгоритмы численного построения множеств достижимости управляемой системы. Построены трубки разрешимости для моделей экономической динамики.

Доказаны теоремы о разрешимости многомерных интегро-алгебраических уравнений с особенностями в ядре.

Найдены классы нелинейных алгебро-дифференциальных систем, допускающих решение задач типа Коши с помощью разностных схем.

Доказана теорема о разрешимости начально-краевой задачи для линейных дифференциально-алгебраических уравнений в частных производных. В условиях теоремы существования предложены и обоснованы разностные схемы первого и второго порядка.

Построен эффективный численный метод высокого порядка для решения дифференциально-алгебраических уравнений, получаемых при квазистационарном описании гидравлических цепей.

Для линейных дифференциально-алгебраических систем уравнений в частных производных построен и исследован класс неявных сплайн-коллокационных разностных схем высокого порядка аппроксимации.

Исследованы нестационарные тепло-массообменные процессы в пограничных слоях естественных водоемов на основе взаимодействующих нестационарных математических моделей с подвижными границами.

Проведены вычислительные эксперименты для моделирования эколого-экономических процессов в Азиатской части России с учетом инноваций.

### **Проект Ш.24.1.2. Нелокальные методы в теории управления динамическими системами.**

*№ гос. регистрации: 01201001345*

*Научный руководитель – д.ф.-м.н. В.А. Дыхта.*

Получено обобщение канонической теории оптимальности Гамильтона–Якоби в обыкновенных динамических системах, базирующиеся на новом классе



бипозиционных функций типа Ляпунова. Эти функции определены на решениях канонической системы из условий экстремальности принципа максимума Понтрягина, что обуславливает повышенную эффективность обобщенного подхода в сравнении с традиционным.

Разработана нестандартная двойственность для нелинейных задач оптимального управления обыкновенными динамическими системами, основанная на новой конструкции обобщенного лагранжиана задачи с бипозиционными функциями типа Ляпунова. Двойственность приводит к задаче сравнения и к условиям глобальной оптимальности программных и позиционных управлений.

Разработан алгоритм поиска глобально оптимального управления для задачи минимизации нелинейного полувыпуклого функционала в линейной управляемой системе. Эффективность алгоритма подтверждена вычислительными экспериментами.

Получены необходимые и достаточные условия глобальной оптимальности в нелинейных задачах управления дискретными и импульсными системами. Эти условия развивают метод неравенств Гамильтона–Якоби на указанные классы задач.

Доказана сходимость множеств достижимости линейных вполне управляемых систем при стремлении к нулю времени движения, получены оценки скорости сходимости.

Разработаны методы поиска гарантированных и оптимистических решений для некоторых классов задач двухуровневой оптимизации.

Разработаны методы поиска двухсторонних оценок оптимального значения целевой функции для нелинейной задачи о  $p$ -медиане и задач размещения с предпочтениями клиентов.



### Проект III.24.1.3. Качественный анализ эволюционных уравнений и систем управления.

№ гос. регистрации: 01201001351

Научный руководитель – чл.-к. РАН А.А. Толстоногов.

Исследованы качественные свойства гиперболической системы с управляемыми граничными условиями. Доказаны теоремы существования решения управляемой системы с гистерезисом.

Изучены асимптотические свойства решения неавтономных дифференциальных включений с запаздыванием. Исследованы свойства управляемости, наблюдаемости и продолжимости решений для систем нелинейных алгебро-дифференциальных уравнений. Получены выраженные в терминах ВФЛ достаточные условия устойчивости и диссипативности нелинейных непрерывно-дискретных многокомпонентных управляемых систем каскадной структуры. Установлена стационарность векторных полей, соответствующих заданной вариационной задаче (например, заданному интегральному функционалу действия по Гамильтону), и найдены условия, при которых для подынтегральной характеристической функции системы выполняются необходимые условия экстремума. Получены достаточные условия внутренней устойчивости группы взаимосвязанных объектов, описываемых нелинейными разностными уравнениями. Получены решения некоторых задач стабилизации положения равновесия механической системы с заданными потенциальными силами за счет управляющих сил иной структуры. Для сложных систем с переключаемыми обобщенно-однородными подсистемами и связями между ними предложен способ построения общей векторной функции Ляпунова и доказана теорема об асимптотической устойчивости.

Для стационарной нерелятивистской системы Власова–Максвелла–Фоккера–Планка (одночастичная модель) построено новое семейство распределений в виде экспоненты, зависящей от одной скалярной функции.



Для двух обобщенных задач Коши, возникающих в газовой динамике, одна из которых, например, описывает отражение ударной волны (УВ) от жесткой стенки и резкое вдвигание непроницаемого поршня в газ, доказаны теоремы существования и единственности решений в классе аналитических функций.

Для цепочек Богоявленского найдено дискретное преобразование Миуры, которое связывает их с некоторыми дифференциально-разностными уравнениями. Предложено обобщение ранее введенного авторами лагранжиана для классической цветной частицы, движущейся в фоновых неабелевых фермионных и бозонных полях, с целью учета изменения во времени спиновой степени свободы частицы.

Предложен простой метод решения волнового уравнения для поля Рариты–Швингера без наложения дополнительных ограничений. Развита метод восстановления 2-D/3-D поля скоростей для случаев веерной/конусной схем измерения с использованием разложения компонент поля по скалярным сферическим гармоникам.



**Приоритетное направление IV.29. Системы автоматизации, CALS-технологии, математические модели и методы исследования сложных управляющих систем и процессов.**

**Программа IV.29.1. Теоретические основы и методы информационных и вычислительных технологий проектирования и принятия решений.**

**Проект IV.29.1.3. Имитационные модели и информационные технологии автоматизации исследований и принятия решений при обеспечении техногенной безопасности.**

*№ гос. регистрации: 01201001347*

*Научный руководитель – д.т.н. А.Ф. Берман.*

Разработан механизм низкоуровневого доступа к СУБД через Web-интерфейс, обеспечивающий обслуживание хранилища данных системы автоматизации научных исследований. Механизм основан на обобщенной реализации стандартных функций манипулирования данными. Под обобщенной реализацией понимается использование описания хранимого класса для настройки (адаптации) кода указанных функций к работе с объектами данного класса. Процесс адаптации происходит автоматически и не требует изменения исходного кода функций. Хранимым классом называется сущность предметной области, в общем случае содержащая данные из нескольких таблиц СУБД, построенная по информации, автоматически извлекаемой из метаданных СУБД (данные о названии и типах столбцов таблицы, внешних ключах данной таблицы, внешних ключах других таблиц, связанных с рассматриваемой таблицей и другую информацию, представляющую интерес для разработчика). Экземпляр хранимого класса содержит данные из всех соответствующих строк всех таблиц, задействованных в хранимом классе. Для представления этой информации в системе используется специальный класс «Описание хранимого класса», объект которого содержит всю необходимую информацию об одном хранимом классе СУБД.



Данный результат является переносом существующей системы доступа к СУБД (ОС MS Windows, язык программирования Object Pascal, реализация 2004–2005 гг.) на WEB-платформу (языки программирования PHP, JavaScript, HTML, CSS) с целью обеспечения возможности доступа к данным из произвольного места в сети Интернет.

В настоящее время поддерживается работа с СУБД PostgreSQL версии 9. Недостатки: высокая трудоемкость разработки, снижение производительности из-за обобщенной реализации, нестандартное поведение функций необходимо реализовывать дополнительно.

Разработана продукционная база знаний, описывающая динамику деградиционных и опасных процессов, для исследовательской версии экспертной системы, как компонента системы принятия решений при обеспечении техногенной безопасности. База знаний описывается совокупностью метаправил, характеризующих динамику нежелательных процессов (деградационных и опасных процессов). Правило имеет объектную структуру:

ЕСЛИ факт 1 (объект  $i_1$ )(КУ 1)  $\circ \dots \circ$  факт  $K$  (объект  $i_K$ )(КУ  $K$ )

ТО факт  $K+1$  (объект  $i_{K+1}$ )(КУ  $K+1$ )  $\circ \dots \circ$  факт  $K+N$  (объект  $i_{K+N}$ )(КУ  $K+N$ ),

где  $\circ$  – знак логической операции; объект  $i_j$  (свойство  $i_{j1}$ , ..., свойство  $i_{jN_{i_j}}$ ) – объект предметной области, описываемый набором свойств, которые также могут иметь объектную структуру, КУ – коэффициент уверенности, описывающий экспертную оценку факта. Тогда метаправила имеют вид:

Правило 1: ЕСЛИ свойства объекта И вид опасности И воздействующие факторы

ТО механизм  $i$ -нежелательного процесса (КУ<sub>Мех</sub>);

Правило 2: ЕСЛИ механизм  $i$ -нежелательного процесса

ТО кинетика  $i$ -нежелательного процесса (КУ<sub>Кин</sub>) И

событие  $il$  (КУ<sub>Сил</sub>)... И событие  $in$  (КУ<sub>Син</sub>);



Правило 3: ЕСЛИ кинетика  $i$  -нежелательного процесса ( $KY_{\text{кин}}$ )

ТО  $i$  -проявление ( $KY_{\text{п}}$ ) И параметр  $i$  ( $KY_{\text{пп}i}$ )... И

параметр  $im$  ( $KY_{\text{пп}im}$ ).

При описании, например, деградационных процессов объект и его свойства описываются в виде: объект (свойства материала (химический состав, механические свойства), технологическая наследственность (металлургическая наследственность, наследственность технологии изготовления), геометрические свойства, среда (химический состав); нагрузки).

Согласно метаправилам описаны деградационные процессы: коррозионная усталость, коррозионное растрескивание, водородное охрупчивание; нежелательные опасные процессы: полное разрушение оборудования, содержащего опасное вещество в газообразном состоянии; нарушение герметичности (частичное разрушение) оборудования, содержащего опасное вещество в газообразном состоянии; полное разрушение оборудования, содержащего опасное вещество в жидком состоянии; нарушение герметичности (частичное разрушение) оборудования, содержащего опасное вещество в жидком состоянии.

Приведем примеры правил (ОХВ – опасное химическое вещество): ЕСЛИ оборудование/объект (состояние – отказ/разрушение (объем разрушений – полное)) И оборудование (свойство – вещество (вид – опасное/ОХВ, состояние – газообразное)) И управляющие воздействия (описание – нет) ТО механизм нежелательного процесса «Выброс газообразного ОХВ»; ЕСЛИ механизм нежелательного процесса «Выброс газообразного ОХВ» ТО кинетика нежелательного процесса «Выброс газообразного ОХВ»; ЕСЛИ кинетика нежелательного процесса «Выброс газообразного ОХВ» И выброс (вещество (вид – опасное/ОХВ, состояние – газообразное); объем выброса – весь) ТО образование первичного облака; ЕСЛИ кинетика нежелательного процесса «Выброс газообразного ОХВ» И образование первичного облака ТО рассеяние первичного облака; ЕСЛИ кинетика нежелательного процесса «Выброс газообразного ОХВ» И рассеяние первичного облака ТО воздействие на окружающую среду.





Описание содержания базы знаний основано на методических рекомендациях (Методика оценки последствий аварийных выбросов опасных веществ, 2005) и работах участников проекта по обеспечению техногенной безопасности в нефтехимической промышленности.

Правила реализованы на языке Clips с помощью разработанного участниками проекта редактора баз знаний.

Разработаны интеллектуальная программная система для реализации метода автоматизированного построения деревьев событий (отказов) на основе производственного подхода.

Для реализации программной системы автоматизированного построения деревьев событий (отказов) решены задачи:

- разработано методологическое обеспечение автоматизированного построения деревьев событий (ДС) и отказов на основе прецедентного и производственного подходов;
- создана производственная экспертная система построения деревьев событий;
- разработан редактор построения деревьев событий (отказов).

Архитектура системы представлена на рис. 7.

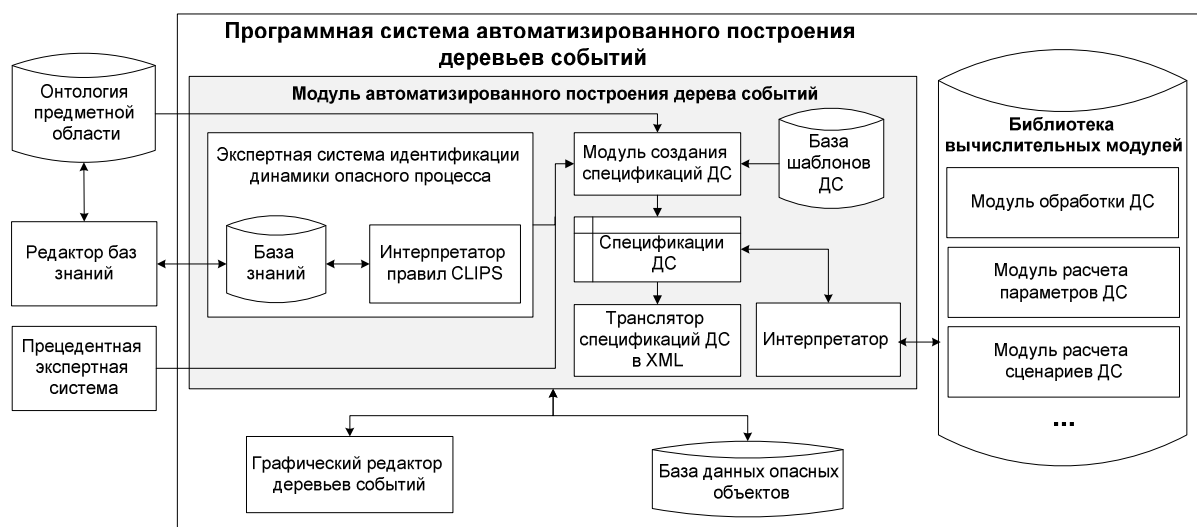


Рис. 7. Архитектура программной системы автоматизированного построения деревьев событий и отказов



Разработанная программная система позволяет в диалоге с пользователем, не имеющим навыков программирования, в автоматизированном режиме провести анализ возможных сценариев развития опасного процесса, построить ДС для инициирующего события. Построение ДС основывается на анализе информации о свойствах рассматриваемого опасного объекта и знаний экспертов в области динамики опасных процессов.

Разработан математический компонент системы имитационного моделирования, реализованный в виде динамической библиотеки с унифицированным интерфейсом. Он основан на анализе аналитических зависимостей с использованием свободного программного обеспечения, обеспечивает возможность обрабатывать условные конструкции (выбор формул расчета по определенному условию), выбор из таблиц значений.

Математический компонент представляет собой программу-калькулятор в компонентной обертке, обеспечивающей разбор и интерпретацию математических выражений и конструкций. Основные функции компонентной обертки заключаются в поддержке унифицированного программного интерфейса и операторов, описывающих условные конструкции и таблицы значений. Для описания операторов разработана спецификация. Математический компонент позволяет выполнять простейшие математические операции и интегрироваться с программными системами, поддерживающими унифицированный программный интерфейс.

Тестирование и использование компонента осуществлено в составе программной системы имитационного моделирования динамики состояний технических систем на основе агентного подхода.

Предложен механизм, основанный на применении методов группового (коллективного) выбора для обработки множества решений, полученных «по аналогии». Подход отличается от существующих учетом множества решений прецедентов-аналогов, релевантных рассматриваемой ситуации, а не одного решения единственного лучшего (наиболее похожего) аналога. Алгоритм предложенного подхода представлен на рис. 8.

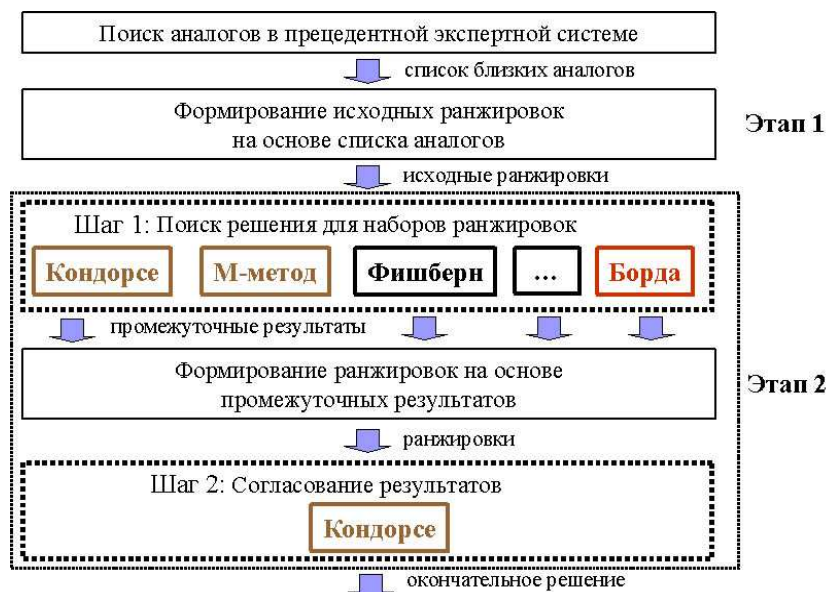


Рис. 8. Алгоритм механизма адаптации

Разработана оболочка продукционной экспертной системы на основе машины вывода Clіps, реализованная в виде редактора продукционных баз знаний, ориентированного на непрограммирующего специалиста. Программа-оболочка обеспечивает возможность создания баз знаний в формате CLIPS, а также интеграцию с онтологиями, поддерживающими формат XMI. Архитектура редактора приведена на рис. 9.

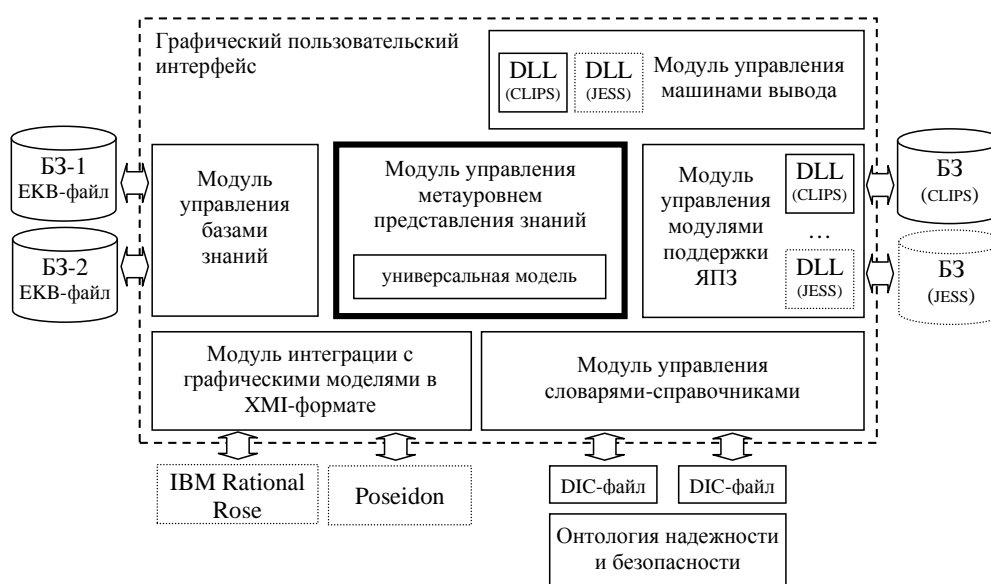


Рис. 9. Архитектура редактора



Предложен индексный метод для анализа и оценки техногенного риска нефтехимических комплексов в соответствии с Российским законодательством по безопасности. Метод учитывает следующие индексы: показатель категорий взрывоопасности технологических блоков, учитывающий такие параметры эксплуатации оборудования, как давление, температура, физические и химические свойства используемых веществ, скорость истечения опасных веществ из аппарата в случае возникновения аварии; характеристика класса взрывоопасной зоны (помещения) в зависимости от степени опасности применяемых веществ и особенностей технологических процессов; характеристика химического аппарата в зависимости от содержащихся в аппаратах веществ и рабочих параметров аппарата.

На основе предложенного индексного подхода для динамической оценки риска функционирования технической системы (ТС) в сетевой формализм (сети Петри) были введены расширения: функция вычисления риска; функция, вычисляющая атрибуты меток, характеризующие относительный энергетический потенциал взрывоопасности; функции разметки входных дуг, описывающие метки риска.

На основе предложенной модификации сети Петри разработан метод создания модели функционирования технической системы для динамической оценки риска. Метод описывается структурными и функциональными аспектами. Структура определяется следующим образом: позиции сети – элементы ТС, переходы сети – события системы, метки сети – динамически изменяемые потоки энергии, ресурсов и т.д., атрибуты меток – состояния элементов ТС, позиции с вложенными сетями – отображение иерархии ТС, где каждая вложенная сеть – это модель структурного элемента, инкапсулированная в позиции (ранее вложенные сети инкапсулировались в переходах), ограничения на значения атрибутов меток – позволяют разделить множество состояний функционирования на подмножества с номинальными, допустимыми и недопустимыми значениями параметров. Функциональность сети определяется функциями, вложенными в дуги, условиями вы-



полнения переходов и структурой сети. Динамика модели обеспечивается выполнением переходов и вычислением атрибутов меток.

Предложенный подход реализован в виде программной системы и применен для оценки риска ТС нефтехимических производств.

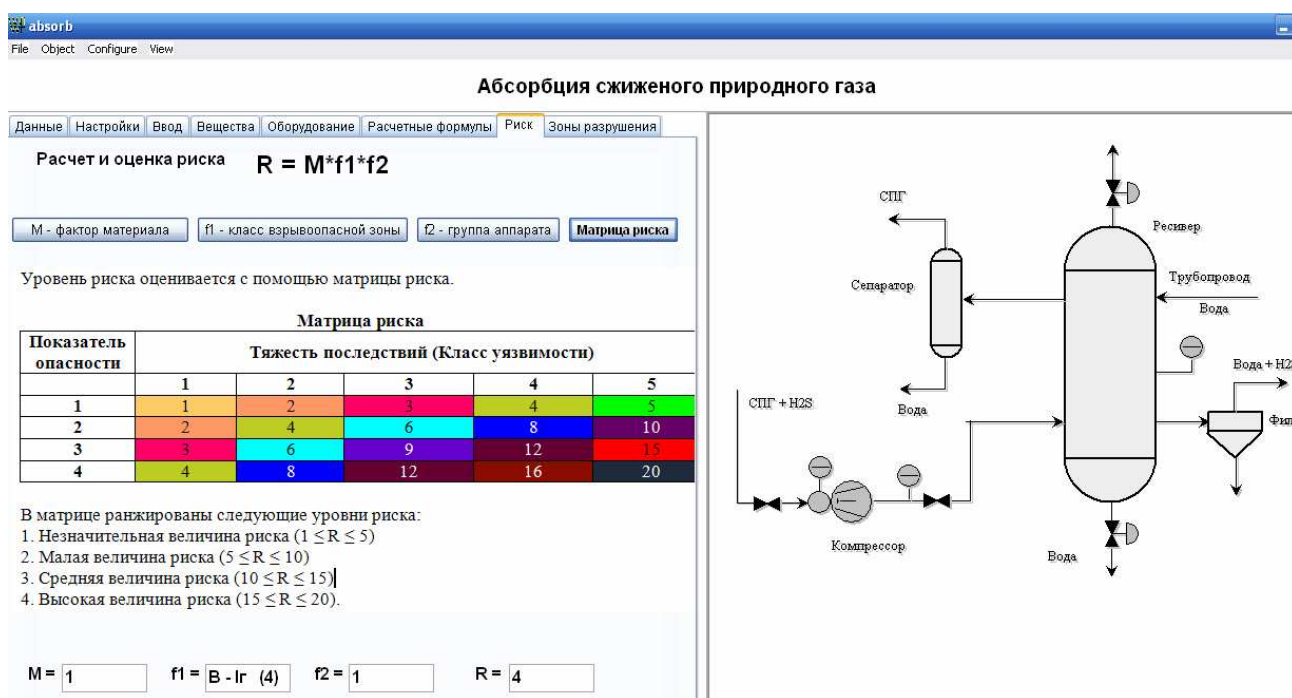


Рис. 10. Пример экранной формы расчета риска ТС



**Приоритетное направление IV.31. Проблемы создания глобальных и интегрированных информационно-телекоммуникационных систем и сетей. Развитие технологий GRID.**

**Программа IV.31.1. Фундаментальные основы и прикладные аспекты вычислительных и информационных технологий, в том числе технологий на базе GRID, в интегрированных информационно-телекоммуникационных системах и сетях.**

**Проект IV.31.1.2. Интеллектуальные методы автоматизации решения задач в параллельных и распределенных вычислительных средах.**

*№ гос. регистрации: 01201001348*

*Научный руководитель – д.т.н. Г.А. Опарин.*

Разработана архитектура объектно-ориентированной системы управления базой знаний Грид, инфраструктура которой включает прикладные программные комплексы различного назначения.

Реализованы языковые средства и пользовательский интерфейс для представления вычислительных знаний в объектно-ориентированной системе управления базой знаний.

Разработаны принципы комплексирования по данным предметно-ориентированных комплексов, интегрированных в Грид.

Реализованы средства автоматизации построения декларативного описания булевой модели на многоядерных процессорах.

Реализованы средства автоматизации построения процедурного описания булевой модели на многоядерных процессорах.

Реализован параллельный алгоритм решения дискретных задач на многоядерных процессорах, использующий стандарт OpenMP для работы с общей памятью и ориентированный на представление булевой функции в виде ДНФ, содержащей только бинарные и р-арные конъюнкты.



Разработан многофункциональный транслятор алгоритмов вычисления дискретных функций в булевы структуры (булевы уравнения, алгебраические уравнения над полем  $GF(2)$ , «и-не-графы»).

Построены (с применением транслятора) булевы системы уравнений, описывающие ситуации возникновения циклов и стационарных состояний для дискретных отображений, задаваемых генными сетями.

На основе объектно-ориентированной парадигмы программирования разработана мультиагентная система управления базой знаний Грид. Программная реализация системы выполнена на базе инструментального комплекса Java Agent Development Framework (JADE) с учетом специфики функционирования каждого агента. Использование инструментального комплекса JADE обеспечивает переносимость, открытость и эффективность разработанной мультиагентной системы, а также возможность ее дальнейшего, относительно «безболезненного» структурного и функционального развития.

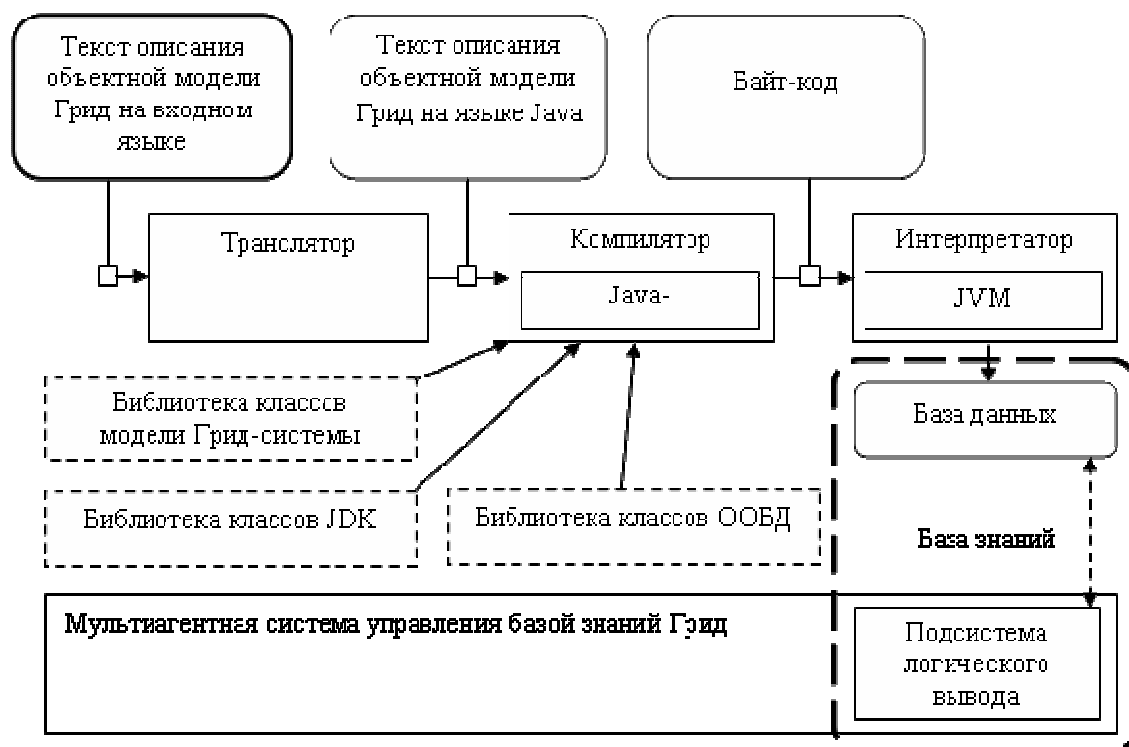


Рис. 11. Мультиагентная система управления базой знаний Грид



Реализованы инструментальные средства автоматизации параллельного решения нелинейных булевых уравнений на кластере SMP-узлов (рис.12). Программная реализация конвертора булевой модели, генератора процедурного описания булевой модели и параллельного решателя выполнена с использованием стандарта OpenMP, поддерживающего программную переносимость между различными конфигурациями систем с общей памятью.

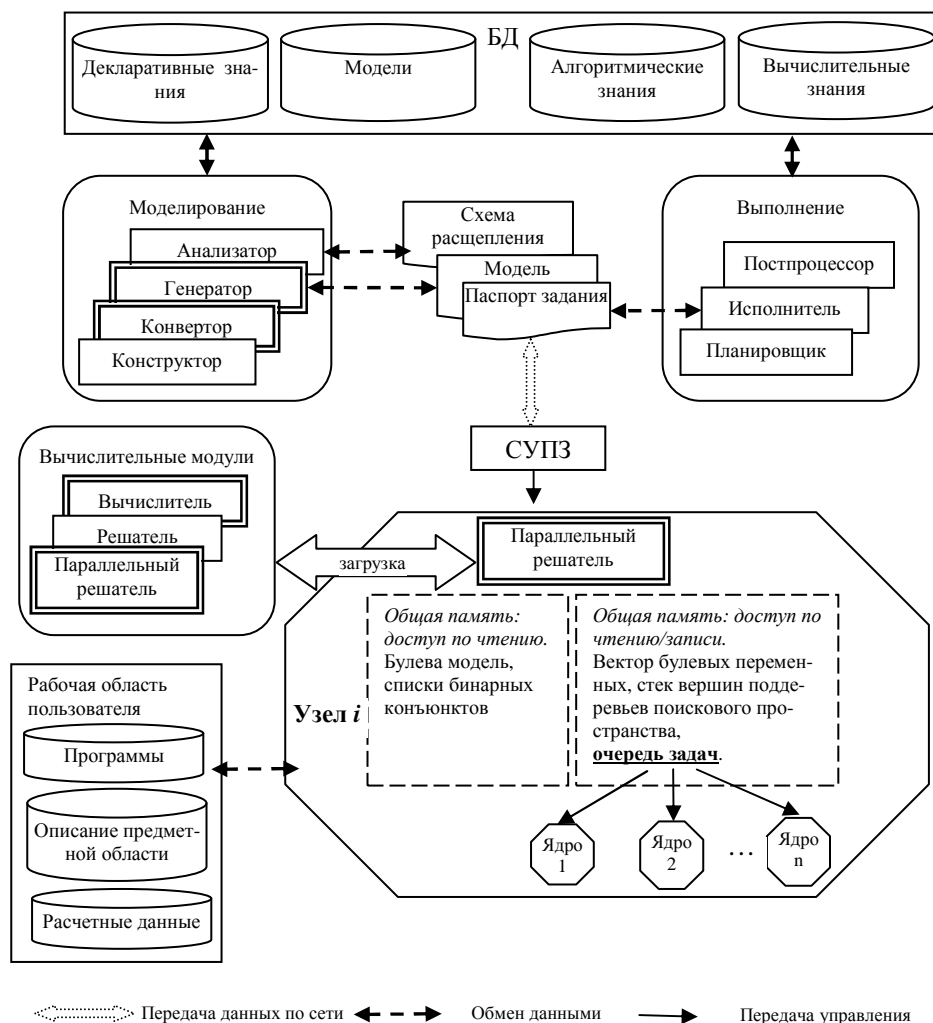


Рис. 12. Схема проведения параллельных вычислений на SMP-узлах кластера

Разработан и реализован программный комплекс Transalg, основное предназначение которого состоит в преобразовании процедурных описаний дискретных функций, выполненных на специальном проблемно-ориентированном языке, в системы булевых уравнений. В комплексе Transalg реализованы механизмы сокращения избыточности пропозиционального кода, что позволяет получать для





ряда алгоритмов их пропозициональные коды, которые существенно компактнее известных аналогов. В комплексе Transalg поддерживается вывод итогового кода алгоритма в различных форматах (КНФ, ДНФ, системы уравнений над  $GF(2)$ , «и-не-графы»). Комплекс Transalg был применен к исследованию некоторых криптографических функций и дискретно-автоматных отображений, моделирующих динамику генных сетей.

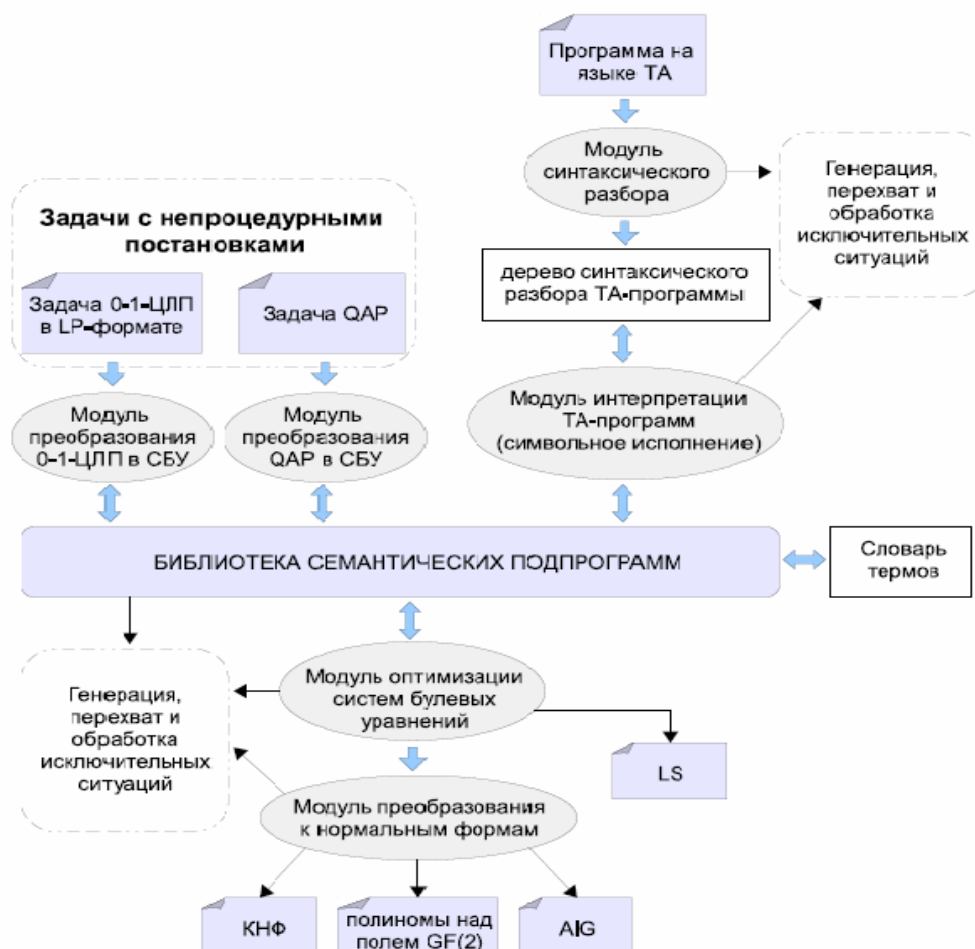


Рис. 13. Схема работы программного комплекса Transalg



**Программа IV.31.2. Новые ГИС и веб-технологии, включая методы искусственного интеллекта, для поддержки междисциплинарных научных исследований сложных природных, техногенных и социальных систем с учетом их взаимодействия.**

**Проект IV.31.2.4. Методы и технологии разработки программного обеспечения для анализа, обработки и хранения разноформатных междисциплинарных данных и знаний, основанные на применении декларативных спецификаций форматов представления информации и моделей программных систем.**

*№ гос. регистрации: 01201001350*

*Научный руководитель – к.т.н. Г.М. Ружников.*

Разработаны структуры данных, позволяющие представлять в памяти информацию из спецификации на языке FlexT при наличии вариантов условной компиляции. Декларативный язык FlexT предназначен для описания форматов бинарных данных, основные его конструкции представляют собой определения различных типов данных. После описания типов данных определяются переменные, т.е. указываются смещения, по которым данные размещаются в файле. Некоторые элементы данных (переменные) могут содержать ссылки на другие элементы данных. Алгоритм разбора содержимого файла анализирует такие ссылки, в результате чего в файле обнаруживаются структуры данных, доступные по ссылкам из явно обозначенных переменных.

Ранее спецификации на FlexT применялись только для разбора содержимого бинарных данных и представления этих данных в понятном человеку виде. В настоящее время разрабатывается механизм генерации кода для чтения данных по спецификациям на языке FlexT. В частности, реализован генератор кода на языке Object Pascal для спецификаций, не использующих условную компиляцию. Механизмы условной компиляции в основном используются в спецификациях на FlexT для учета различных версий форматов. Ранее логические выражения для условий компиляции сразу вычислялись по ходу чтения спецификации с использованием



информации из анализируемого файла, например, номера версии в заголовке файла, после чего в памяти информация о формате данных была представлена лишь для той версии, которая соответствует разбираемому файлу. Для представления в памяти информации о всех версиях формата разработаны следующие структуры данных. Дерево условий компиляции описывает иерархию вложенности условных блоков. Блоки условной компиляции могут применяться как на верхнем уровне, так и внутри некоторых конструкций (записей, списков констант перечислимых типов и т.д.). Для учета этой информации на верхнем уровне и в структурах данных, предназначенных для представления таких конструкций, используются списки имен с условиями выбора связанных с именем объектов, в которых для задания условий выбора используются ссылки на дерево условий компиляции.

Разработан формат представления векторных карт большого объема и алгоритмы работы с ним. Созданы конвертеры, обеспечивающие максимально точное преобразование информации в разработанный формат. Для представления векторных карт предложен метод эффективного хранения неизменяемой информации, основанный на компиляции структур данных, при которой различные блоки памяти структур данных, представляющих информацию объектов карты, компилируются в один общий сохраняемый в файле образ памяти. Помимо образа памяти в файл записывается таблица перемещений – информация об адресах ссылочных полей, содержащихся в этом образе. Ссылочные поля могут содержать адреса других фрагментов образа памяти, адреса внешних по отношению к образу памяти данных, например, таблиц виртуальных методов, а также ключи объектов операционной системы, например, растровых изображений (такие объекты могут создаваться с использованием информации, хранимой отдельно от образа памяти). С использованием предложенного подхода разработан формат SMD, предназначенный для хранения векторных карт. Разработаны конвертеры в формат SMD из ряда популярных форматов карт: SXF и TXF ГИС Панорама, Shape ГИС ArcView, MapInfo, проекты ArcView (\*.apr) и MapInfo (\*.wor). Конвертеры ориентированы на преобразование не только координат, но и способа отображения объектов. За-



грузка всех данных единым блоком выполняется существенно быстрее, по сравнению с традиционным пообъектным чтением. Короткое время загрузки блока позволяет быстро освобождать память от неиспользуемых блоков и подгружать блоки, необходимые для выполнения текущих операций с картой.

Разработаны методы импорта в БД информации из таблиц, методы извлечения табличной информации, представленной в документах в виде машиночитаемого текста, с использованием средств обработки естественного языка. Разработана система трансформации табличной информации от слабоструктурированного представления, содержащего информацию о декомпозиции таблицы на ячейки и связях между ее ячейками, но не содержащего информацию о типах данных ячеек, к отношению реляционной в терминах модели данных. Система обеспечивает структурирование табличной информации за счет восстановления отсутствующей семантической информации (метаданных о таблице) об используемых в таблице типах данных и отношениях. В системе выполняется анализ логической компоновки таблицы (т.е. присвоение каждому элементу таблицы смыслового значения), в частности полуавтоматическое восстановление информации об используемых в таблице типах данных или измерениях (в терминах OLAP, Online Analytical Processing). Предлагаемый анализ логической компоновки основан на использовании словарей регулярных и естественно-языковых выражений, описывающих синонимы и типы данных в таблицах, и выполняет следующие задачи: приведение синонимов заголовков к эталонным написаниям; разметку заголовков (сопоставление заголовкам заранее заданных типов данных); восстановление используемых в таблице измерений в терминах OLAP и формирование таблицы реляционной базы данных. Система является развитием предлагаемой авторами технологии извлечения табличной информации из неструктурированных и слабоструктурированных документов разных форматов.

Исследован процесс разработки программного обеспечения с точки зрения теории сложных систем-комплексов, получены соответствующие интерпретации свойств теории. В рамках логического подхода к генерирующему программированию



нию, основанному на MDA (Model Driven Architecture), исследован процесс разработки программного обеспечения (ПО как вариант приложения теории сложных систем-комплексов). Разработка ПО представлена как комплекс (категория) моделей программной системы различного уровня абстракции. Морфизмами, связывающими модели, выступают алгоритмы, информационные технологии и средства поэтапной трансформации моделей абстрактного уровня в модели конкретного уровня, отображающие аспекты реализации. Известное свойство комплекса как саморазвивающейся системы, а именно тождественность структуры комплекса ее изменениям, проявляется в предложенной системе моделей в виде проблемы распространения изменений между моделями различного уровня абстракции. Показано, что дальнейшее развитие средств MDA должно быть ориентировано на разработку средств анализа модификаций (изменений) моделей, интерпретацию и распространение этих изменений от одной модели к другой.

Разработаны структуры данных для поддержки специализированных стратегий поиска логических выводов в конструктивных вариантах позитивно-образованных формул. Разработана новая версия системы автоматического доказательства теорем в языке и исчислении позитивно-образованных формул (ПО-формул), позволяющая проводить реализацию и исследование стратегий логического вывода. Среда построена на основе интегрирования различных сред программирования. Основу составляет логическое ядро, представляющее новую реализацию на языке программирования C. Логическое ядро реализует базовую стратегию поиска логического вывода, трансляцию исходного текста формул, ввод-вывод и т.п. Ядро реализует алгоритмы, созданные в версии на языке D (исследования 2010 года), но при повышении эффективности за счет использования специализированной версии сборщика мусора. Тестовые испытания системы АДТ, реализованной на языке D, показали, что реализация системы сборки мусора является местом значительного понижения производительности системы АДТ. Для решения проблемы произведен анализ имеющихся структур данных и разработки специализированной подсистемы сборки мусора. Анализ структур данных пока-



зал, что элементами данных, подвергающихся сборке мусора, являются структуры фиксированного размера (узлы дерева, термы, дескрипторы), что позволило реализовать для каждой такой структуры собственную подсистему выделения памяти (allocator). Введено дополнительное ограничение – на доказываемую формулу (древовидную структуру данных) ссылается только одна переменная из статической области данных программы, а все вспомогательные переменные в стеке ссылаются на какое-либо поддереву формулы. Данное ограничение позволяет производить сборку мусора методом «Mark and Sweep» (метод отметок) без анализа ссылок из регистров микропроцессора, ссылок из стека и других сегментов оперативной памяти. Ограничение структурами фиксированного размера при сборке мусора позволило сократить количество просматриваемых объектов при выполнении операции сборки мусора. Для разработанного ядра реализованы два программных интерфейса к языкам программирования Python и Vala.

Разработаны алгоритмы поиска картографических объектов на векторной топографической карте с использованием их спецификаций. Разработан логико-синтаксический метод распознавания объектов, предназначенный для поиска объектов на растровых и векторных изображениях в условиях неполноты и размытости информации. Метод основывается на логическом выводе с использованием структурного описания объектов. Поиск границ объектов на изображении выполняется как унификация встроенных предикатов с учетом множества ограничений, заданных описанием. В рамках проекта для спецификации структуры объектов разработано пространственное исчисление объектов. Основой пространственного исчисления является логический язык программирования Пролог. Для реализации предлагаемого подхода Пролог дополнен следующими сущностями: 1) множество переменных, описывающих положение точек на изображении (область определения этих переменных ограничена размерами изображения); 2) множество пространственных ограничений; 3) встроенные пространственные предикаты. Разработаны алгоритмы унификации предиката Line для векторных изображений с уче-



том множества ограничений, заданных описанием. Алгоритмы унификации используют диаграмму Вороного для уменьшения времени работы.

Реализована поддержка модульного программирования декларативных спецификаций приложений баз данных. Это позволяет оптимизировать разработку спецификаций приложений БД, в том числе ускорить процесс разработки новых спецификаций сложных информационных систем (приложений БД) за счет использования уже существующих спецификаций приложений и структур БД, а также упорядочить и сократить объем кода существующих спецификаций путем их разделения на взаимосвязанные блоки и использования общих фрагментов спецификаций. При этом могут быть заданы правила переопределения схем размещения таблиц, что позволяет переопределить пути к таблицам с точки зрения используемой для доступа к БД схемы данных. Чтобы разделить пространства имен, для включаемой (импортируемой) спецификации может задаваться префикс имен таблиц и представлений. Импортированные спецификации фрагментов схем БД могут использоваться при описании связей таблиц и описании представлений в главной спецификации.

Разработана система генерации отчетов, содержащих информацию из БД и ГИС, на основе шаблонов разметки отчета и объектов MS Word. При создании отчетов по объектам топоосновы семантика объекта воспринимается генератором отчетов как поля записи таблицы, а метрика – как детали. При этом именами полей выступают имена соответствующих семантик. В процессе подготовки отчета выполняется обработка разметки шаблона: по параметрам меток шаблона выполняется дополнительная обработка генерируемых данных отчета (форматирование, склонение по падежам и др.). Также система позволяет публиковать в отчетах фрагменты топоосновы с помощью отрисовки объектами работы с графикой MS Word.

Реализована поддержка технологии DCOM (Distributed Component Object Model) для интеграции ГИС и БД. Это позволяет использовать функции ГИС-подсистемы ГеоАРМа программами сторонних разработчиков. Реализованы про-



граммный и пользовательский интерфейсы доступа к ГИС-подсистеме в виде СОМ-сервера, который обеспечивает выполнение ряда функций для работы с топоосновой (масштабирование, перемещение, получение информации по объекту, создание пользовательских слоев и др.). Кроме того, данная реализация позволяет средствами ОС Windows исключить несанкционированное копирование файла электронной карты.





**Приоритетное направление IV.32. Архитектура, системные решения, программное обеспечение и информационная безопасность информационно-вычислительных комплексов и сетей новых поколений. Системное программирование.**

**Программа IV.32.1. Архитектура, системные решения, программное обеспечение и информационная безопасность информационно-вычислительных систем новых поколений.**

**Проект IV.32.1.2. Информационно-вычислительные системы нового поколения для формаций автономных необитаемых аппаратов.**

*№ гос. регистрации: 01201001346*

*Научный руководитель – ак. И.В. Бычков.*

В рамках проекта развит подход к решению задачи планирования маршрутов для группы аппаратов на основе генетических алгоритмов (ГА), разработанный на предыдущем этапе выполнения проекта. В генетические алгоритмы добавлен дополнительный оператор в процесс получения новых особей: помимо скрещивания и мутации, применяемых с некоторой вероятностью, разработаны два оператора инверсии, применяемых направленно и служащих для уменьшения числа пересечений внутри маршрута. Наличие таких пересекающихся маршрутов не только грозит возможным столкновением аппаратов в области пересечения, но и, зачастую, говорит о неэффективном порядке прохождения целей аппаратами. Здесь под направленностью оператора подразумевается его применение не для случайных хромосом, а только для тех, в которых при моделировании соответствующего им маршрута найдены пересечения.

Первый оператор – *оператор блочной инверсии* – исключает пересечения между маршрутами двух разных аппаратов. Оператор используется, если траектории двух АНПА пересекаются друг с другом более чем один раз. Оператор блочной инверсии выбирает две случайные точки пересечений, после чего переставля-

ет местами блоки вершин, лежащих между этими точками у первого и второго АНПА.

Оператор обратной инверсии, в свою очередь, отвечает за исключение самопересечений отдельными аппаратами своих же траекторий. Оператор выбирает случайную точку самопересечения, после чего разворачивает весь блок вершин, по которым проходит аппарат внутри найденной «петли».

Кроме того, в список случаев, требующих перепланирования группового маршрута, добавлено два новых сценария: непредвиденное изменение заряда аккумулятора у одного или нескольких АНПА и смена планируемых точек завершения миссии у аппаратов группы. Для сценария с выходом аппаратов из строя ограничение на наличие связи в группе расширено введением понятия коммуникационной устойчивости, позволяющей группе не «распадаться» при потере одного или даже нескольких аппаратов.

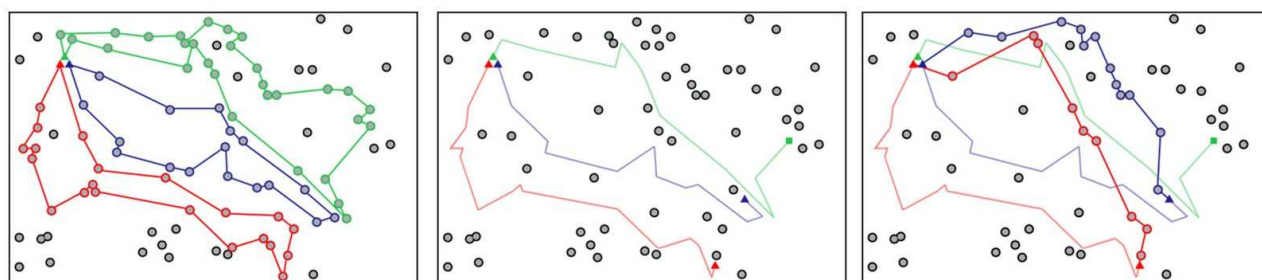


Рис. 14. Выполнение группой АНПА динамической миссии с ограничением по времени и непредвиденным выходом одного аппарата из строя

Разработана моделирующая система «AUV Mission Planner», позволяющая планировать динамические миссии и симулировать их выполнение группой АНПА. «AUV Mission Planner» обладает следующими функциональными возможностями:

- Настройка миссии (загрузка и редактирование карт, ручная и автоматическая расстановка объектов, аппаратов, целей);
- Ввод ограничений на движение АНПА (длина маршрута, учет связи);
- Введение запретных для движения и/или установки связи зон;
- Выбор параметров ГА (длина хромосом, размер популяции, островов);



- Симуляция выполнения группой миссии по построенному маршруту с возможностью внесения изменений «по ходу».

В рамках программной реализации решен ряд задач (рис. 14, 15), связанных, в первую очередь, с проверкой полученного с помощью ГА маршрута на коммуникационную устойчивость. В ходе проверки последовательно выполняются 2 подзадачи:

- Определение местоположения группы аппаратов в моменты установки сеансов связи;
- Формирование графа связи группы и его проверка на  $n$ -связность.

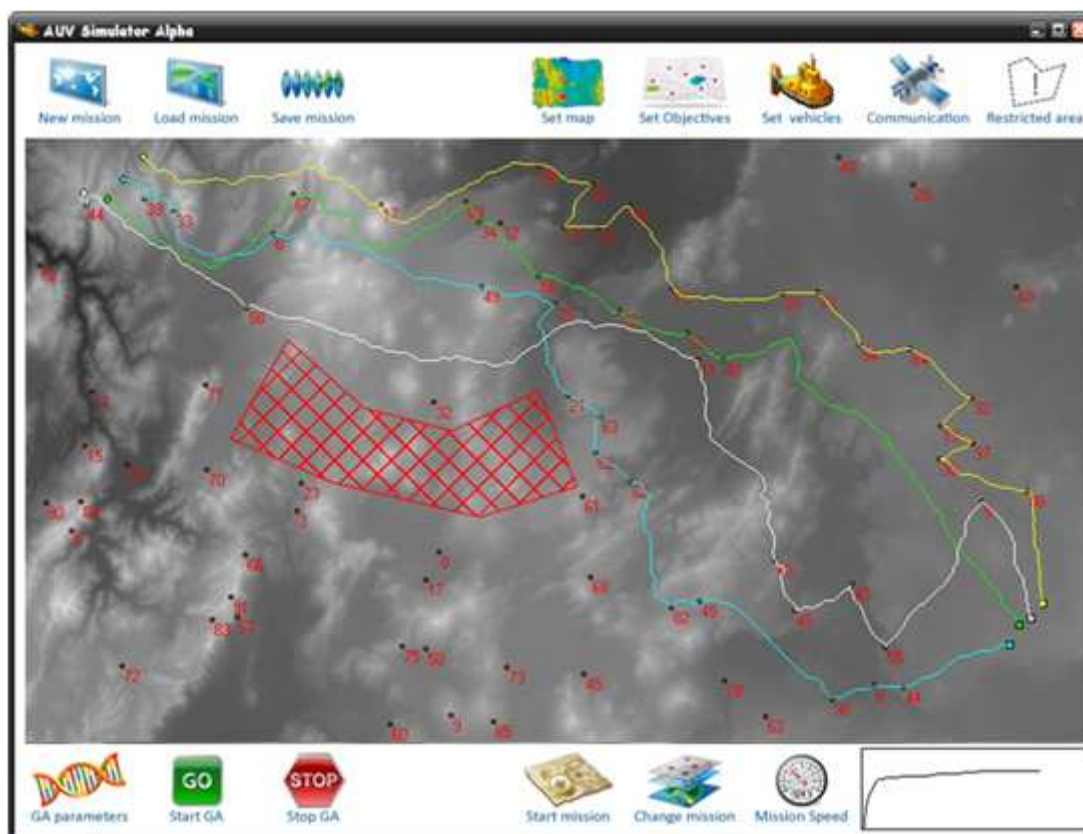


Рис. 15. Пример построенного маршрута для группы из трех АНПА на заданном множестве целей в окне программы-симулятора

Для решения первой подзадачи предложен способ хранения траекторий путей на трехмерной карте в виде «слоев Дийкстры», не требующей динамических операций с памятью и позволяющий без временных затрат получать координаты аппарата в любой момент его прохождения по маршруту.

Решение второй подзадачи выполняется в три этапа. В первую очередь проверяется возможность установки связи между отдельными двойками аппаратов. Затем осуществляется проверка на отсутствие препятствий между АНПА на основе модифицированного алгоритма двоичного поиска, после чего производится проверка графа на  $n$ -связность.

Выполнен расчет программных управлений группировкой АНПА для задачи обследования или съемки плоской области (рис. 16) путем ее многократного сканирования встречными галсами при требовании обеспечения с заданной точностью конфигурации группы во время рабочих ходов. В предположении, что навигационной системой, приемлемой для отслеживания расчетного движения, обладает только лидер группировки, а остальные ее члены имеют возможность измерять лишь взаимное положение (дистанцию и угол пеленга) относительно лидера или друг друга, управление для последних на участках сканирования строится по принципу «лидер-ведомый», а на участках перестроения – как чисто программное.

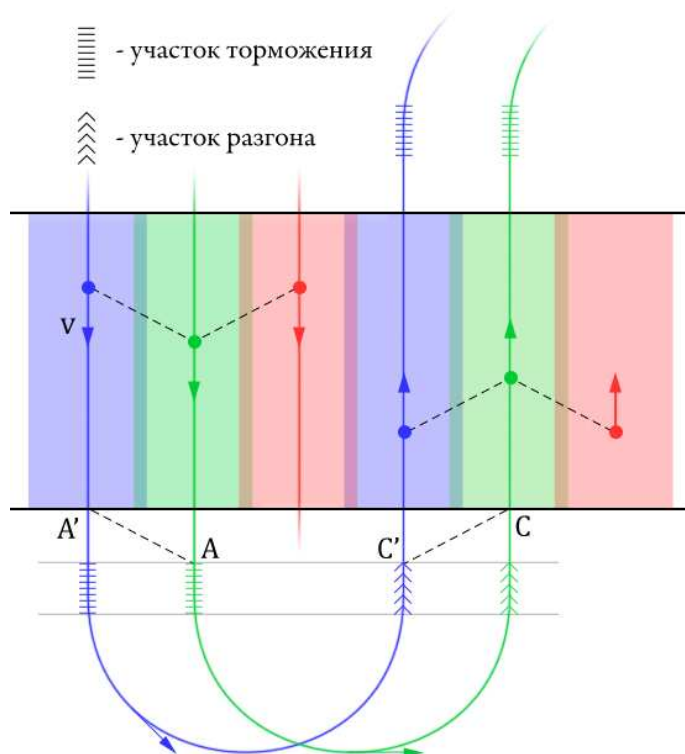


Рис. 16. Пример траекторий движения аппаратов при групповом обследовании  
плоской области



На основе формализации желаемого поведения формации на рабочих участках, как динамического свойства диссипативности, средствами пакета «ВФЛ-РЕДУКТОР» проведен синтез полного управления (включая синтез наблюдателей для получения оценок скоростей), учитывающий неопределенности масс аппаратов и сил сопротивления, погрешности элементов системы и другие факторы, присущие реальной ситуации. Моделированием показано приемлемое качество синтезированного управления.

Рассмотрена следующая подзадача в рамках задачи охраны морской акватории: пусть исследуемая группой АНПА акватория значительных размеров разделена на несколько областей, каждая из которых содержит интересные с той или иной точки зрения цели. Предположим при этом, что в акватории расположены некоторые объекты, способные отдавать АНПА управляющие сигналы, – координаторы. В качестве таких координаторов могут выступать специализированные подводные аппараты, донные буи (маяки), надводные аппараты, корабли и пр. Координаторы закрепляются за областями так, чтобы, отдавая аппаратам команды, переместиться из одной области в другую, регулировать число АНПА в областях. Особенностью задачи является тот факт, что в распоряжении каждого координатора имеются лишь приблизительные оценки числа аппаратов в контролируемых им областях. Естественным обобщением рассмотренных на предыдущем этапе проекта задач является проблема пропорционального распределения АНПА по областям, на которые разбита подлежащая исследованию акватория, при наличии приоритетов – величин, определяющих долю от общего числа имеющихся в наличии аппаратов, которую следует направить в ту или иную область. Разработан алгоритм перераспределения АНПА в соответствии с заданными приоритетами для топологии с возможностью сокращения путей по кольцу (рис. 17).

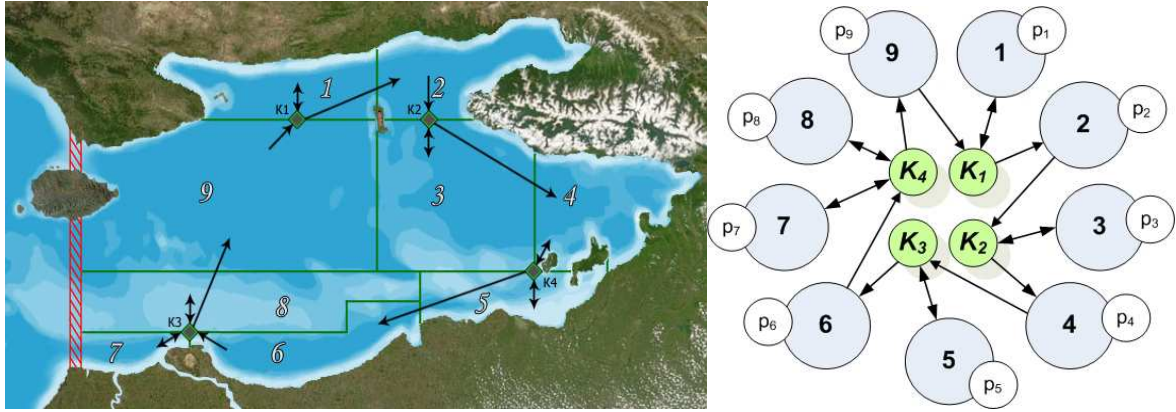


Рис. 17. Перераспределение при наличии приоритетов областей

Итак, пусть для каждой области  $a \in A = \{1, \dots, N_a\}$ , где  $N_a$  – их общее число, задан ее приоритет  $p_a$ . Пропорциональное распределение аппаратов по областям в соответствии с приоритетами описывается множеством

$$X_{P_{id}} = \{x \in X_L : x_a \in \{m_a, m_a + 1\} \text{ для всех } a \in A\},$$

где  $m_a = \lfloor \frac{L}{P} \cdot p_a \rfloor$ ,  $P = p_1 + \dots + p_{N_a}$ ,  $L$  – общее число АНПА (здесь  $\lfloor x \rfloor$  – наибольшее целое число, меньшее или равное  $x$ ).

Обозначим через  $C(a)$  координатора, обладающего правом перемещать АНПА из области  $a$ . Пусть  $S(c) \subset A$  множество областей, из которых  $C(a)$  может удалять АНПА, т.е.  $S(c) = \{a \in A : C(a) = c\}$ . Обозначим через  $D(c)$  множество областей, в которые координатор  $c$  может добавлять АНПА. Предложенный алгоритм обеспечивает приближенное к идеальному равномерное распределение в соответствии с приоритетами

$$X_P = \{x \in X_L : \frac{x_{a'}^c(k)}{p_{a'}} - \frac{x_{a''}^c(k)}{p_{a''}} < \frac{1}{p_{a'}} + \frac{1}{p_{a''}} \quad \forall a' \in S(c), \quad \forall a'' \in D(c), \quad c = 1, \dots, N_c\}.$$

**Теорема.** Для ДСС, описывающей модель распределения АНПА по областям с учетом приоритетов, замкнутое множество  $X_P$  инвариантно и устойчиво по Ляпунову относительно множества всех действительных событийных траекторий  $E_v$ , определяемых алгоритмом распределения.