



**РЕЗУЛЬТАТЫ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ПО ПРОГРАММАМ СО РАН**

В соответствии с Планом НИР и Государственным заданием на 2017 год выполнялись исследования по 6 научным (базовым) темам в рамках двух приоритетных направлений и программ фундаментальных исследований СО РАН на 2017–2020 гг.:

I. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

Приоритетное направление 1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МАТЕМАТИКА

Программа I.1.4. Исследование задач динамики и управления: качественный и численный анализ

Координатор программы: чл.-к. РАН А.А. Толстоногов

Тема I.1.4.1. Эволюционные уравнения и управляемые системы: теория, численный анализ и приложения

№ гос. регистрации: АААА-А17-117032210080-7

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

В сепарабельном гильбертовом пространстве рассмотрено эволюционное включение, правая часть которого содержит субдифференциал неавтономной собственной выпуклой полунепрерывной функции и многозначное возмущение с невыпуклыми замкнутыми неограниченными значениями. Наряду с этим включением рассмотрено включение с овыпукленным возмущением. Доказаны существование решений и плотность множества решений исходного включения в замыкании множества решений включения с овыпукленным возмущением. В отличие от известных результатов такого типа мы не предполагаем, что выпуклая функция обладает свойством компактности и что значения многозначного возмущения являются ограниченными множествами

(автор: чл.-к. РАН А.А. Толстоногов).

Рассмотрена управляемая система двух обыкновенных дифференциальных уравнений, описывающая эффект гистерезиса. Многозначная функция, задающая ограничение на управление, может принимать невыпуклые значения. Исследована задача релаксации для данной системы, т.е. аппроксимация решений системы с овыпукленными ограничениями на управление решениями исходной системы. Отличительной особенностью данной задачи является неограниченность значений функции ограничения на управление и ослабление традиционного для данного типа задач условия Липшица по фазовой переменной для данной функции *(автор: к.ф.-м.н. С.А. Тимошин).*

Рассмотрена управляемая система, описываемая нелинейными дифференциальными уравнениями в частных производных, возникающая при описании фазовых переходов. Ограничение на управление задается зависящим от фазовых переменных многозначным отображением, принимающим невыпуклые значения. Исследована задача минимизации невыпуклого по управлению интегрального функционала на решениях рассматриваемой системы. Изучена сходимости минимизирующей последовательности исходной задачи к решению, которое существует, овыпукленной задачи оптимального управления

(автор: к.ф.-м.н. С.А. Тимошин).



*Отчет Института динамики систем и теории управления
имени В.М. Матросова СО РАН за 2017 г.*

В конечномерном евклидовом пространстве рассмотрено дифференциальное включение с невыпуклым неограниченным возмущением. Вместо традиционного предположения липшицевости в метрике Хаусдорфа многозначного возмущения использовано понятие липшицевости, являющееся более естественным для многозначных отображений с неограниченными значениями. Наряду с заданным включением рассмотрено включение с овыпукленным возмущением. Доказано существование решений включений и получена теорема релаксации (плотность множества решений исходного включения в множестве решений овыпукленного включения) (*автор: к.ф.-м.н. С.А. Тимошин*).

Разработан метод предельных дифференциальных включений для функционально-дифференциальных уравнений с разрывной правой частью с использованием инвариантно-дифференцируемых функционалов Ляпунова. Предложены новые подходы к построению предельных дифференциальных включений и изучены свойства типа инвариантности правых предельных множеств неавтономных функционально-дифференциальных уравнений с разрывной правой частью. Изучены свойства предельных дифференциальных включений для систем с последствием и доказаны аналоги принципа инвариантности (*автор: д.ф.-м.н. И.А. Финогенко*).

Рассмотрена задача управления уравнением неразрывности в конечномерном евклидовом пространстве. Это уравнение описывает процесс переноса массы векторным полем и потому на него можно смотреть как на динамическую систему в пространстве мер. Предполагается, что векторное поле, вдоль которого переносится масса, является линейной функцией управления или другими словами линейной комбинацией конечного семейства векторных полей. При условии, что это семейство является скобочно образующим (bracket generating), доказана аппроксимативная управляемость системы в классе распределенных (зависящих от временной и пространственной координаты) управлений (*автор: к.ф.-м.н. Н.И. Погодаев*).

Для линейных стационарных ДАУ показано, что возмущения коэффициентов системы не могут быть произвольными, поскольку введение в систему произвольно высокого индекса неопределенностей может полностью изменить не только ее структуру, но и дифференциальный порядок. При возмущениях различной структуры, подчиняющихся условию малости матричных норм, получены условия, гарантирующие, что введение матричных неопределенностей в коэффициенты не нарушает дифференциальный порядок и внутреннюю структуру рассматриваемой системы. В предположениях, обеспечивающих сохранение структуры, получены достаточные условия робастной устойчивости для систем, у которых неопределенность присутствует не только в матрице при искомой функции, но и в матрице при производной (*авторы: д.ф.-м.н. А.А. Щеглова, А.Д. Кононов*).

Рассматривались линейные системы ДАУ, содержащие в своей динамике как непрерывные, так и дискретные переменные (вырожденные гибридные системы). Для таких систем построена структурная форма, эквивалентная исходной системе в смысле решений, получены необходимые и достаточные условия разрешимости начальной задачи, а также условия согласования начальных данных как для случая с непрерывным, так и с кусочно-непрерывным решением (*автор: к.ф.-м.н. П.С. Петренко*).

Для ДАУ высокого порядка изучены возмущения (необязательно малые) операторами Вольтерра. Получены условия разрешимости исходных и возмущенных систем и начальных задач для них. Обоснованы критерии, при выполнении которых у возмущенных систем



*Отчет Института динамики систем и теории управления
имени В.М. Матросова СО РАН за 2017 г.*

сохраняется структура решений. Обсуждается влияние малых возмущений свободного члена и начальных данных на решение (получены соответствующие оценки). Предложен способ вычисления особых точек решений, в которых решения имеют разрывы или ветвятся. В рамках теорем существования обоснован численный метод (авторы: д.ф.-м.н. В.Ф. Чистяков, к.ф.-м.н. Е.В. Чистякова).

Исследовались системы интегро-дифференциальных уравнений (ИДУ) Вольтерра и интегральные уравнения Вольтерра с тождественно вырожденной матрицей в области определения при главном члене. Такие системы интегральных уравнений принято сейчас называть интегро-алгебраическими уравнениями (ИАУ). Получены условия разрешимости и указана структура общих решений. В условиях теорем существования рассмотрено возмущение систем ИДУ операторами Фредгольма. Указана структура общих решений таких систем. Основным методом исследования является подход, основанный на анализе продолженных систем и свойств матричных многочленов, определенным образом поставленных в соответствие изучаемым ИДУ и ИАУ (авторы: д.ф.-м.н. В.Ф. Чистяков, к.ф.-м.н. Е.В. Чистякова).

Получены достаточные условия существования единственного решения ИАУ с переменными пределами интегрирования в классе непрерывных функций. Для численного решения интегро-алгебраических уравнений с переменными пределами интегрирования предложено семейство многошаговых методов, основанных на явных квадратурных формулах Адамса для интегрального слагаемого и на экстраполяционных формулах для главной части. Проведен анализ модели долгосрочного развития электроэнергетической системы. Данная модель имеет вид интегро-алгебраического уравнения с переменными пределами интегрирования (автор: д.ф.-м.н. М.В. Булатов).

Для ДАУ индекса не выше двух предложены и обоснованы частные случаи коллокационно-вариационных разностных схем, а именно, интерполяционный вариант разностных схем с одной точкой коллокации. Данная схема рассматривается как одношаговый метод с ограничением-равенством, к которому мы добавляем условие минимума целевой функции и таким образом переходим к специальной задаче математического программирования, которая сводится к решению системы линейных алгебраических уравнений методом множителей Лагранжа. Доказана теорема сходимости, проведены численные расчеты на модельных примерах (авторы: д.ф.-м.н. М.В. Булатов, к.ф.-м.н. Л.С. Соловарова).

Рассмотрены квазилинейные дифференциально-алгебраические уравнения с регулярным матричным пучком, построенным по коэффициентам системы произвольного индекса. Предложен новый алгоритм численного решения, обладающий высокой точностью. Алгоритм основан на идее расщепления матричного пучка, анализе его структурной формы и аппроксимации производных степенными сплайнами различных порядков (автор: к.ф.-м.н. С.В. Свинина).

Доказан позиционный принцип минимума для минимаксной задачи оптимального управления с гладкой по состоянию динамикой. Целевая функция задачи есть максимум конечного числа гладких функций, т.е. является квазидифференцируемой. Доказательство основано на новой конструкции опорной мажоранты функционала задачи и соответствующих позиционных управлениях спуска. Помимо самостоятельного значения результат позволяет получать позиционный принцип максимума для задач оптимального



**Отчет Института динамики систем и теории управления
имени В.М. Матросова СО РАН за 2017 г.**

управления с терминальными ограничениями типа неравенства путем их редукции к негладким минимаксным задачам (автор: д.ф.-м.н. В.А. Дыхта).

Для нелинейных задач оптимального управления в дискретных системах установлено, что позиционный принцип минимума существенно усиливает дискретный принцип максимума (типа Понтрягина). Во-первых, позиционное условие справедливо без предположений выпуклости управляемой системы и целевой функции (классический результат здесь, вообще говоря, не применим). Во-вторых, на общей области применимости позиционный принцип минимума гарантированно отбраковывает неэкстремальные процессы, в то же время позволяет улучшать по функционалу неоптимальные стационарные управления (автор: к.ф.-м.н. С.П. Сорокин).

Для задачи оптимального управления дискретной нелинейной динамической системой с нелинейной целевой функцией при точечных фазовых и общем конечном ограничении на траектории получены внешние оценки множеств достижимости при учете фазовых ограничений. На базе оценок доказано достаточное условие оптимальности в соответствующих задачах управления, не требующее выпуклости входных данных (автор: к.ф.-м.н. С.П. Сорокин).

Предложен алгоритм построения позиционных управлений спуска по функционалу в задаче оптимального управления с терминальным функционалом, основанный на формировании численных решений неравенства Гамильтона-Якоби в некоторой области расширенного фазового пространства. После дискретизации рассматривается задача с дискретным временем. В части численного нахождения решений неравенства Гамильтона-Якоби алгоритм представляет собой упрощенный вариант метода решений уравнения эйконала и стационарных уравнений Гамильтона-Якоби, требующий существенно меньших вычислительных затрат. В ходе работы различные модификации алгоритма тестировались на задачах построения множества достижимости импульсных систем и на задаче восстановления формы тела по изображению (обе эти задачи требуют численного решения некоторого стационарного уравнения Гамильтона-Якоби-Беллмана) (автор: к.т.н. В.А. Воронов).

Для линейных по состоянию задач дискретного оптимального управления реализован итерационный алгоритм позиционного улучшения целевого функционала, который основан на позиционном принципе минимума. Алгоритм протестирован на нескольких примерах с билинейными динамическими системами. Результаты расчетов алгоритмом позиционного улучшения совпали с результатами, полученными модифицированным методом парабол (авторы: к.ф.-м.н. С.П. Сорокин, д.т.н. А.Ю. Горнов).

Получено описание множества решений импульсной управляемой системы с гистерезисной нелинейностью в правой части. Для случая скалярного гистерезиса типа люфт доказаны теоремы об аппроксимации решений ограниченной вариации последовательностями абсолютно непрерывных решений (авторы: к.ф.-м.н. О.Н. Самсонюк, к.ф.-м.н. С.А. Тимошин).

Предложена формализация позиционного импульсного управления, основанная на пространственно-временном представлении импульсной системы с траекториями ограниченной вариации. Такое представление позволяет описать многозначное решение импульсной системы как параметрически заданную функцию вспомогательной переменной τ , являющейся суммой «реального» времени t и так называемого «быстрого» времени V



**Отчет Института динамики систем и теории управления
имени В.М. Матросова СО РАН за 2017 г.**

(характеризующего импульсную динамику системы). На основе предложенной формализации позиционного управления было получено необходимое условие оптимальности с позиционными управлениями для импульсных процессов. Это необходимое условие названо позиционным принципом минимума, оно является обобщением соответствующего одноименного критерия для классических задач оптимального управления (*автор: к.ф.-м.н. О.Н. Самсонок*).

Исследован вопрос существования решения в задаче оптимального импульсного управления с траекториями ограниченной p -вариации, $1 < p < 2$. Получено конструктивное представление импульсной управляемой системы через специальное дискретно-непрерывное интегральное уравнение, включающее интеграл Юнга (*авторы: к.ф.-м.н. Е.В. Гончарова, к.ф.-м.н. О.Н. Самсонок, к.ф.-м.н. М.В. Старицын*).

Исследован класс механических систем с быстрыми вибрациями и блокируемыми степенями свободы. Предложена формализация таких систем в форме гибридной динамической системы с нелинейными импульсами, где линейная (аффинная) компонента импульсного воздействия связана с соответствующим решением посредством общего ограничения, задающего множество допустимых состояний до и после любого из аффинных импульсов. Разработана схема аппроксимации импульсной динамической системы обычными управляемыми процессами, которая сводится к поиску близкого в слабой топологии и в некотором смысле квазиортогонального управляемого процесса. Дано конструктивное описание замыкания множества аппроксимирующих решений (релаксации системы) в слабой топологии. Получен результат о существовании решения задачи оптимального управления такими системами (*авторы: к.ф.-м.н. Е.В. Гончарова, к.ф.-м.н. М.В. Старицын*).

Предложена вычислительная технология аппроксимации множества достижимости (МД) на плоскости для нелинейных управляемых систем с линейным вхождением управления и полиэдральным множеством допустимых управлений. В основу алгоритмов положен “bang-bang”-принцип – перебор граничных точек допустимого множества и метод стохастической аппроксимации (СА), хорошо показавший себя при решении ряда более простых задач фазового оценивания. Работа алгоритмов управляется единственным алгоритмическим параметром, контролирующим число точек переключения пробных управлений. Эффективность реализованной технологии исследована на ряде тестовых моделей (*авторы: д.т.н. А.Ю. Горнов, к.т.н. Т.С. Зароднюк, Е.А. Финкельштейн*).

Предложена модификация метода «квазиравномерного заполнения» (КЗ), ориентированная на класс систем с полиэдральным множеством допустимых управлений. Реализованный алгоритм накапливает информацию об аппроксимирующих МД точках в специальной базе проб, при этом на каждой итерации контролируется близость новых точек к точкам, уже заложенным в базу. Близость двух пробных состояний оценивается евклидовой нормой разницы состояний системы в конечный момент времени. Работа алгоритма управляется алгоритмическим параметром – размером отсекающих евклидовых шаров, на основе которых производится селекция новых пробных точек в терминальном фазовом пространстве (*авторы: д.т.н. А.И. Тятюшкин, А.С. Аникин*).

Проведено многовариантное тестирование разработанных алгоритмов и вычислительных технологий. Достоверность полученных результатов расчетов проверена путем сравнения вычислительных экспериментов на популярных модельных примерах, для



которых полиэдральное множество совпадает с параллелепипедом и для которых уже разработано и хорошо исследовано значительное количество надежных методов и алгоритмов (авторы: д.т.н. А.Ю. Горнов, к.т.н. Т.С. Зароднюк, А.С. Аникин, Е.А. Финкельштейн).

Тема I.1.4.2. Развитие математических методов описания процессов в физике высоких энергий, высокотемпературной плазме и механике сплошных сред

№ гос. регистрации: АААА-А17-117032210076-0

Научный руководитель – д.ф.-м.н. Ю.А. Марков

Предложен метод обращения внешнего лучевого преобразования для скалярных и векторных полей в области $R^3 \setminus B^3(0, r_0)$, т.е. для случая наличия экспериментальных данных во внешности шара радиуса r_0 . Метод основан на разложении полей по базисным, скалярным и векторным волновым функциям. Лучевые преобразования от базисных функций получены в аналитическом виде. Задача определения коэффициентов разложения сведена к задаче минимизации квадратичного функционала, которая эффективно решается с использованием метода сингулярного разложения. Доказаны соответствующие леммы. Примеры базисных векторов Хансена $M_l^m(\mathbf{r})$, $N_l^m(\mathbf{r})$ для $l=3$, $m=2$ приведены на рисунке 8 (автор: д.ф.-м.н. А.Л. Баландин).

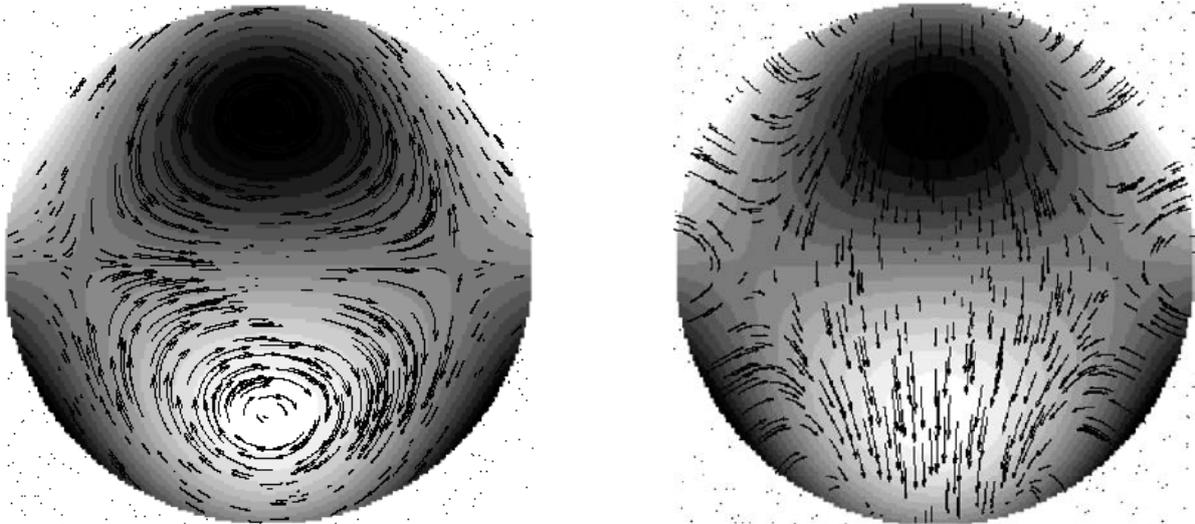


Рис.8. Примеры базисных векторов Хансена

Развит подход к определению поляризации частицы после взаимодействия. Было показано, что вместо стандартного подхода с вычислением поляризации конечных продуктов взаимодействия с помощью квадрата матрицы рассеяния можно найти эту поляризацию прямо из амплитуды (т.е. из самой матрицы рассеяния). Хотя новый подход не дал ничего нового для конечных частиц, однако позволил определить понятие поляризации для частиц в промежуточном состоянии, в котором частица описывается при помощи пропагатора (функции распространения). Данное новое понятие поляризации для частиц в промежуточном состоянии была интерпретирована как комбинация частицы–античастицы с некоторой вполне определенной поляризацией. Было показано, что этот подход имеет



**Отчет Института динамики систем и теории управления
имени В.М. Матросова СО РАН за 2017 г.**

приложение к распространению нейтрино, в котором рассматривается макроскопический пропагатор, что позволило нам говорить о поляризации нейтрино в момент взаимодействия. В качестве другого приложения было рассмотрено поляризация t -кварка (автор: к.ф.-м.н. В.П. Ломов).

Для нелинейного уравнения теплопроводности в случае степенной зависимости коэффициента теплопроводности от температуры доказаны новые теоремы существования и единственности аналитических решений (в виде кратных степенных рядов), получены новые классы специальных точных решений (построение сводится к интегрированию обыкновенных дифференциальных уравнений второго порядка) и предложены оригинальные численные алгоритмы построения приближенных решений (на основе гранично-элементного подхода). Все найденные решения описывают распространение с конечной скоростью тепловых волн различного вида на прямой, плоскости, а также в трехмерном пространстве симметрично относительно начала координат (авторы: д.ф.-м.н. А.Л. Казаков, к.ф.-м.н. П.А. Кузнецов, Св.С. Орлов).

В рамках подхода Бет-Уленбека на основе модели Намбу-Йона-Лазинио с петлями Полякова рассмотрена эволюция как связанных состояний, так и состояний рассеяния. Оценены зависимости от температуры и химического потенциала фазовых сдвигов для псевдоскалярных, скалярных изовекторных мезонных каналов для ароматов кварков $N_f=2+1$. Показано, что изменение характера псевдоскалярных связанных состояний при температуре перехода Мотта сигнализируется скачком фазового сдвига на пороге от π до нуля в соответствии с теоремой Левинсона. Показана важность учета состояний рассеяния континуума, что гарантирует исчезновение полного фазового сдвига в каждом из мезонных каналов при высоких энергиях. Таким образом, данный подход обеспечивает унифицированное описание перехода от мезонного газа к кварк-глюонной плазме. Обсуждается возникновение аномальной моды для мезонов, состоящих из кварков с неравными массами, и возможное отношение данной моды к объяснению эффекта пика в отношении K^+/π^+ в столкновениях тяжелых ионов (автор: к.ф.-м.н. А.Е. Раджабов).

Исследованы взвешенные суммы степеней натуральных чисел, возникающие при построении непрерывного предела интегрируемой иерархии эволюционных дифференциально-разностных уравнений цепочки Богдавленского. На основе вычислений в среде Maple предложен ряд гипотез относительно представления этих сумм специальными многочленами, а также относительно связи этих сумм с суммами степеней высшего порядка (автор: к.ф.-м.н. А.К. Свинин).

Исследована нелинейная система реакции-диффузии, моделируемая системой уравнений параболического типа со степенными нелинейностями. Предложена конструкция точных решений, позволяющая декомпозировать процесс отыскания компонент, зависящих от времени и пространственных координат. Построены новые многопараметрические семейства точных решений, задаваемых элементарными функциями. Выделены случаи взрывающихся (blow-up solutions) или периодических по времени и анизотропных по пространственным переменным точных решений (автор: к.ф.-м.н. Э.И. Семенов).



Тема I.1.4.3. Качественный анализ динамических свойств и синтез управлений гибридными механическими системами с развитием средств компьютерной алгебры и средств численной реализации

№ гос. регистрации: АААА-А17-117032210082-1

Научный руководитель – д.т.н. Э.И. Дружинин

Предлагается новый метод расчета управлений переориентацией космических аппаратов (КА), обеспечивающий их эффективную реализацию системой коллинеарных пар однокарданных силовых управляющих гироскопов (гиродинов). Технология метода продемонстрирована в задаче управления посредством гиродинов перманентным гашением угловой скорости вращения аппарата вокруг его центра масс при ненулевом значении кинетического момента аппарата после его разгрузки (*автор: д.т.н. Э.И. Дружинин*).

Предложен метод построения динамических моделей больших космических конструкций (БКК) при неопределенности значений их параметров, неполноты и ошибок измерений состояния конструкций в условиях реальной эксплуатации. Метод позволяет при отсутствии возможности наземного тестирования БКК формировать для них грубые, структурно устойчивые динамические модели (*автор: д.т.н. Э.И. Дружинин*).

В терминах угловой метрики подпространств гильбертова пространства определены достаточные условия разрешимости задачи, когда для двух различных пучков динамических процессов, индуцированных одной гиперболической системой, но с разными нестационарными полилинейными регуляторами, существует такая полилинейная реализация регулятора, что при наличии данной реализации объединение этих пучков будет представлять семейство допустимых решений означенной гиперболической системы (*автор: д.ф.-м.н. В.А. Русанов*).

По линеаризованным уравнениям возмущенного движения получены условия устойчивости относительного равновесия спутника с управляемым гравитационным стабилизатором на круговой орбите. В пространстве введенных параметров найдены области с различными степенями неустойчивости по Пуанкаре. Предполагая неустойчивость потенциальной системы, рассмотрен вопрос о возможности ее стабилизации до асимптотической устойчивости. Проведен параметрический анализ полученных неравенств с помощью средств для символьно-численного моделирования СКА «Mathematica» (*автор: к.ф.-м.н. А.В. Банщиков*).

Получены необходимые и достаточные условия реализации нестационарного полилинейного регулятора дифференциальной системы второго порядка (в том числе гиперболической), содержащей в качестве допустимых решений заданное не ограниченное по мощности (конечное/счетное/континуальное) множество бесконечномерных управляемых динамических процессов в сепарабельном гильбертовом пространстве (*авторы: д.ф.-м.н. В.А. Русанов, д.ф.-м.н. А.В. Лакеев*).

На базе аппарата алгебраической топологии в сепарабельном гильбертовом пространстве исследовано свойство РЛД-совместимости конечной ступени в анализе разрешимости задачи дифференциальной реализации динамических процессов. Основной результат: если конечные множества динамических процессов $N_i, i=1, \dots, n$ обладают свойством РЛД-совместимости первой ступени, то семейство динамических процессов



**Отчет Института динамики систем и теории управления
имени В.М. Матросова СО РАН за 2017 г.**

$\bigcup_{i=1, \dots, n} N_i$ имеет дифференциальную реализацию, коль скоро оператор Релея–Ритца полуаддитивен с некоторым весом $p \geq 1$ на замкнутом линейном многообразии

$$\text{Span } N_1 + \text{Span } N_2 + \dots + \text{Span } N_n.$$

(автор: д.ф.-м.н. В.А. Русанов).

Предложен помехозащищенный (по технологии интегрального метода наименьших квадратов) прямой алгоритм структурно-параметрической идентификации дифференциальной модели демпфированных колебаний упругого элемента спутника-гиростата в форме уравнений Лагранжа II рода (*авторы: д.ф.-м.н. В.А. Русанов, к.ф.-м.н. А.В. Банщикова, к.т.н. В.А. Воронов, А.А. Ветров*).

На основе метода Рауса-Ляпунова и его обобщений с использованием символьных вычислений на компьютере проведен качественный анализ уравнений движения ряда консервативных систем, в том числе волчка и гиростата Ковалевской в двух постоянных силовых полях, твердого тела в идеальной жидкости, твердого тела с полостями, заполненными жидкостью. Для уравнений движения волчка и гиростата Ковалевской в двух силовых полях найдены стационарные решения и их семейства (перманентные вращения, положения равновесия, маятниковые колебания), для тела в жидкости – семейства винтовых движений и положений равновесия. Выделены стационарные инвариантные многообразия, которым вышеуказанные решения принадлежат. Для найденных решений и инвариантных многообразий получены достаточные условия устойчивости или доказана неустойчивость (*авторы: д.ф.-м.н. В.Д. Иртегов, к.т.н. Т.Н. Титоренко*).

Применение знакоопределенных связок двух квадратичных форм и неоднородных многочленов многих переменных позволило доказать совпадение достаточных условий устойчивости перманентного вращения твердого тела вокруг главной вертикальной оси с необходимыми в случае существования интеграла Эйлера (*автор: д.ф.-м.н. М.А. Новиков*).

Исследована возможность одновременной положительной определенности двух связок, каждая состоящая из трех квадратичных форм от трех переменных. Коэффициенты линейных комбинаций обеих связок одинаковы. Показано сведение этой задачи к матричному равенству. Составлены достаточные условия существования решений этой задачи и приведены достаточные условия невозможности решений этой задачи (*автор: д.ф.-м.н. М.А. Новиков*).

Для орбитального гиростата с упругим стержнем, как системы с распределенными параметрами, исследован вопрос существования одноосных равновесных ориентаций на притягивающий центр при наличии симметрий в системе. Для важной модели реальных объектов – осесимметричного орбитального гиростата, в корпусе которого заземлен одним концом однородный прямолинейный в недеформированном состоянии упругий стержень с точечной массой на его свободном конце, в ограниченной постановке и при дискретизации задачи (и при некоторых других предположениях) найдены все одноосные равновесные ориентации корпуса гиростата на притягивающий центр, которые реализуются лишь при соответствующих значениях гиростатического момента системы, зависящего также и от найденных деформации стержня в таких равновесиях (*автор: к.ф.-м.н. С.В. Чайкин*).



IV. ИНФОРМАТИКА И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Приоритетное направление IV.38. Проблемы создания глобальных и интегрированных информационно-телекоммуникационных систем и сетей. Развитие технологий и стандартов GRID

Программа IV.38.1. Методы и технологии создания и интеграции гетерогенных распределенных информационно-вычислительных ресурсов для поддержки междисциплинарных научных исследований на основе сервис-ориентированной парадигмы

Координатор программы: ак. И.В. Бычков

Тема IV.38.1.1. Технологии разработки проблемно-ориентированных самоорганизующихся мультиагентных систем группового управления: методы, инструментальные средства, приложения

№ гос. регистрации: АААА-А17-117032210078-4

Научный руководитель – ак. И.В. Бычков

Разработаны булевы модели, алгоритмы и программные средства синтеза законов управления для линейных двоично-динамических систем (ДДС) и нелинейных ДДС с аддитивным вхождением управляющих воздействий. Предложены два способа управления выполнением разработанных программных средств на основе сервис-ориентированного подхода и мультиагентного управления: организация управления композитным приложением с помощью сервисов логики выполнения; организация взаимодействия вычислительных сервисов с помощью самоорганизующейся мультиагентной системы (МАС) на основе децентрализованного управления на распределенной модели предметной области (рис. 9) (авторы: ак. И.В. Бычков, д.т.н. Г.А. Опарин, к.т.н. В.Г. Богданова, к.т.н. С.А. Горский, А.А. Пащинин).

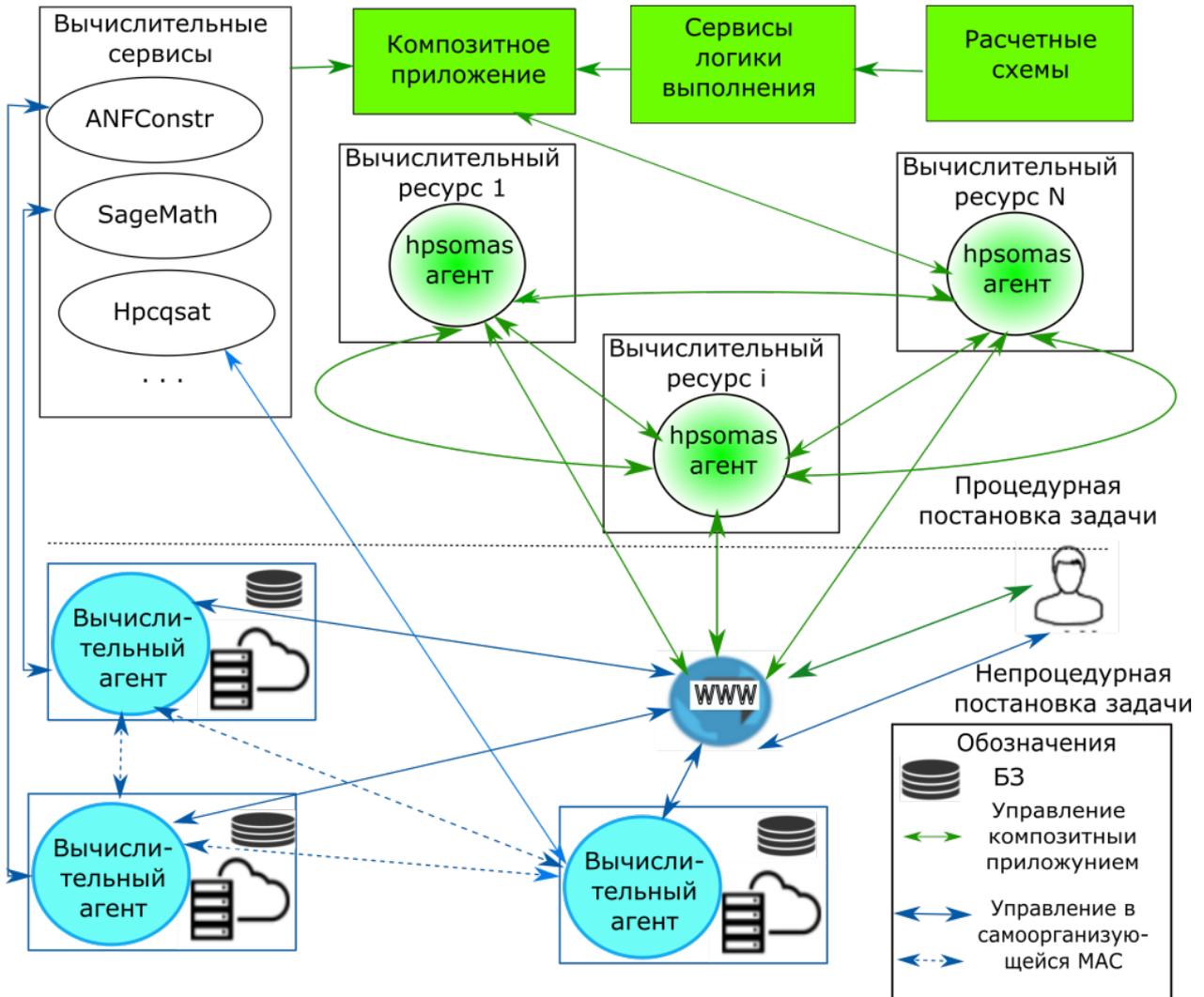


Рис. 9. Организация управления вычислительными сервисами

Разработан масштабируемый параллельный решатель hpcsat, предназначенный для параллельного решения SAT-задач в распределенной вычислительной среде (РВС) с использованием сервис-ориентированных технологий и мультиагентного управления. Реализованный в hpcsat подход, основанный на динамическом распределении по узлам РВС заданий, возникающих при расщеплении исходной булевой функции, позволяет существенно сократить время решения задачи. Решатель hpcsat значительно превосходит на тестовых примерах популярный параллельный SAT-решатель HordeSat (рис. 10) (авторы: ак. И.В. Бычков, д.т.н. Г.А. Опарин, к.т.н. В.Г. Богданова, к.т.н. А.Г. Феокистов, к.т.н. И.А. Сидоров, к.т.н. С.А. Горский, А.А. Пащинин).

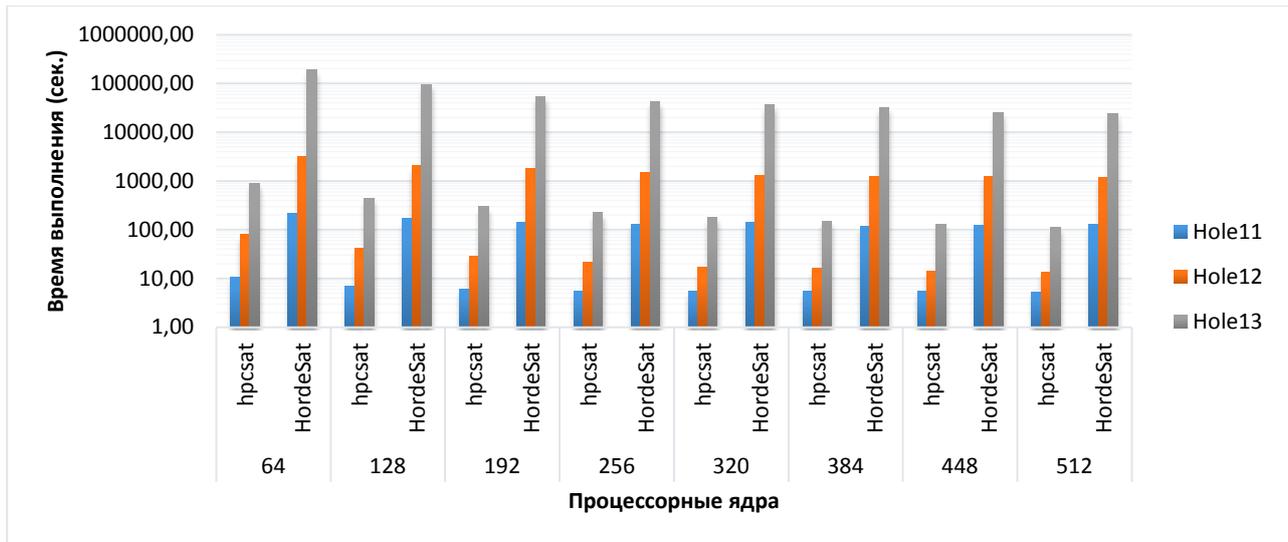


Рис. 10. Время решения задачи о голубях и клетках с использованием решателей hpcsat и HordeSat

Построены новые модели извлечения знаний агентами в процессе их самоорганизации для управления распределенными вычислениями в гетерогенной среде (авторы: к.т.н. А.Г. Феоктистов, Р.О. Костромин).

Разработаны булевы модели, алгоритмы и программные средства синтеза законов управления для линейных ДДС и нелинейных ДДС с аддитивным входением управляющих воздействий; предложены два способа управления выполнением разработанных программных средств на основе сервис-ориентированного подхода и мультиагентного управления (автор: д.т.н. Г.А. Опарин, к.т.н. В.Г. Богданова, к.т.н. С.А. Горский, А.А. Пашинин).

Рассмотрена модификация исчисления позитивно-образованных формул (ПОФ), обеспечивающая учет требований конструктивного планирования. Применение логического исчисления ПОФ (с дескриптивной семантикой) и его модификация в задачах с конструктивной семантикой (планирование действий, синтез программ, автоматическое управление и т.п.) были рассмотрены ранее для языка без функциональных символов. На текущем этапе НИР рассмотрен язык с функциональными символами, но с ограничением на класс формул: в древовидной структуре ПОФ запрещается ветвление после узлов с кванторами всеобщности, содержащих неограниченные переменные в конъюнктах. Данное ограничение существенно увеличивает эффективность процедуры поиска вывода, при этом класс формул является все еще более широким, чем класс в языке хорновских дизъюнктов. В описанном классе формул и исчислении, обозначенном JF, введены три новые правила вывода, используемые для обработки формул, представляющих задачи, т.е. формул вида $G1 \rightarrow G2$, где $G1$ – произвольная ПОФ класса JF, описывающая условия и конструктивные средства решения задачи, а $G2$ – некоторая формализация цели. Доказана теорема, обосновывающая корректность и полноту конструктивного исчисления ПОФ (автор: А.В. Давыдов).

Разработана программная система – транслятор языка первопорядковых логических формул в формате TRTP в язык позитивно-образованных формул TRTP2PCF. Программа позволяет осуществлять синтаксический анализ и трансляцию формул языка классической



первопорядковой логики, записанных в формате TRTP, в логический язык позитивно-образованных формул. Входными данными для программы является файл из библиотеки TRTP, который обрабатывается транслятором с помощью методов, разработанных авторами. Результатом работы является позитивно-образованная формула в оперативной памяти ЭВМ, являющаяся преобразованным соответствием исходной формулы, поступившей на вход, и пригодная для дальнейшей обработки. Получено свидетельство о государственной регистрации программы (авторы: А.В. Давыдов, А.А. Ларионов).

Для задачи планирования групповой траектории для разнородных мобильных роботов при выполнении многоцелевой миссии была разработана новая математическая модель, которая базируется на постановках класса задач маршрутизации транспорта (ЗМТ). Предложенная постановка задачи групповой маршрутизации была выделена в качестве нового актуального подкласса задач маршрутизации транспорта. В некотором роде она является естественным расширением и развитием активно исследуемой в последнее время задачи циклической маршрутизации за счет более точного моделирования реальных условий и ограничений. Так, в первую очередь было снято условие цикличности траекторий отдельных роботов, которое значительно упрощало задачу, исключая из множества допустимых решений наиболее сложные и эффективные групповые траектории. Во-вторых, в модель была добавлена гетерогенность действующей робототехнической группировки как по динамическим характеристикам движения, так и по функциональным возможностям. Кроме того, в модели учитывается необходимость регулярного коммуникационного обмена между роботами группы.

Эволюционный алгоритм, разработанный для решения задачи маршрутизации в предложенной постановке, обладает оригинальной структурой за счет добавления в него дополнительных оригинальных вычислительных этапов, направленных на генерацию уже допустимых решений и приведение недопустимых решений в допустимую область поиска. Внедренные вычислительные этапы преимущественно базируются на известных алгоритмических процедурах, применяющихся при решении различных вариаций задач маршрутизации, но в то же время модифицированы таким образом, что отвечать новым комплексным пространственно-временным, параметрическим и динамическим ограничениям. Разработанный эволюционный алгоритм позволяет уже на первых итерациях получать рациональные допустимые решения, а также обеспечивает их дальнейшую быструю сходимость (авторы: М.Ю. Кензин, ак. И.В. Бычков, к.т.н. Н.Н. Максимкин).

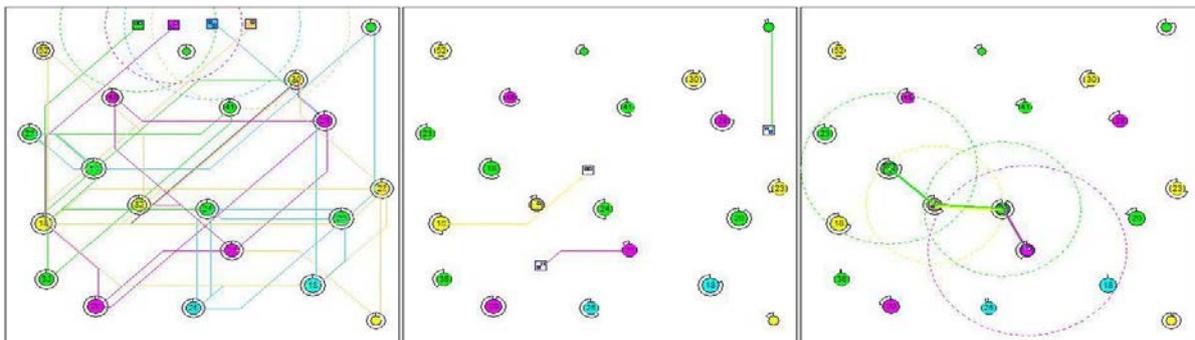


Рис. 11. Моделирование движения четырех роботов по сгенерированному групповому маршруту с финальным проведением коммуникационного обмена



Для реализации принципов самоорганизации в группировках автономных роботов исследованы известные подходы к супервизорному управлению многокомпонентными системами, представленными дискретно-событийными моделями. Проведен анализ алгоритмов построения монолитного, модульного, локально-модульного супервизора и применения модельных абстракций для уменьшения вычислительной сложности алгоритмов построения супервизоров. Для задачи управления группой мобильных роботов проведена оценка сложности построения дискретно-событийного регулятора верхнего уровня в составе гибридной системы управления. Изучены поведенческие эквивалентности, используемые для уменьшения размерности участвующих в построении супервизора компонент рассматриваемой системы: языковые проекции, сохраняющие свойство наблюдаемости, бисимуляция, маркирующая бисимуляция. Поскольку размерность получаемого решения в существенной степени зависит от применения эвристик, для выбора параметров некоторых из них предложено использовать подход, основанный на исчислении ПОФ. Получены первые результаты по формализации дискретно-событийных систем в виде ПОФ. Для редукции супервизоров при гарантированном сохранении их свойств использован метод логико-алгебраических уравнений.

Новизна проведенных исследований в рамках теории супервизорного управления заключается в использовании оригинальных логико-алгебраических методов к исследованию свойств ДСС. Предлагаемое подключение средств логического вывода для построения супервизоров ДСС существенным образом увеличит эффективность процедуры построения распределенных супервизоров, что особенно важно для многокомпонентных систем со многими ограничениями на функционирование, которые представляют собой, в частности, группировки АПР (*автор к.ф.-м.н. Н.В. Нагул*).

Разработан алгоритм управления автономным подводным роботом (АПР), обеспечивающий движение по заданной траектории, задаваемой в виде последовательности путевых точек либо ее аппроксимации кубическими сплайнами, при наличии навигационных ошибок, неопределенности инерционных параметров роботов и ограничений на ресурсы управления. Он основан на концепции виртуальной цели, которая предполагает, что цель как материальная точка движется вдоль заданной кривой, а задача управления АПР состоит в совмещении собственного положения с положением цели. При этом помимо управлений, реализующих поступательное и угловое движение АПР, для решения задачи отслеживания также вводится дополнительное управление, регулирующее скорость движения виртуальной цели, что обеспечивает быстрое уменьшение возможных больших отклонений аппарата от цели. Стабилизирующее управление роботом формируется на основе измерений положения робота в подвижной связанной с целью системе координат, одна ось которой совпадает с касательной к кривой в точке положения цели, а вторая ось перпендикулярна первой. Синтез регуляторов по критерию минимума ошибки слежения выполнен для модели движения АПР на плоскости с учетом возможных неуправляемых боковых смещений робота (скольжения), сил и моментов сопротивления движению, присоединенных масс аппарата. При синтезе учитывались: погрешности измерений относительного положения АПР, их дискретность во времени, ограничения на управляющие силу и момент, создаваемые движительной установкой, а также ограничения на кривизну кривой. Проведены численные расчеты, подтвердившие высокое качество синтезированного управления. Разработанный алгоритм



**Отчет Института динамики систем и теории управления
имени В.М. Матросова СО РАН за 2017 г.**

отслеживания траектории использован при разработке двухуровневой системы управления группой АПР в миссии по сканированию придонной области, а также при решении задачи отслеживания траектории для группы роботов (*авторы: к.т.н. С.А. Ульянов, к.т.н. Н.Н. Максимкин*).

Проведено развитие теории устойчивости движения сложных многокомпонентных (мультиагентных) систем с переключениями в процессе функционирования. Разработан новый способ агрегирования и построения вектор-функций Ляпунова и обобщенно однородных систем сравнения Матросова, приводящих к более конструктивным условиям асимптотической устойчивости, проверяемым по правым частям, и обобщающих и усиливающих известные способы (Бейли, Шильяк, Фурасов).

Исследована нелинейная система реакции-диффузии, моделируемая системой уравнений параболического типа со степенными нелинейностями. Предложена конструкция точных решений, позволяющая декомпозировать процесс отыскания компонент, зависящих от времени и пространственных координат. Построены новые многопараметрические семейства точных решений, задаваемых элементарными функциями. Выделены случаи взрывающихся (blow-up solution) или периодических по времени и анизотропных по пространственным переменным точных решений (*автор: к.ф.-м.н. А.А. Косов*).

Разработана подсистема генерации подводной среды, которая является частью «виртуального полигона» – программного комплекса для имитационного моделирования функциональных возможностей систем и алгоритмов поведения как одиночных, так и группировок автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА). В рамках данной подсистемы был разработан и реализован алгоритм генерации реалистичного рельефа морского дна с использованием шума Перлина, названный «методом масок». Его принципы позволяют формировать слои, заполненные шумом Перлина определенного масштаба, и в дальнейшем модифицировать их с помощью «масок», содержащих коэффициенты влияния на высоту. Наложение слоев друг на друга по некоторым правилам позволяет формировать на одной карте рельеф различного типа (горы, песок и т.д.). Также были разработаны и реализованы алгоритмы и способы построения водной «чаши» для размещения сгенерированного рельефа, текстурирования поверхности рельефа, создания визуального эффекта нахождения АНПА на глубине, размещения различных предметов на поверхности морского дна. Стоит отметить, что подсистема генерации подводной среды на данный момент готова не только к дальнейшему усовершенствованию, но и к внедрению и использованию в качестве функциональной части «виртуального полигона». Результаты ее генерации (рис. 12) можно использовать для моделирования некоторых других целевых подсистем АНПА, например, системы технического зрения на базе гидролокатора бокового обзора (*автор: К.В. Беденко*).



Рис. 12. Результат работы подсистемы генерации подводной среды

Разработка «виртуального полигона» состоит в решении ряда задач по генерации подводной среды, имитационному моделированию функциональных возможностей и систем автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА), а также их групповому поведению и взаимодействию. За 2017 год было реализовано два программных модуля. Тестирование алгоритмов компьютерного зрения позволило разработать собственный подход к решению задачи поиска и идентификации объектов на дне водоемов с помощью гидролокатора бокового обзора (ГБО). Он заключается в определении текстуры подстилающей поверхности, оконтуривании областей с различными текстурами и обнаружении аномалий путем выделения на ГБО-изображении прямых линий и углов исследуемого объекта. Дальнейшее применение и улучшение подхода требует наличия базы модельных и реальных изображений ГБО (*автор: А.А. Толстихин*).

В рамках проекта по созданию «виртуального полигона», основным назначением которого является построение и тестирование имитационных моделей различных функциональных подсистем автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА) и алгоритмов их управления, была разработана модель гидролокатора бокового обзора (ГБО). Модель состоит из двух частей. Первая часть отвечает за сбор «сырых» данных об интенсивности отражения звуковых волн от объектов подводной среды и морского дна, основанный на измерении расстояния от точек поверхности до излучателя, которым оперирует аппарат. Вторая часть преобразует полученные результаты в вид, совместимый с алгоритмами обработки ГБО-изображений и удобный для изучения человеком: на модельном изображении отображаются акустические тени и проступают очертания объектов, что в дальнейшем будет являться основой для реализации алгоритмов поиска аномалий. Разработанная подсистема моделирования ГБО учитывает материал объекта и тип подстилающей поверхности морского дна, которые влияют на силу отклика звукового сигнала, а также воспроизводит «шумы» – аппаратные ошибки гидролокатора, возникающие



в водной среде. Эти особенности обеспечивают более высокое соответствие модельных изображений действительным (рис. 13) (автор: Д.А. Костылев).

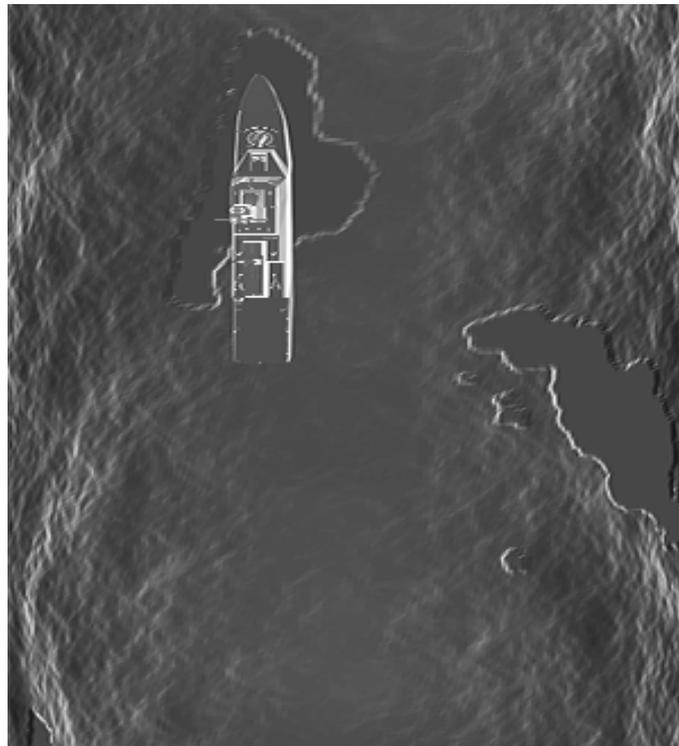


Рис. 13. Результат моделирования работы ГБО

Предложен подход к групповой маршрутизации автономных подводных роботов при траекторном обследовании некоторого физического поля. В основе разработанного алгоритма лежит модифицированный метод роевой оптимизации GWO (стаи серых волков), задающий траектории движения роботов таким образом, чтобы за наименьшее время выявить области физического поля с предельными значениями, позволяя при этом сохранять связь внутри группы на протяжении всей миссии. Для выхода из локальных минимумов используется набор мнимых областей-аттракторов, вес которых динамически уточняется в процессе проведения замеров в их окрестностях. Результаты моделирования миссии по траекторному обследованию представлены на рис. 14 (авторы: А.А. Толстихин, М.Ю. Кензин).

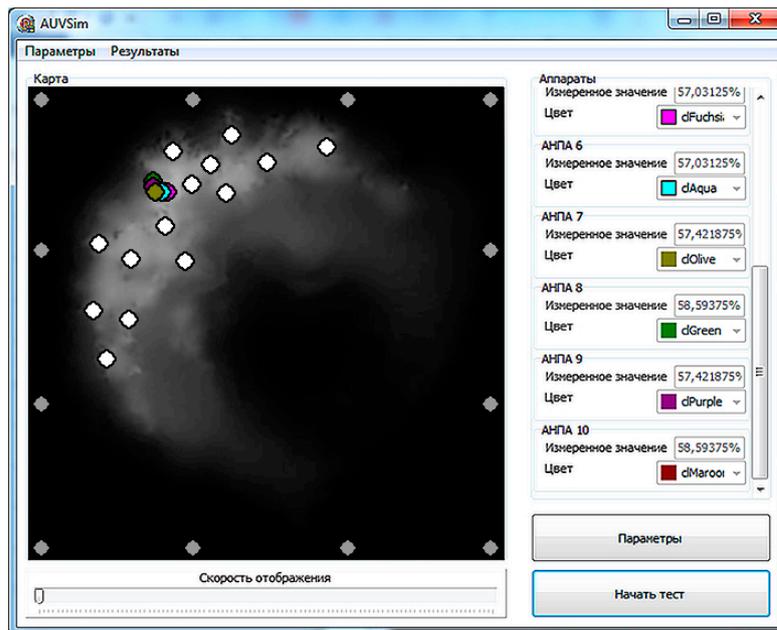


Рис. 14. Результат моделирования миссии по траекторному обследованию
(белые области – предельные значения, серые – мнимые области-аттракторы)



Тема IV.38.1.2. Методы и технологии создания распределенной сервисно-ориентированной среды сбора, хранения, обработки больших объемов разноформатных междисциплинарных научных данных и знаний, основанных на конструктивных средствах спецификации, порождающем программировании и интеллектуализации

№ гос. регистрации: АААА-А17-117032210079-1

Научный руководитель – д.т.н. Г.М. Ружников

Разработаны иерархии классов для абстрагирования технологий доступа к данным (DAT, Data Access Technology, ТДД) в настраиваемых при помощи спецификаций приложений БД АРМов, что обеспечивает возможность создавать приложения, использующие сразу несколько ТДД. Основные фрагменты кода, различающиеся в зависимости от выбранной ТДД, были систематизированы и реализованы в виде виртуальных методов классов – потомков абстрактного базового класса TBaseDAT. Для того, чтобы не приходилось собирать весь код, зависящий от ТДД, в один модуль, предложен способ организации кода с использованием *реестров зависимых классов* и *вариаторов* – классов, позволяющих варьировать код, используемый в определенном модуле, в зависимости от применяемой ТДД. Реестр зависимых классов используется для выбора типа при создании экземпляра вспомогательного класса в зависимости от применяемой ТДД. При этом в модуле, определяющем вспомогательный базовый класс, объявляется реестр его классов-потомков, в котором эти классы-потомки регистрируются при подключении в программу модулей, определяющих такие классы. Реестр зависимых классов используется для выбора типа при создании экземпляра вспомогательного класса в зависимости от применяемой ТДД.

Для поддержки возможности изменения поведения визуальных форм в зависимости от выбора ТДД разработаны специальные классы – *вариаторы поведения*. Вариаторы поведения позволяют избежать необходимость создания классов-потомков для визуальных форм в зависимости от ТДД (что является неудобным). При этом таблица вариаторов создается у модифицируемого объекта и в зависимости от выбранной ТДД используется один из этих вариаторов.

С использованием разработанных иерархий классов была поддержана работа с использованием библиотеки доступа к данным FireDAC (рис. 15). Библиотека FireDAC является основной для разработки мультиплатформенных приложений в последних версиях Delphi, ее использование позволяет в перспективе разработать версии программ для мобильных устройств (*авторы: к.т.н. А.Е. Хмельнов, к.т.н. А.С. Гаченко, к.т.н. Е.С. Фереферов*).

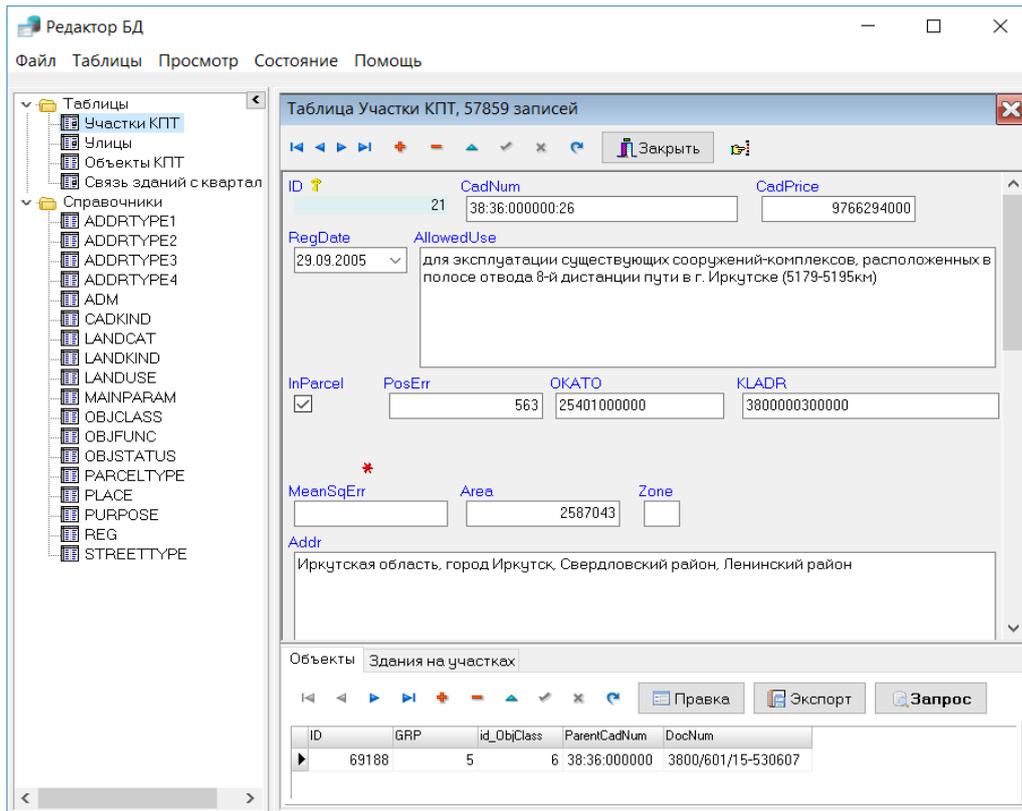


Рис. 15. Приложение БД на основе спецификаций, работающее с использованием ТДД FireDAC

Для отображения дополнительной информации об операндах инструкций и ячейках памяти в программе DCU32INT реализован итерационный алгоритм анализа потоков данных подпрограмм. Для сбора информации об операндах инструкций в потоке данных используется метод достигающих определений. Компилятор Delphi генерирует код таким образом, что все обращения к памяти происходят в пределах адресного пространства данной процедуры, что позволяет производить анализ в рамках процедуры. Анализ потоков данных проводится на графе потока управления для подпрограммы, состоящем из базовых блоков. Базовый блок представляет собой последовательность инструкций с одним входом и одним выходом.

Промежуточный код для базовых блоков строится путем символьной интерпретации каждой команды CIL и сопоставления ей выражения (экземпляра класса), реализующего семантику. Начальное состояние каждого линейного участка кода характеризуется значениями параметров подпрограммы и локальных переменных, а также состоянием стека. Конечное состояние определяется в результате символьной интерпретации.

Далее применяется итерационный алгоритм анализа потоков данных для достигающих определений. Состояние локальных переменных и аргументов подпрограммы является общим контекстом для всех базовых блоков и используется только для хранения результатов, а не вычисления выражений. Поэтому в качестве входного и выходного множества для передаточной функции рассматривается только состояние стека (*автор: А.А. Михайлов*).

Разработан прототип веб-сервиса, посредством которого объединены в единый ресурс оригинальная библиотека по разбору почтовых адресов и отображение найденного адреса на



картографической основе. Модуль по разбору адресов производит поиск в иерархических адресных справочниках (статичных) наилучших вариантов сопоставления для строки почтового адреса, которая может содержать ошибки. При построении дерева альтернативных вариантов разбора почтовых адресов возникает проблема ранжирования результатов и выбора одного или нескольких предпочтительных вариантов сопоставления. Для решения этой задачи разработан алгоритм информированного поиска, позволяющий на каждом этапе иметь дело с наиболее перспективным к текущему моменту вариантом разбора. Алгоритм поиска вариантов сопоставления получает на вход последовательность лексем, являющуюся результатом работы лексического анализатора. В своей работе алгоритм использует машину состояний, предназначенную для хранения и контроля состояний разбора. Основными структурами данных, используемыми при работе алгоритма, являются очередь с приоритетами, предоставляющая на каждом этапе разбора наиболее перспективный вариант перехода между состояниями, и хэш-таблица состояний, позволяющая избежать повторной обработки состояний разбора. Каждое состояние разбора идентифицируется парой (узел справочника адресов, позиция в списке лексем) и содержит информацию о наилучшем известном к текущему моменту способе сопоставления названий из данного узла и его предков с соответствующим позиции начальным фрагментом списка лексем. Таким образом, в предложенном алгоритме реализуется схема динамического программирования. Для сравнения найденных вариантов разбора предложена система оценок, которая позволяет учитывать расстояние между сопоставляемыми словами, перестановки слов в словосочетании и наличие элементов адреса в строке.

Разработанная технология может быть использована в задачах геокодирования информации базы данных, нормализации почтовых адресов, в обработке массивов данных, содержащих адресную информацию, а также в информационных поисковых системах для поиска корректных почтовых адресов и отображения их на топооснове (*авторы: к.т.н. А.С. Гаченко, к.т.н. А.Е. Хмельнов*).

Разработана методика приобретения (acquisition) структурного описания документа на основе анализа его изменений. Исследован подход к автоматизации разметки документов по аналогии с уже размеченным примером на основе компьютерного обучения. Процесс состоит из трех шагов: 1) разметка одного документа метаданными в виде набора атрибутов абзацев; 2) машинное обучение, ориентированное на сопоставление значений атрибутов роли абзаца в документе; 3) классификация абзацев в аналогичных документах при помощи обученного алгоритма. На данной задаче протестированы стандартные для библиотеки `scipy` (Python) алгоритмы компьютерного обучения: построение дерева решений, сеть Байеса и нейронная сеть. При помощи дерева решений выделен набор наиболее информативных атрибутов, на основе которых выполняется распознавание классов абзацев в тексте документа: отсутствие или присутствие в абзаце глагола, наличие выраженного абзацного отступа, наличие отступа красной строки, наличие номера раздела, наличие слова-разделителя структуры документа, наличие заголовочного абзаца перед текущим и т.п.

В результате применения методики новые документы получают дополнительную общую структурную и семантическую разметку. На примере рабочих программ вуза удалось выделить с достоверностью 0,7 основные разделы рабочей программы, разделы формального описания курса, разобрать структуру титульного листа.



**Отчет Института динамики систем и теории управления
имени В.М. Матросова СО РАН за 2017 г.**

Для поддержки решения данной задачи произведен анализ существующих стандартизованных онтологий (концептуальных моделей) и реализован сервис хранения документов и их размеченной логической структуры.

Логическая структура документа представляется с использованием дескриптивных возможностей технологий Семантического веба (Semantic Web), применяемых в формате HTML5, а также технологии открытых связанных данных (Linked Open Data, LOD). Логическая структура документа представляется при помощи онтологий Open Annotation (oa) – представление содержимого (аннотации), описывающего другое содержимое; Friend-of-a-friend (foaf), которая позволяет представлять информацию об агентах: физических, юридических лицах и программных агентах; Provenance (prov) – основа описания информационных потоков в документах и их взаимосвязи; Dublin Core (dc) представляет в аннотации ментаинформацию о творческом произведении: авторов, формат содержимого, его описание и др.; DBpedia resource (dbr) – пространство имен конкретных объектов (ресурсов-экземпляров) Wikipedia; Schema.org (schema) представляет объекты, распознаваемые поисковыми агентами Google, Yandex, Yahoo и др.; Bibliographic Ontology (bibo) – представление списков литературы; онтологии из проекта NEPOMUK (<https://userbase.kde.org/Nepomuk>), предназначенные для описания объектов, хранимых в полнотекстовых индексных цифровых архивах. Пример описания части документа при помощи выбранных онтологий изображен на рис. 16.



```
<!DOCTYPE html PUBLIC "-//W3C//DTD XHTML 1.0 Transitional//EN"
"http://www.w3.org/TR/xhtml1/DTD/xhtml1-transitional.dtd">
<html lang="ru" xmlns=http://www.w3.org/1999/xhtml
xmlns:taa=http://irnok.net/engine/rdfa-manipulation
xml:lang="ru" metal:define-macro="page">
<head> <!-- Подключение стилевых таблиц и модулей -->
</head>
<body prefix="rdf: http://www.w3.org/1999/02/22-rdf-syntax-ns# ... foaf:
http://xmlns.com/foaf/0.1/ imei: imei.html#
course: https://irnok.net/college/plan/01.03.02-16-1234-2461\_1%D0%BA\_PB-SM.plm.xml.xlsx-
%D0%911.%D0%92.%D0%94%D0%92.3.1.html#"
resource="#post" typeof="schema:CreativeWork sioc:Post prov:Entity">
<!-- Панель управления приложением -->
<main lang="ru" resource="#annotation" typeof="oa:Annotation"
id="main-document-container"><div property="oa:hasTarget"
resource="#course-work-program"></div>
<article property="oa:hasBody"
typeof="schema:Article foaf:Document curr:WorkingProgram"
resource="#course-work-program" id="main-document">
<div taa:content="imei:title-page"></div> <!--Титульный лист.. -->
<div taa:content="imei:neg-UMK"></div> <!--Лист согласования..-->
<section id="contents" class="break-after"> <h2 class="nocount c">Содержание</h2>
<div id="tableOfContents"></div>
</section>
<section id="course-description" resource="#description"
property="schema:hasPart" typeof="schema:CreativeWork">
<div property="schema:hasPart" resource="#purpose"
typeof="dc:Text cnt:ContentAsText" >
<div property="cnt:chars" datatype="xsd:string">
<h2 property="dc:title" datatype="xsd:string">Цели и задачи дисциплины
(модуля)</h2>
<p>Целью преподавания дисциплины "Технологии программирования" является
освоение ...</p>
</div>
</div>
. . . . .
<div property="schema:hasPart" typeof="dc:Text
cnt:ContentAsText" resource="#volume">
<div property="cnt:chars" datatype="xsd:string">
<h2 property="dc:title" datatype="xsd:string"> Объем дисциплины (модуля) и виды
учебной работы (разделяется по формам обучения)</h2>
<div taa:content="course:time-distrib"></div>
</div>
</div>
```

Рис. 16. Пример логического представления документа (рабочей программы вуза)

Разработаны программные средства (сервер) хранения документов на основе открытых связанных данных. Архитектура созданного сервера изображена на рис. 17.

Основные функции сервера заключаются в предоставлении доступа к данным по адресу ресурса и различным типам контекста: по содержимому документа (полнотекстовый индекс), по запросу SPARQL, а также Datalog-запросу (при помощи механизма Penguins). В реализации функций использованы современные технологии: Elasticsearch – полнотекстовый поиск по содержимому документов и данным, хранимым в графах онтологий; интерпретатор SWI-Prolog – реализация Datalog-запросов; экспериментальный сервер онтологий ClioPatria – система хранения графов онтологий и интерпретации основных RDF- и RDFs-отношений. Все основные функциональные блоки представлены в виде компонент Zope, что дает возможность их использования как по отдельности, так и в рамках одного конфигурируемого декларативного приложения. Средствами системы программирования Prolog реализована подсистема обработки данных логического слоя на основе формализованных знаний. Знания хранятся как на сервере, так и могут быть подгружены с клиентского веб-браузера. В



качестве приложения разрабатываемых технологий реализовано новое программное средство для автоматизации верстки (authoring) документов.



Рис.17. Архитектура сервера хранения документов и их логической разметки

Важным преимуществом использования LOD при создании информационных сред является ослабление требований к хранилищам публикуемой информации: сам документ является хранилищем данных в формализованном виде. В некоторой степени это позволяет время, затрачиваемое на проектирование структуры базы данных для хранилищ частично структурированных документов, перенаправить на процесс решения предметной задачи (автор: к.т.н. Е.А. Черкашин).

Проведено исследование стандартов спецификаций сервисов и данных в областях геообработки и формирования инфраструктуры пространственных данных. Установлено, что большинство существующих программных систем анализа данных, как правило, требуют представления данных в реляционном (табличном) виде с определенным набором полей, типами полей, форматами данных, используемыми справочниками, единицами измерения и т.д. Соответственно при применении некоторой программной системы анализа от исследователя требуется унификация реляционных данных под требования, что может быть нетривиальным. Например, методы создания цифровой модели рельефа требуют наличия атрибута, содержащего положение объекта (точка или полилиния) и атрибута со значением высоты в метрах. Данные исследователя могут быть в других единицах измерения, что потребует от него поиска и применения специализированных средств или ручной переработки. Решением проблемы унификации данных и методов является публикация спецификаций, описывающих требуемую структуру реляционных данных. Предложено с помощью спецификаций фиксировать структуру реляционных таблиц, требуемых для определенного сервиса анализа или обработки данных, что обеспечит, используя спецификации, возможность реализации ввода данных для сервисов и создание самих таблиц. Метаданные о структурах таблиц предлагается упорядочить в виде иерархий и реализовать механизмы наследования и полиморфизма в терминах объектно-ориентированного подхода. Такой подход позволяет обеспечить интеграцию отличающихся по составу данных для совместного анализа. Хранение спецификаций о структуре таблиц дает возможность сбора данных, ориентированных на использование в конкретных сервисах



Отчет Института динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН за 2017 г.

анализа, а также создавать сервисы обработки, ориентированные на данные, соответствующие опубликованным метаданным.

В рамках геопортала разработан каталог спецификаций для хранения спецификаций о структуре таблиц и их предоставления по запросу. Спецификации хранятся в формате JSON. В рамках каталога спецификаций разработаны сервисы предоставления и обмена спецификаций, который предоставляет программный REST интерфейс:

- 1) /dataset/list – получение списка структур таблиц;
- 2) /dataset/list?f_id=<Идентификатор спецификаций> – получение спецификаций определенной таблицы.

Представленный интерфейс позволяет автоматически обмениваться спецификациями между геопорталами. Добавление новых спецификаций в каталог производится с помощью специального инструмента создания таблиц (рис. 18). Данный инструмент позволяет определить структуру таблиц и ее название, определить типы полей и элементы управления. Кроме того, в рамках этого инструмента можно выбрать спецификации из каталога и создать на их основе таблицу.

Рис. 18. Инструмент описания спецификаций для создания таблиц

Разработаны спецификации наиболее часто используемых данных в области геообработки: административные границы; объекты транспортной сети; населенные пункты; здания и сооружения; гидрография; историко-культурные достопримечательности; образцы видов растительности (гербарии). На основе созданных спецификаций создан ряд таблиц, которые в свою очередь зарегистрированы в каталоге.

В проекте проведено развитие формирования инфраструктуры пространственных данных в облачной среде (рис. 19). Технология базируется на оригинальном типовом геопортале, реализующем общие для систем функции. Некоторые из функций вынесены на отдельные узлы облачной среды. Пользователь работает с помощью браузера.

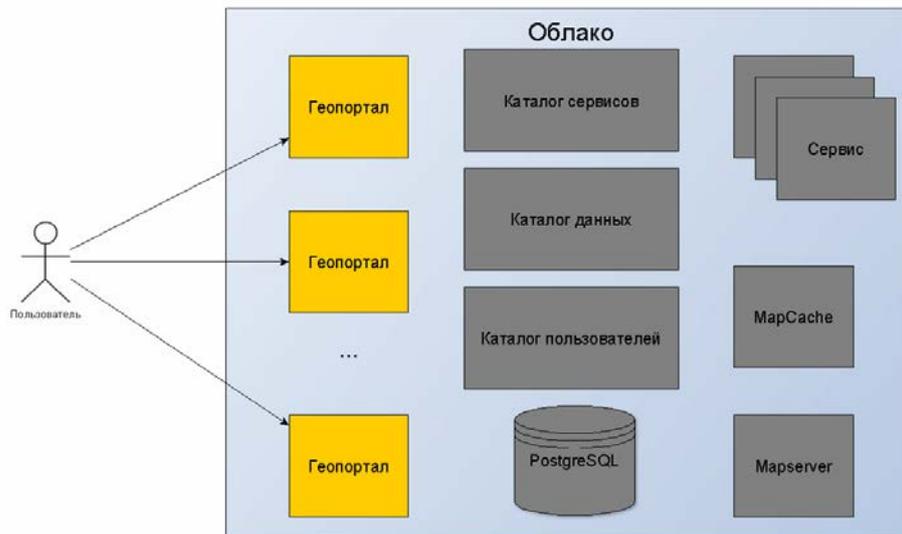


Рис. 19. Архитектура облачной среды

Типовой геопортал разработан на основе программной платформы Node.js и СМС Calipso и состоит из следующих компонентов:

- «Каталог данных» предназначен для хранения спецификаций таблиц и их структурных спецификаций. Каталог обеспечивает поиск данных по всем геопорталам;
- «Сервисы» – вычислительные узлы виртуальной среды, выполняющие методы обработки данных. Методы должны быть реализованы в соответствии со стандартом WPS;
- «Каталог сервисов» предназначен для хранения метаданных сервисов. Каталог обеспечивает поиск сервисов и их выполнение;
- «Mapserver» проводит на стороне сервера генерацию изображений слоев карт в соответствии со стандартом WMS. Выделен на отдельный вычислительный узел из-за необходимости использования 80 портов. Многие организации блокируют доступ к остальным портам;
- «MapCache» проводит кэширование карт для получения скоростного доступа;
- «PostgreSQL» – СУБД. Для обработки пространственных данных в СУБД установлено расширение PostGIS. Каждому пользователю системы предоставляется схема базы данных, в которой он может создавать таблицы. СУБД может функционировать на каждой виртуальной машине геопорталов или на общей СУБД.

Все компоненты архитектуры функционируют в рамках облачной среды. Разработанная технология базируется на рассмотренной архитектуре и состоит из следующих этапов:

- 1) развертывание нового узла облачной среды на основе типового геопортала и присвоение DNS имени, что позволяет получить общедоступный сайт в сети Интернет;
- 2) разработка таблиц для хранения данных пользователей на основе структурных спецификаций;
- 3) модификация пользовательского интерфейса.

Виртуальные машины создаются на основе шаблонов (в терминологии VMware это «template», в Openstack это «image»), где заранее установлен и сконфигурирован типовой геопортал. Типовой геопортал содержит программную систему ввода и редактирования данных, которая обеспечивает многопользовательскую работу через Интернет, ввод и



**Отчет Института динамики систем и теории управления
имени В.М. Матросова СО РАН за 2017 г.**

редактирование данных разных по структуре реляционных таблиц и т.д. (авторы: к.т.н. Р.К. Федоров, А.С. Шумилов, А.Ю. Авраменко, А.А. Ветров, к.т.н. А.К. Попова).

Проведен анализ применения методов фонетического сопоставления текстовых данных, выраженных кириллическими и латинскими символами, представленных на естественных языках. В результате анализа выявлено, что данные алгоритмы, как правило, ориентированы на использование фонетических правил английского языка. Существуют и другие адаптации фонетических алгоритмов для языков, отличных от английского, либо использующих кириллические символы. Как правило, в этом случае используется транслитерация, а в качестве алгоритма используются вариации алгоритма Soundex. Однако транслитерация в большинстве случаев не позволяет учесть особенности фонетики искомого языка. К тому же нет единых правил проведения транслитерации. По результатам исследований продолжен и апробирован алгоритм Polyphon. Данный алгоритм проводит кодирование без использования транслитерации и с учетом фонетических особенностей русского языка, что обеспечивает высокий уровень поиска соответствий на основе фонетического сходства. Результаты тестирования алгоритма представлены в таблице 1. В качестве практической области применения разработанного алгоритма предлагается проведение операций сопоставления пользовательского текста информации, содержащейся в различных классификаторах (авторы: к.т.н. В.В. Парамонов, к.т.н. А.О. Шигаров).

Таблица 1. Результаты тестирования алгоритма

Алгоритм	Совпадение фонетических кодов (in %)	Время работы (в миллисекундах)
<i>Polyphon</i>	95.12	2003
<i>Polyphon</i> (используется нечеткое сопоставление кодов)	98.8	1623
Soundex	90.24	1096
Metaphone	90.29	870
Double Metaphone	96.15	1451
Caverphone	90.41	9770
NYSIIS	75.97	1517
DaitchMokotoffSoundex	96.84%	1763

В качестве развития методов очистки данных предложено использовать синтез, основанный на применении методов нечеткого сравнения строк и методов фонетического сходства, в том числе посредством разработанного алгоритма Polyphon. Методы очистки данных, представленных на естественном языке, также использованы для идентификации вычисляемых значений, содержащихся в слабоструктурированных табличных документах. В частности, предложенные методы использовались для корректной идентификации слов, описывающих табличные данные. Проведена адаптация фонетического алгоритма для обработки слов на русском языке. При этом в отличие от большинства используемых фонетических алгоритмов не строится транслитерация, что позволяет учитывать особенности произношения русских слов. Так, фонетическое сопоставление слов может быть использовано для эффективного сопоставления пользовательского текста информации, содержащейся в различных классификаторах. В совокупности с применением методов



нечеткого сравнения строк данный подход может использоваться в алгоритмах очистки данных и представляет интерес для создания интегрированной информационно-аналитической среды, создаваемой «добровольцами» по принципу краудсорсинга (авторы: к.т.н. В.В. Парамонов, к.т.н. А.О. Шигаров).

Проведена адаптация разработанного алгоритма Polyphon для кодирования слов монгольского языка. Для этого использованы фонетические правила монгольского языка, по которым проводится кодирование слов. Также предложены методы нечеткого фонетического сравнения текстовых выражений как на русском, так и на монгольском языках (авторы: к.т.н. В.В. Парамонов, к.т.н. А.О. Шигаров).

Разработана свободная система извлечения и трансформации данных из произвольных электронных таблиц – TabbyXL. Система охватывает задачи автоматического восстановления семантической разметки таблиц, очистки и отслеживания происхождения табличных данных, генерации реляционных данных. Рассматриваемые процессы трансформации табличных данных служат для восстановления недостающих метаданных (семантики) о структуре и содержании произвольной таблицы, позволяя переходить к более структурированному представлению. В отличие от перечисленных решений система ТАВВУXL использует объектную модель таблицы, не ограничивающую структуру обрабатываемых таблиц функциональными регионами. Ограничения, которые в существующих решениях встроены в их алгоритмы, предлагается представлять в виде наборов правил анализа и интерпретации таблиц. При этом трансформация данных обеспечивается исполнением этих правил (авторы: к.т.н. А.О. Шигаров, к.т.н. В.В. Парамонов, к.т.н. А.А. Михайлов, В.В. Христюк).

Разработаны модели информационных процессов создания и функционирования интеллектуальных систем поддержки принятия решений, основанные на реализации модельных трансформаций для систем различного типа. Трансформация моделей является одной из основных составляющих модельно-управляемого подхода к разработке программного обеспечения (Model-Driven Engineering, MDE). В рамках данного подхода процесс разработки программного обеспечения представляет собой последовательное преобразование моделей с разным уровнем детализации, где на завершающем этапе генерируется исходный код программы или ее спецификации.

Использование модельных трансформаций и принципов модельно-управляемого подхода позволяет максимально вовлечь непрограммирующих специалистов в процесс создания программного обеспечения с минимизацией ошибок программирования за счет использования когнитивной графики и элементов визуального программирования, а также автоматической генерации кодов и спецификаций.

С целью создания продукционных баз знаний с использованием модельных трансформаций разработана модель информационного процесса, особенностью которой является комплексное использование XML подобных форматов для представления концептуальных моделей; онтологии в качестве универсального промежуточного хранения знаний; авторской нотации RVML (Rule Visual Modeling Language) для описания продукций. Предлагаемая модель позволяет учесть в цепочке модельных трансформаций специфику процесса разработки интеллектуальных систем, такую как наличие этапов концептуализации и формализации.



Формально разработанная модель представлена следующим образом: $T : CM \rightarrow KB$ где T – оператор преобразования, CM – исходная концептуальная модель; KB – целевая база знаний.

При этом множество информационных моделей ограничено XML-подобными форматами, в частности, для представления: UML моделей – XMI (XML Metadata Interchange), концепт-карт – CXL (Concept Mapping Extensible Language), деревьев событий – ETXL (Event Tree Mapping Extensible Language), таким образом, $CM = \langle CM^{XMI}, CM^{CXL}, CM^{EXTL} \rangle$. В качестве целевого языка программирования баз знаний выбран CLIPS (C Language Integrated Production System), тогда $KB = \langle Code^{CLIPS} \rangle$.

Согласно MDE процесс создания баз знаний на основе концептуальных моделей может быть представлен последовательностью трансформаций $CM \rightarrow Ont \rightarrow RM \rightarrow KB$ где CM – вычислительно-независимая модель, RM – модель продукций. Таким образом, оператор преобразования концептуальной модели $T = \langle T_{CM-Ont}, T_{Ont-RM}, T_{RM-KB} \rangle$.

В качестве программных средств реализации модели информационного процесса предполагается использовать авторские инструментальные средства Knowledge Base Development System (KBDS) и Personal Knowledge Base Designer (PKBD).

Предлагаемый информационный процесс создания баз знаний на основе концептуальных моделей (рис. 20) состоит из следующих основных этапов:

Этап 1. Формирование концептуальной модели средствами сторонних программ, для этого используют проблемно ориентированные нотации: UML, концепт-карты или карты памяти, деревья событий. Особенностью создаваемых моделей является наличие причинно-следственных отношений, составляющих содержательный смысл создаваемых моделей. Данные отношения будут преобразовываться в логические правила;

Этап 2. Представление концептуальной модели в XML подобных форматах средствами сторонних программ, в частности, XMI (StarUML, IBM Rational Rose), CXL (ИМС StarTools), ETXL (ET-Editor);

Этап 3. Анализ XML-структур файла концептуальной модели с выделением основных понятий и отношений. На основе выделенных понятий производится формирование онтологии. Автоматически сформированная онтология редактируется в специализированном редакторе онтологий с целью ее уточнения;

Этап 4. Формирование модели продукций на основе онтологии. Данная модель является универсальным представлением знаний в виде логических правил, не зависящим от используемого языка программирования баз знаний (например, CLIPS, JESS, Drools, RuleML, SWRL и т.д.). Данная модель может содержать правила с несколькими условиями и разными типами операторов (например, «and», «or», «not»). При помощи специальной графической нотации RVML предоставляется возможность визуализации, модификации (проверки) полученных продукций;

Этап 5. Генерация программного кода баз знаний в формате CLIPS на основе сформированной модели продукций.

Предлагаемая модель информационного процесса создания продукционных баз знаний является одним из элементов модели информационного процесса создания экспертных систем (авторы: к.т.н. А.Ю. Юрин, М.А. Грищенко, Н.О. Дородных)..

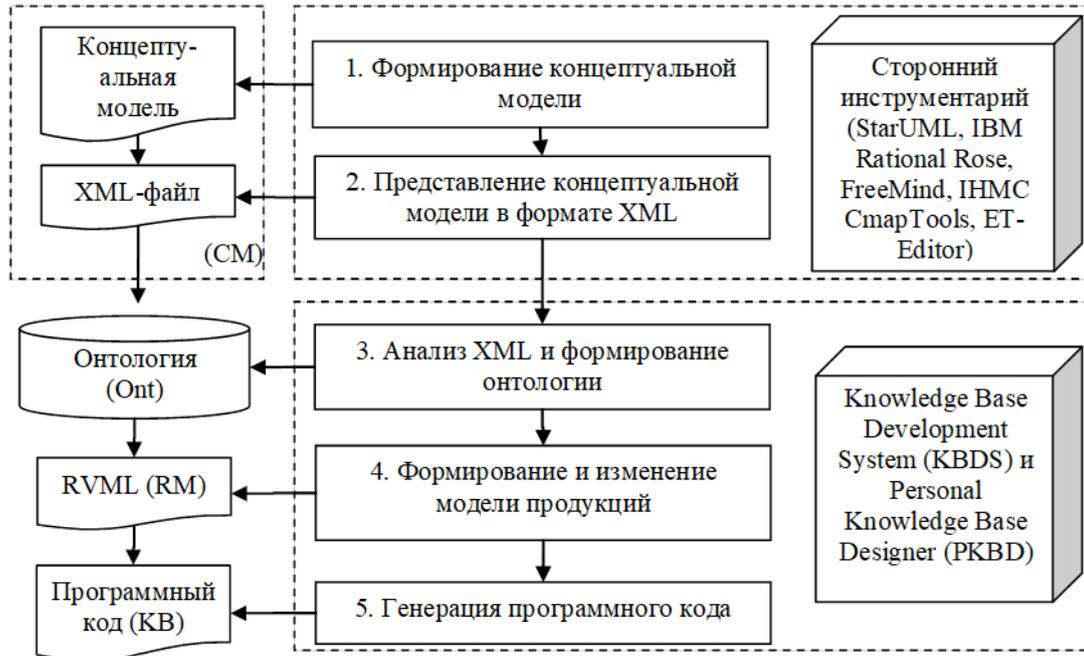


Рис. 20. Модель информационного процесса создания баз знаний на основе концептуальных моделей

Информационный процесс создания и функционирования системы визуализации результатов имитационного моделирования (рис. 21) состоит из следующих основных этапов:

– Определение понятий исследуемой области путем создания онтологии предметной области, т.е. описание тех понятий (а также их атрибутов и связей), которые далее будут участвовать в визуализации;

– Создание трехмерных объектов, визуализирующих объекты предметной области, с использованием редактора визуальных объектов, включающего библиотеку стандарта WebGL и библиотеку dat.gui. Визуальное представление

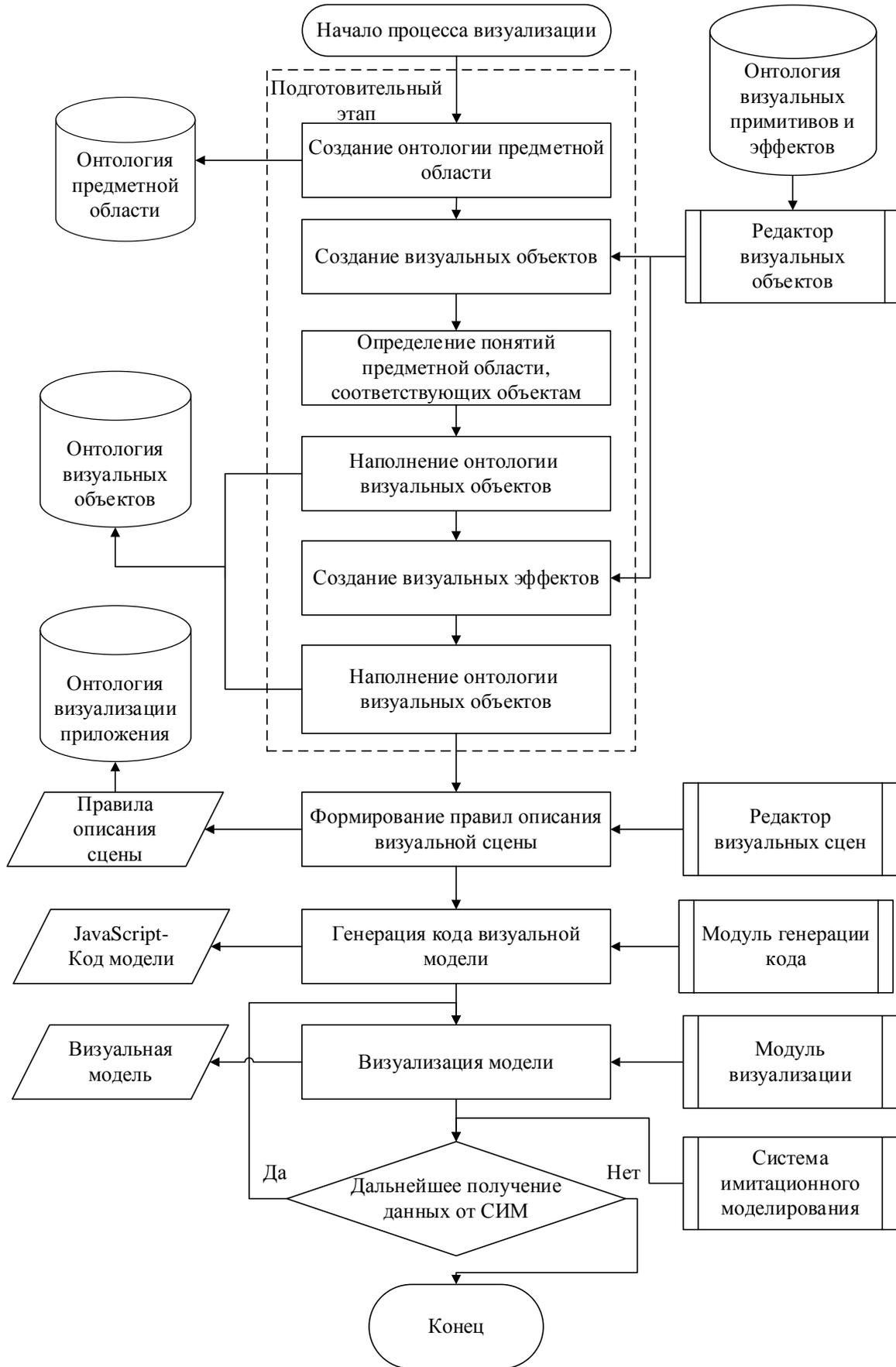


Рис. 21. Модель информационного процесса создания и функционирования системы визуализации результатов имитационного моделирования



большинства реальных объектов условно можно разложить на множество более мелких элементов стандартных форм (куб, цилиндр, сфера, плоскости различной формы и т.д.), поэтому редактор визуальных объектов представляет собой достаточно простой конструктор формирования объектов из геометрических примитивов. В тех случаях, когда одних примитивов недостаточно для создания объекта с необходимой детализацией, объекты могут создаваться на основе полигональной сетки. Их использование позволяет более точно настроить форму объекта, а также дополнять простые объекты через добавление мелких деталей. Описание всех созданных визуальных объектов сохраняется в онтологии визуальных объектов и онтологии визуализации приложения;

– Компоновка созданного набора визуальных объектов в единую сцену, для этого с помощью редактора визуальных сцен необходимо описать их расположение и поведение на сцене в виде правил. Правила определяют то, как будут расположены все объекты на сцене и их дальнейшее поведение в зависимости от различных параметров (входных данных, полученных от пользователя, или параметров других объектов). Данные правила служат основой для последующей трансляции и генерации кода визуальной сцены;

– Генерация программного кода визуальной сцены на основе полученной структуры всей визуальной сцены. Структура сцены поступает в модуль генерации кода, где на ее основе формируется программный код на языке JavaScript;

– Отрисовка визуальной сцены в браузере (рис. 22). Код всех основных функций встраивается в формируемый модулем визуализации код пустой визуальной сцены, тем самым наполняя ее объектами и событиями. Полученная визуальная сцена отображается при помощи браузера и принимает входные данные, определяющие ее поведение, образуя тем самым подсистему визуализации (1) (авторы: д.т.н. О.А. Николайчук, к.т.н. А.И. Павлов, С.А. Коршунов).

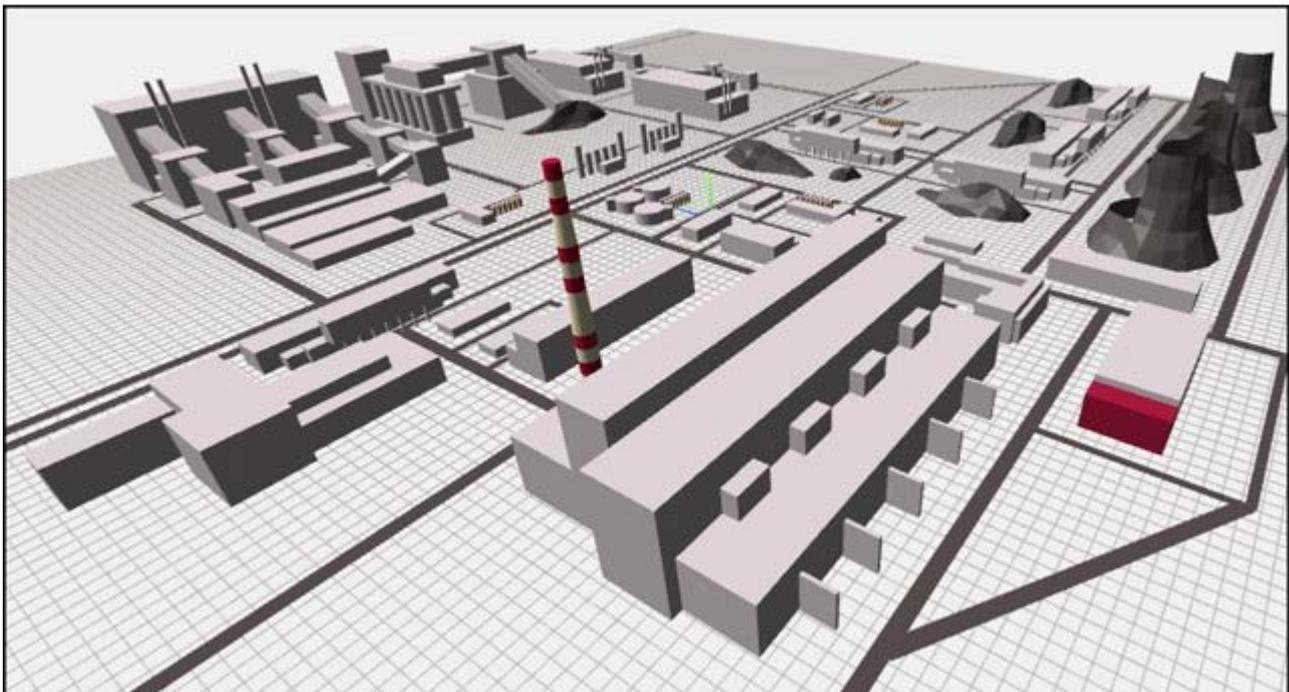


Рис. 22. Визуальная сцена промышленной зоны

Разработана модель информационного процесса создания и функционирования системы агентного имитационного моделирования, обеспечивающая в соответствии с



принципами MDE возможность автоматизированного создания прикладных агентных имитационных моделей (АИМ). В рамках предложенного информационного процесса используется следующая иерархия метамоделей:

M3 определяет наиболее абстрактные элементы для спецификации M2:

- M^{Ont} – метамета модель онтологии,
- M^{KB} – метамодель продукционной базы знаний,
- M^{Com} – метамодель операций;

M2 – спецификация элементов M1 согласно выбранной методологии разработки АИМ:

- M^{St-A} – метамодель элементов структуры агентной модели,
- M^{Com-A} – метамодель поведения агентной модели;
- M^A – предметно-независимая агентно-ориентированная метамодель,

M1 – спецификация АИМ:

- M^{Ont-D} – онтология предметной области,
- M^{KB-D} – база знаний, описывающая поведение объектов предметной области,
- M^{St-A-D} – структура агентной модели конкретной предметной области,
- M^{A-D} – агентная модель конкретной предметной области;

M0 – имитационная модель во время выполнения:

- $codI$ – выполнение спецификации программой-интерпретатором,
- $codG$ – сгенерированный исходный код имитационной модели.

Для перечисленных моделей определено следующее множество преобразований:

- $M^{St-A} \times M^{Com} \rightarrow M^{Com-A}$,
- $M^{Com-A} \times M^{St-A} \rightarrow M^A$,
- $M^{KB} \times M^{Ont-D} \rightarrow M^{KB-D}$,
- $M^{Ont-D} \times M^{St-A} \rightarrow M^{St-A-D}$,
- $M^A \times M^{St-A-D} \times M^{KB-D} \rightarrow M^{A-D}$,
- $M^{A-D} \rightarrow codI | codG$.

Информационный процесс включает в себя следующие этапы (рисунок 23):

– Онтологическое моделирование структуры агентной модели. На данном этапе с помощью редактора онтологий необходимо описать понятия, которые будут использованы в качестве элементов (строительных блоков) для описания архитектуры агента, среды и других объектов АИМ;

– Онтологическое моделирование поведения агентной модели. На данном этапе с помощью редактора операций необходимо описать поведение активных элементов АИМ (агент, среда), используя в качестве элементов (строительных блоков) методы функциональных компонентов системы агентного имитационного моделирования (компонент работы с базой данных, коммуникационный компонент, компонент рассуждений на основе правил и т.п.). При этом каждый метод функционального компонента является базовой операцией, которые можно объединять в последовательности для реализации более



сложного поведения. Операции, состоящие из последовательности базовых, называются производными;

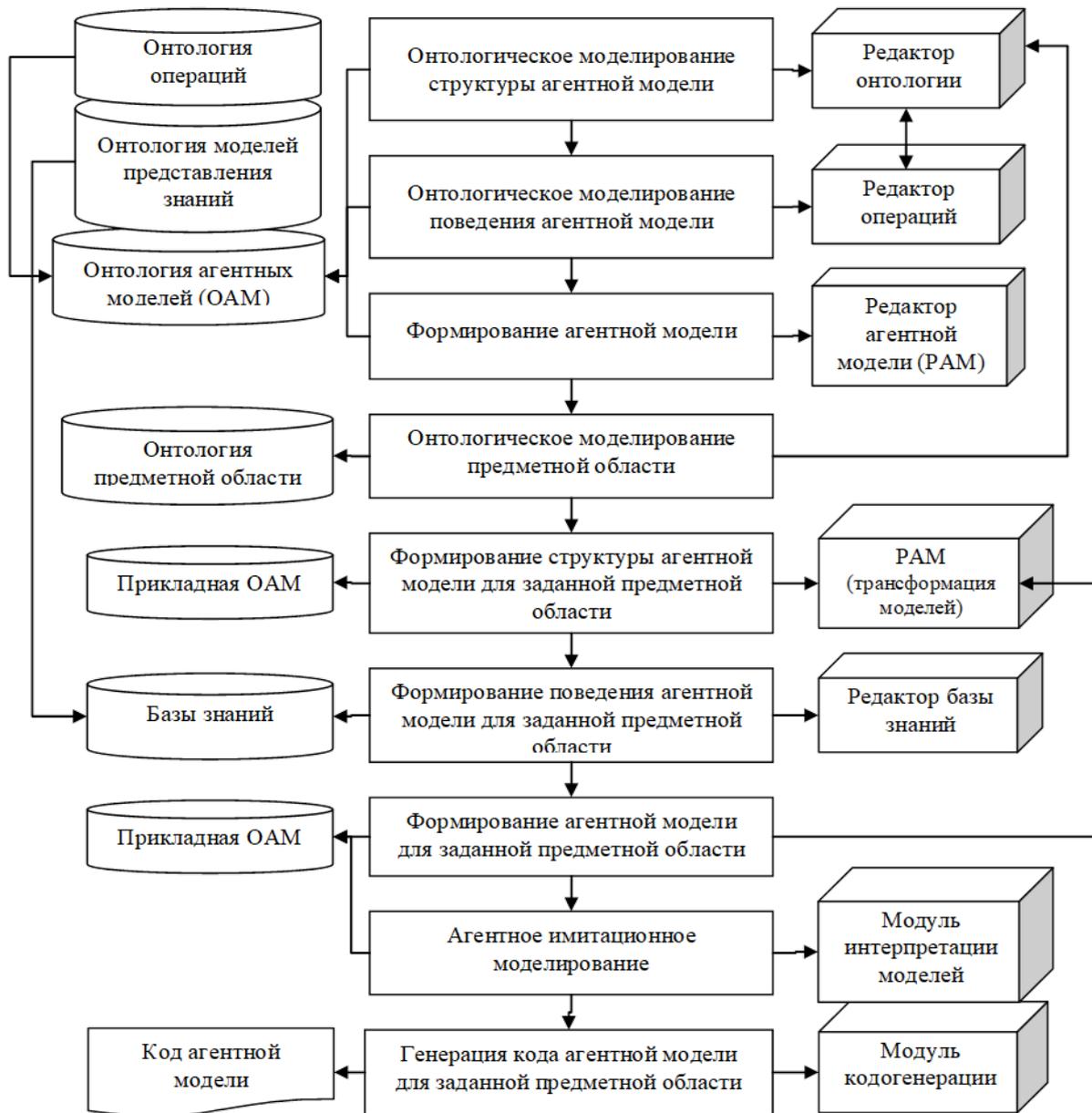


Рис. 23. Модель информационного процесса создания и функционирования системы агентного имитационного моделирования

– Формирование агентной модели. На данном этапе с помощью редактора агентных моделей осуществляется объединение описания возможных элементов структуры и поведения АИМ в единую метамодель АИМ, которая в дальнейшем будет использована в процессе разработки прикладных АИМ;

– Онтологическое моделирование предметной области. На данном этапе с помощью редактора онтологий описываются понятия заданной предметной области, их свойства и связи;



– Формирование структуры агентной модели для заданной предметной области. На данном этапе с помощью редактора агентных моделей осуществляется установка соответствия между понятиями заданной предметной области и понятиями, описывающими элементы структуры АИМ. Например, «Специфицированное изделие» – «Агент», «Датчик давления» – «Сенсор», «Увеличить давление» – «Действие»;

– Формирование поведения агентной модели для заданной предметной области. На данном этапе с помощью редактора продукционных баз знаний осуществляется разработка баз знаний, описывающих поведение объектов предметной области. При этом допускается использование уже существующих вычислительных модулей (web-сервисов), вызов которых осуществляется через коммуникационный компонент;

– Формирование агентной модели для заданной предметной области. На данном этапе с помощью редактора агентных моделей происходит конкретизация метамодели АИМ описанием заданной предметной области. При этом происходит формирование структуры прикладной АИМ путем объединения агентно-ориентированных и предметных свойств, а также выполняется конкретизация поведения, при которой происходит распределение ранее созданных баз знаний и обращений к вычислительным модулям по соответствующим параметрам операций активных элементов прикладной АИМ;

– Агентное имитационное моделирование. На данном этапе с помощью модуля интерпретации моделей осуществляется апробация и тестирование полученной прикладной АИМ;

– Генерация кода агентной модели для заданной предметной области. На данном этапе с помощью модуля трансформации моделей осуществляется генерация отчуждаемого кода прикладной АИМ (авторы: д.т.н. О.А. Николайчук, к.т.н. А.И. Павлов, к.т.н. А.Б. Столбов).

Проведен анализ методов и средств принятия решений, базирующихся на использовании аппарата мультимножеств, в частности, уточнена формулировка понятия мультимножества. Согласно работам Петровского А.Б., Ягера (Yager), Миямото (Miyamoto), Ли (Li), Славина О.А., Тарасова В.Б., Литвиновой А.В., Фуремс.Е.М., Гнеденко Л.С., Ройзензона Г.В., Заболеевой-Зотовой А.В., Чеснокова А.М., Воробьева В.В. Паршиковой Е.А., Гусевой М.В., Редько В.И. мультимножество – это множество с повторяющимися элементами, другими словами, обобщение понятия множества, допускающее включение одного и того же элемента по нескольку раз. Впервые описано мультимножество в работе 1970-х годов Николаса де Брейна. В настоящее время понятие мультимножества активно используется в таких научных направлениях как теория принятия решений, искусственный интеллект. В нашей стране автором первой систематической работы по теории мультимножеств является Петровский А.Б., им же впервые введены операция над мультимножествами, метрики. В области искусственного интеллекта Ягером введено понятие нечеткого мультимножества, которое сейчас успешно применяется для выполнения мягких вычислений.

Задачу принятия решений можно представить в виде кортежа $T = \langle A, C, E, IP \rangle$, где

- T – задача принятия решений;
- $A = \{A_1, A_2, \dots, A_n\}$, $n \geq 2$ – конечное, заранее заданное множество вариантов, которое не изменяется в процессе решения задачи;



- $C = \{C_1, C_2, \dots, C_m\}$, $m \geq 2$ – конечное, согласованное со всеми заинтересованными сторонами множество оцениваемых характеристик вариантов – критериев;
- $E = \{E_1, E_2, \dots, E_k\}$, $k \geq 1$ – лицо, принимающее решение, или группа заинтересованных лиц, участвующих в процессе принятия решения, – экспертов;
- $IP = \{IP_1, IP_2, \dots, IP_k\}$, $k \geq 1$ – профиль индивидуальных предпочтений, которые могут быть представлены в любой из форм оценки (количественные, качественные), упорядочения вариантов, парные сравнения (числовые, вербальные значения).

На основе мультимножеств разработаны следующие методы решения задач принятия решения:

- процедуры иерархической и неиерархической кластеризации позволяют разбивать множество вариантов на произвольное число кластеров,
- процедура построения обобщенного решающего правила для классификации многопризнаковых объектов предназначена для распределения вариантов по заранее определенным классам,
- метод ранжирования многопризнаковых объектов (АРАМИС) применяется для одновременной обработки вербальных и/или числовых оценок экспертов,
- технологии ПАКС (ПАКС-М) обеспечивают снижение размерности признакового пространства, построение нескольких иерархических систем составных критериев и интегрального показателя качества, которые агрегируют исходные признаки, классификацию и/или упорядочение многопризнаковых объектов, используя единственный метод принятия решений (разные комбинации нескольких методов принятия решений).

Все перечисленные методы позволяют решать основные задачи в области принятия решений: выбор лучшего варианта, упорядочение вариантов, классификация. Основными достоинствами методов, базирующихся на аппарате мультимножеств, являются:

- отсутствие необоснованных преобразований,
- их применение не приводят к искажению или потере исходной информации,
- могут применяться как при индивидуальном, так и при групповом принятии решений,
- позволяют формировать интерпретацию (обоснование) окончательного решения.

На практике наиболее часто возникают задачи выбора и/или упорядочения вариантов, в которых всю информацию о вариантах (профиль индивидуальных предпочтений), в которых информацию об оценках вариантов можно представить в виде мультимножеств следующего вида: $A_i = \{k_{Ai}(x_1^1) \circ x_1^1, \dots, k_{Ai}(x_1^{h1}) \circ x_1^{h1}, \dots, k_{Ai}(x_m^1) \circ x_m^1, \dots, k_{Ai}(x_m^{hm}) \circ x_m^{hm}\}$, где $k_{Ai}(x_s^{es})$ – число экспертов, давших объекту A_i оценку $x_s^{es} \in X_s$, $s=1, \dots, m$, $X = \{x_1, x_2, \dots\}$ – шкала оценивания. Такое преобразование мнений экспертов не только не приводит к потере или искажению информации, но и позволяет построить методы обработки с единой методологической основой. Отметим, что в литературе описаны разнообразные примеры использования методов, базирующихся на теории мультимножеств, а также использующих данную форму представления разнообразной информации (тексты, базы данных).

С целью повышения эффективности принятия решений разработаны разнообразные программные продукты, например, ГАС «Выборы», «СВИРЬ», «Выбор», «Общий мозг», «ПОИСК-ИТ», «ДУМА», система стратегического планирования предвыборной кампании, «ОЦЕНКА и ВЫБОР», системы электронного голосования и др. Однако в литературе



отсутствует описание информационной системы, реализующей методы с использованием мультимножеств. Для повышения эффективности применения таких методов используется табличный редактор Microsoft Excel. В связи с этим задача разработки полноценного программного продукта, реализующего методы с использованием аппарата мультимножеств, является актуальной, которая позволит:

- оказывать полноценную поддержку лицу, принимающему решение, решать разнообразны задачи принятия решений (автор Г.С. Малтугова).

В рамках решения поставленной задачи определена модель трансдисциплинарной задачи (ТДЗ) согласно модели динамики технического состояния сложного опасного объекта (рис. 24). Элементами декомпозиции являются дисциплинарные (монодисциплинарные) задачи (ДЗ) и междисциплинарные задачи (МДЗ).

Монодисциплинарные задачи предназначены для обеспечения приемлемого риска классов критических состояний (ККС) (ДЗ 1.1 – ДЗ К.М) (рис. 25) и требуют для своего решения условно одну-пять дисциплин. Например, для решения задачи исследования и обеспечения требуемых параметров класса «Исходное состояние» достаточно знаний, входящих в специальности «Детали машин и основы конструирования», «Материаловедение», «Сопrotивление материалов». Количество параметров при решении монодисциплинарных задач колеблется в пределах от 100 до 300 и зависит от уровня сложности СОО. Монодисциплинарные задачи одновременно принадлежат как к МДЗ соответствующих информационных уровней (горизонтالي), так и к МДЗ уровней критичности состояний (вертикали).

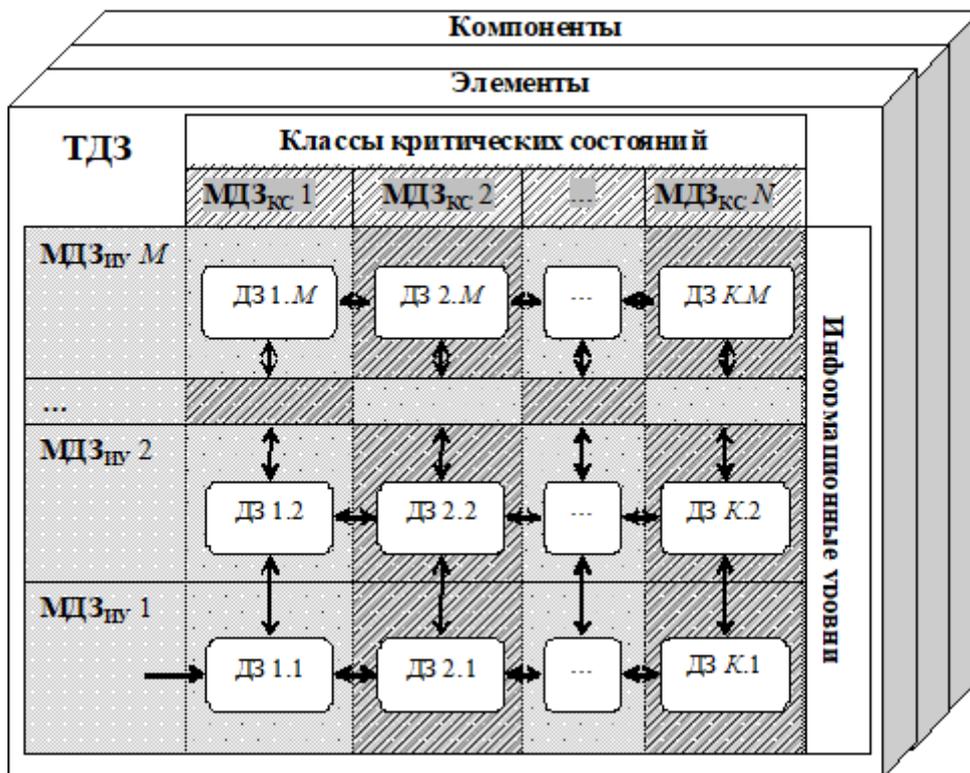


Рис. 24. Трансдисциплинарная задача (ТДЗ) обоснования допустимого значения риска сложного технического объекта: (МДЗИУ 1 – МДЗИУ М) – междисциплинарные задачи информационного уровня; (МДЗКС 1 – МДЗКС М) – междисциплинарные задачи классов критических состояний; (ДЗ 1.1 – ДЗ К.М) – дисциплинарные (монодисциплинарные) задачи



Предложенная модель ТДЗ положена в основу создаваемой системы научных исследований. Для ее управления разработана структура системы управления (СУ) процессом исследования для решения монодисциплинарных задач обеспечения приемлемого техногенного риска рассматриваемого ККС сложного опасного объекта.

Структура системы управления монодисциплинарной задачи определяется информационным, математическим и интеллектуальным обеспечением, а также алгоритмом управления. Первое базируется на онтологическом представлении информации, в частности, на разработанных онтологических моделях дисциплин, задач, методов и средств их реализации. Второе – на алгоритме самоорганизации решателей монодисциплинарных задач.

Целью управления является обеспечение обобщенного параметра класса (параметра порядка), характеризующего техногенный риск, R .

Предлагается обобщенный параметр риска рассматриваемого ККС вычислять по формуле $\mathfrak{R} = \prod_{i=1}^n r_i k_i \leq [R]$, где \mathfrak{R} – обобщенный параметр риска ККС; $[R]$ – допустимое значение обобщенного параметра риска ККС; r_i – риск параметра состояния; k_i – коэффициент весомости параметра; n – количество параметров класса.

Инициализация системы управления осуществляется в случае превышения параметром R допустимого значения для рассматриваемого класса. В этом случае система управления на основе самоорганизующегося алгоритма формирует вычислительную структуру, которая реализуется решателем дисциплинарных задач.

Структуру системы управления исследованиями представим в следующем виде (рисунок 27): $CS_DSS = (Dt, Knl, Ont, MS, P, \hat{P}, Slv, Crd, R_{DSS}, Ind, Pln)$, где Dt – базы данных, Knl – базы знаний, Ont – онтология предметной и проблемной областей, $Ont \rightarrow \{P, \hat{P}, Dt, Knl, R_{DSS}\}$, MS – системы измерений, P – задачи, \hat{P} – иерархия задач, Slv – «решатели», Crd – «координаторы» задач, R_{DSS} – отношения между компонентами CS_DSS , $R_{DSS} = \{R^{PP}, R^{PCrd}, R^{PSlv}\}$, R^{PP} – отношения между задачами, R^{PCrd} – отношения между задачами и «координаторами», R^{PSlv} – отношения между задачами и «решателями», Ind – индикаторы состояния, $Ind = \{I^{DefP}, I^{SP}, I^{Un}, I^{Risk}\}$ – множество индикаторов формулировки, состояния, неопределенности задачи и риска, Pln – планировщик, реализующий самоорганизующийся алгоритм $SAlg$ решения задачи на основе локальных правил $LRule$, $Pln = \langle LRule, SAlg \rangle$ (авторы д.т.н. А.Ф. Берман, д.т.н. О.А. Николайчук).

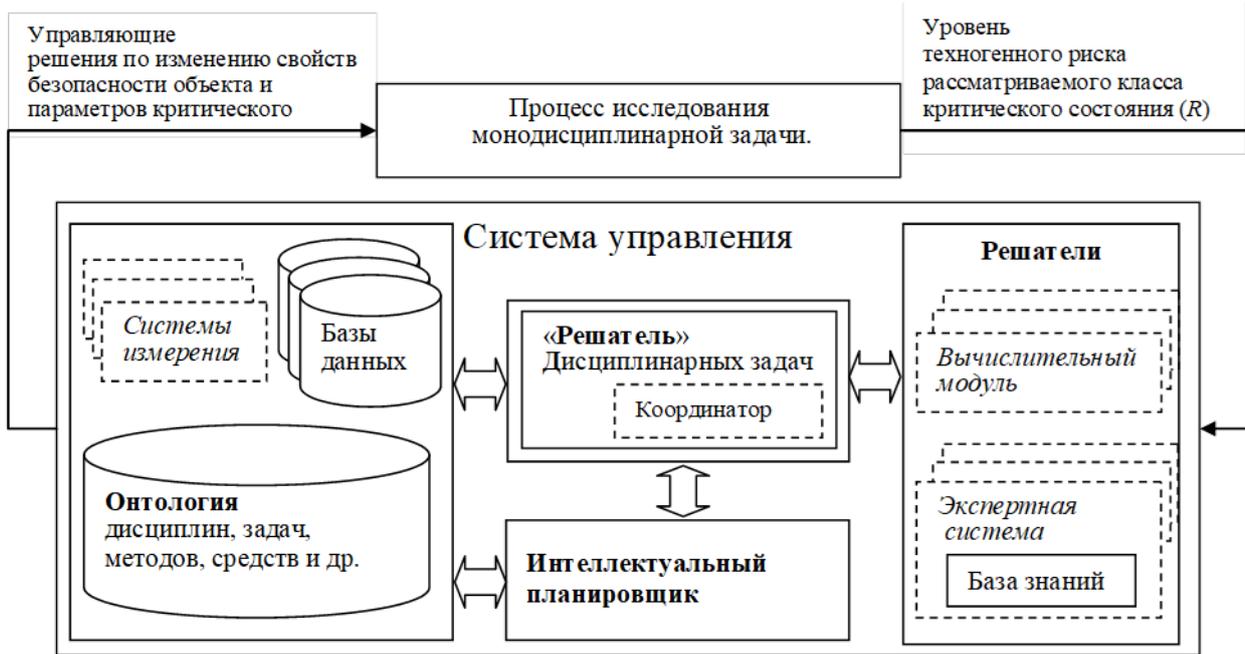


Рис. 25. Структура системы управления исследованиями монодисциплинарных задач



Тема № IV.38.1.3. Разработка методов непрерывной и дискретной оптимизации и их реализация на высокопроизводительных вычислительных системах для поддержки междисциплинарных научных исследований

№ гос. регистрации: АААА-А17-117032210077-7

Научный руководитель – д.ф.-м.н. А.С. Стрекаловский

Доказаны новые условия глобальной оптимальности (УГО) для минимизирующих последовательностей в задаче оптимального управления с (d.c.) функциями А.Д. Александрова, представимыми в виде разности двух выпуклых функций (*авторы: д.ф.-м.н. А.С. Стрекаловский, М.В. Янулевич*).

Разработана методология поиска глобальных решений в иерархических и равновесных задачах исследования операций с билинейными структурами, использующая базовые свойства билинейных функций (*авторы: д.ф.-м.н. А.С. Стрекаловский, к.ф.-м.н. А.В. Орлов*).

Исследованы математические модели целочисленного программирования составления расписания работы взлетно-посадочной полосы и разработаны методы поиска оптимальных решений в практической задаче диспетчерского управления воздушным движением (*автор: к.ф.-м.н. И.Л. Васильев*).

Разработаны новые подходы к организации грид-сред с использованием ресурсов кластеров и проектов добровольных вычислений (*автор: к.т.н. О.С. Заикин*).

Разработаны новые алгоритмы восстановления акустической информации на основе анализа сигнала от одного гидрофона. Разработанные алгоритмы были реализованы на вычислительных кластерах и в специальном проекте добровольных вычислений (*автор: к.т.н. О.С. Заикин*).

Разработаны новые алгоритмы решения задачи MAXSAT в применении к хорновским КНФ. Построенные алгоритмы были использованы при работе с некоторыми типами онтологий в дескриптивных логиках (*автор: к.ф.-м.н. А.С. Игнатьев*).

Разработана новая система пропозиционального вывода, основанная на процедуре т.н. «двухрельсового» кодирования (Dual Rail Encoding, DRE). Было показано, что известные формулы Дирихле имеют в новой системе доказательства полиномиальной длины. Было установлено, что новая система доказательств, основанная на DRE, сильнее пропозиционального варианта общей резолюции (*автор: к.ф.-м.н. А.С. Игнатьев*).

Разработаны новые алгоритмы решения некоторых оптимизационных задач на графах, использующие SAT-оракулы (*автор: к.ф.-м.н. А.С. Игнатьев*).

Для задач о размещении обслуживающих логистических центров (ЛЦ) с пространственными ограничениями предложены две математические модели в виде задач об упаковке и о покрытии ограниченного многосвязного множества наборами равных кругов. Поскольку критерием оптимальности является время достижения ЛЦ потребителями, в данных задачах применяется специальная неевклидова метрика, которая базируется на решении уравнения эйконала в случае неоднородной среды. Разработаны и программно реализованы новые вычислительные алгоритмы, основанные на физических принципах Ферма и Гюйгенса, проведен вычислительный эксперимент (*автор: к.ф.-м.н. А.А. Лемперт*).

На основе созданной авторами обобщенной имитационной модели логистического терминала определены критические показатели работы транспортно-пересадочного узла (ТПУ). В качестве примеров рассматриваются ТПУ «Владыкино» и «Кутузово» (Москва),



для которых в ходе вычислительного эксперимента рассчитаны основные показатели эффективности функционирования и выработаны рекомендации по улучшению технико-технологических параметров работы (*авторы: к.ф.-м.н. А.А. Лемперт, М.Л. Жарков*).

В рамках направления по разработке технологии поддержки исследований динамических многокомпонентных систем на основе математического и имитационного моделирования проведен аналитический обзор программного обеспечения, используемого для поддержки исследований социо-эколого-экономических систем на основе комплекса моделей «Регион». На основе анализа публикаций, отчетов и документаций проведен анализ архитектур программных систем, их основных функций и способов реализации. Созданы модели программ в форме UML диаграммы прецедентов и компонентов. В зависимости от набора решаемых задач и моделируемых компонент социо-эколого-экономических систем выполнена классификация множества программ, проведена оценка дальнейших перспектив исследований в данном направлении (*автор: к.т.н. А.Б. Столбов*).

Выполнено подробное моделирование процесса формирования профиля температуры в многослойной системе с фазовым переходом на границе вода – лед (задача Стефана) и сформулирована обратная задача. Прямое решение задачи Стефана с заданными коэффициентами применялось для оценки влияния температуры воздуха, солнечной радиации и теплообмена в толще льда и подледной воде на изменчивость температуры в системе вода – лед. Решение обратной задачи Стефана на основе измеренных толщины льда, поступающей солнечной радиации и температуры толщи льда и подледного слоя воды в системе вода – лед использовалось для расчета коэффициента эффективной теплопроводности и оценки вертикального распределения потоков тепла. Установлено, что основной причиной раннего разрушения ледового покрова на озере Байкал является увеличение тепловых потоков при усилении течений и вертикального обмена в подледном слое воды. Именно этим объясняется появление кольцевых структур на поверхности ледового покрова, которые наблюдаются в апреле, перед разрушением ледового покрова (*автор: В.В. Козлов*).

Предложены два метода последовательных улучшений, основанные на разложении уравнения Беллмана для специальной задачи оптимального управления: требуется минимизировать функционал отклонения нормы от начальных условий в исходной задаче. При этом, если конечная точка лежит во множестве достижимости, то значение функционала равняется нулю, а значит, и функционал Беллмана равен нулю. Аппроксимация уравнения Беллмана осуществляется вдоль специально выбранной траектории с начальными условиями, не удовлетворяющими начальным условиям исходной задачи. Первый метод основан на аппроксимации (до второго порядка) уравнения Беллмана и содержит дополнительные параметры регулирования. Второй получается как результат линейной аппроксимации базовых конструкций по параметру, что позволяет применять процедуры одномерной минимизации (*автор: д.ф.-м.н. В.А. Батулин*).