



**РЕЗУЛЬТАТЫ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ПО ПРОГРАММАМ СО РАН**

В соответствии с Планом НИР и Государственным заданием на 2018 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

Исследовалась робастная устойчивость линейной стационарной системы ДАУ со структурированной матричной неопределенностью. Найдены линейные соотношения, которым должны подчиняться элементы матриц возмущений системы для того, чтобы размерность пространства решений и структура общего решения возмущенных ДАУ были такими же, как у номинальной системы. Такие возмущения названы «сохраняющими внутреннюю структуру». В предположениях, обеспечивающих сохранение структуры, получены условия робастной устойчивости для системы ДАУ произвольно высокого индекса неразрешенности, у которых неопределенность может присутствовать во всех матричных коэффициентах (*авторы: д.ф.-м.н. А.А. Щеглова, А.Д. Кононов*).

Разработан метод предельных дифференциальных включений для неавтономных функционально-дифференциальных уравнений с кусочно-непрерывными правыми частями. Изучен вопрос асимптотического поведения неавтономных систем, представленных в форме разрывных уравнений Лагранжа второго рода. Это могут быть системы управления с разрывными нелинейностями или системы с сухим кулоновым трением. При описании предельных уравнений существенным образом учитывалась структура исходных систем (*автор: д.ф.-м.н. И.А. Финогенко*).

Рассмотрена система нелинейных законов сохранения, в которой граничные условия зависят от текущего состояния некоторой управляемой системы. Подобные «смешанные» системы возникают в моделях, описывающих ряд физических и экономических процессов таких, как взаимодействие твердого тела с жидкостью или газом (например, движение поршня в трубе), движение крови в кровеносных сосудах, работа узла в цепочке поставок (supply chain). Доказано, что задача оптимального управления данной системой имеет решение в классе измеримых ограниченных управлений. Кроме того, установлено, что в ней всегда существуют почти оптимальные бэнг-бэнг управления (*автор: к.ф.-м.н. Н.И. Погодаев*).



**Отчет Института динамики систем и теории управления
имени В.М. Матросова СО РАН за 2018 г.**

Рассмотрена линейная система уравнений с непрерывно-дискретным временем, т.е. содержащая в своей динамике как непрерывные, так и дискретные переменные. При этом матрица при непрерывной составляющей вектора состояния системы является вырожденной. Такую систему будем называть вырожденной гибридной. Введены понятия согласованных начальных данных, множества достижимости, R -управляемости (управляемость в пределах множества достижимости). Получены условия разрешимости начальной задачи в условиях как непрерывного, так и разрывного решения. Получены достаточные, а также необходимые и достаточные свойства R -управляемости для рассматриваемых систем (автор: к.ф.-м.н. П.С. Петренко).

Доказана теорема существования решения начально-краевой задачи для квазилинейной системы дифференциально-алгебраических уравнений в частных производных индекса $(1,0)$. Попутно доказаны теоремы существования решения начально-краевых задач для линейной и полулинейной системы дифференциально-алгебраических уравнений в частных производных. Доказательство теорем основано на использовании структурной формы матричного пучка системы. Структурная форма позволила записать систему дифференциально-алгебраических уравнений в частных производных в расщепленном виде. К системе в расщепленном виде был применен метод характеристик, который позволил построить характеристические кривые, покрывающие искомые интегральные поверхности во всей области определения. Для систем квазилинейных дифференциально-алгебраических уравнений в частных производных индекса $(1,0)$ доказана устойчивость сплайн-коллокационного метода численного решения. Для квазилинейных систем индекса $(k,0)$ предложен и исследован итерационный сплайн-коллокационный метод с расщепленной структурой матричного пучка (автор: к.ф.-м.н. С.В. Свинина).

Для квазилинейного уравнения теплопроводности в случае степенной зависимости коэффициента теплопроводности от температуры получены новые классы специальных точных решений. Найденные решения описывают распространение с конечной скоростью тепловых возмущений на прямой, на плоскости и в трехмерном пространстве симметрично относительно начала координат. Процедура построения основывается на так называемом прямом методе Кларксона–Крускала, который позволяет редуцировать исследуемое уравнение к начальным задачам для некоторого семейства ОДУ второго порядка с вырождением. Методами теории динамических систем и степенной геометрии проведен детальный качественный анализ решений, порождающих тепловые волны с логарифмическим законом движения фронта. Установлено, что в этом случае возможны три различные конфигурации тепловой волны (автор: С.С. Орлов).

Изучены системы линейных дифференциальных уравнений высокого порядка с вырожденной матрицей в области определения при старшей производной искомой вектор-функции. Рассмотрены возмущения (необязательно малые) таких систем операторами Фредгольма и Вольтерра. Получены условия разрешимости возмущенных систем и начальных задач для них. Показаны принципиальные различия при выборе возмущений операторами Фредгольма и Вольтерра. Получены оценки влияния малых возмущений входных данных (начальных векторов и свободного члена) на решение начальных задач. На основе этих оценок предложен численный метод наименьших квадратов для решения начальных и краевых задач. Методы программно реализованы (авторы: д.ф.-м.н. В.Ф. Чистяков, к.ф.-м.н. Е.В. Чистякова).



**Отчет Института динамики систем и теории управления
имени В.М. Матросова СО РАН за 2018 г.**

Выделен класс линейных дифференциально-алгебраических уравнений с начальным условием, имеющий единственное непрерывно дифференцируемое решение, зависящее от старших производных правой части. Предполагая, что правая часть задана с известным уровнем ошибки, показано, что разностная схема первого порядка генерирует алгоритм регуляризации. Шаг интегрирования, зависящий от возмущения правой части, является параметром регуляризации (*авторы: д.ф.-м.н. М.В. Булатов, к.ф.-м.н. Л.С. Соловарова*).

Доказано существование решения в задаче оптимального импульсного управления с гистерезисной нелинейностью, заданной скалярным оператором гистерезиса типа люфт. Получено представление разрывных решений импульсной управляемой системы как решений вспомогательной системы вариационных неравенств. Получено необходимое условие оптимальности (*автор: к.ф.-м.н. О.Н. Самсонюк*).

Исследована задача оптимального управления процессом выметания при наличии конусных ограничений на образ управляющей меры (импульсного управления). Предложено расширение оператора решения для процесса выметания с движущимся множеством, заданным разностью между функцией ограниченной вариации (соответствующим решением дифференциального уравнения с мерой) и заданным равномерно проксимально регулярным множеством. Исследовано сведение задачи к вспомогательной с абсолютно непрерывными траекториями и получены результаты по аппроксимации решений (*автор: к.ф.-м.н. О.Н. Самсонюк*).

Разработан алгоритм численного решения невыпуклых задач дискретного оптимального управления на основе позиционного принципа минимума – необходимого условия оптимальности, усиливающего принцип максимума Понтрягина и не предполагающего выпуклости задачи. Алгоритм использует вспомогательные позиционные управления, потенциально обеспечивающие спуск по целевому функционалу. Эти позиционные управления строятся по правилу экстремального прицеливания: в каждом узле сетки разбиения значение вспомогательного управления определяется глобальным, возможно приближенным, решением задачи максимизации функции Понтрягина. Для решения этой задачи используется многометодная технология, основанная на наборе алгоритмов невыпуклой конечномерной оптимизации, включающем алгоритмы Лууса-Яаколы, имитации отжига, туннельный поиск, сферический поиск и другие (*авторы: к.ф.-м.н. С.П. Сорокин, д.т.н. А.Ю. Горнов, А.С. Аникин*).

Алгоритм решения задач дискретного оптимального управления на основе позиционного принципа минимума адаптирован для численного решения непрерывных задач оптимального управления в нелинейных динамических системах. Проведено многовариантное тестирование алгоритма на коллекции тестовых задач, включающей несколько десятков примеров; оценена область эффективного применения метода. Метод показал высокую эффективность на модельных задачах с типовыми особенностями: при наличии множества экстремалей, аномальных, строгих и нестрогих экстремалей Понтрягина и других (*авторы: к.ф.-м.н. С.П. Сорокин, д.т.н. А.Ю. Горнов, к.т.н. Т.С. Зароднюк*).

Изучены комплементарные импульсные системы, описываемые дифференциальными уравнениями с мерами. Получена корректная аппроксимация (возмущение) решений комплементарных систем обычными непрерывными динамическими процессами. Исследовано асимптотическое поведение возмущенных решений в сингулярной фазе при стремлении параметра возмущения к нулю (*авторы: к.ф.-м.н. Е.В. Гончарова, к.ф.-м.н. М.В. Старицын*).



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

Рассмотрена связь между схемой унитарного квантования и параферми-статистикой порядка 2. Предложено соответствующее обобщение анзаца Грина, которое позволило обратить в тождество билинейные и трилинейные соотношения для операторов рождения и уничтожения двух различных параферми-полей φ_a и φ_b . Предложен способ включения паракрасмановых чисел ξ_k в общую схему унитарного квантования. Для парастатистики порядка 2 обнаружен интересный факт, что трилинейные соотношения, содержащие как паракрасмановы переменные ξ_k , так и операторы поля a_k , b_m , при некотором обратимом отображении переходят в унитарно эквивалентные соотношения, в которых коммутаторы заменяются на антикоммутаторы и наоборот. Показано, что следствием данного обстоятельства является существование двух альтернативных определений когерентного состояния для параферми-осцилляторов. В явном виде построено преобразование Клейна для гриновских компонент операторов a_k и b_m , что позволило привести исходные коммутационные правила для компонент к нормальным коммутационным соотношениям для обычных ферми-полей. Проанализирована нетривиальная связь между трилинейными коммутационными соотношениями схемы унитарного квантования и так называемой тройной суперлиевой системой. Проведено краткое обсуждение возможности включения теории Дэффина-Кеммера-Петье в схему унитарного квантования (авторы: д.ф.-м.н. Ю.А. Марков, д.ф.-м.н. М.А. Маркова, А.И. Бондаренко).

Предложен новый метод обращения взвешенного лучевого преобразования. Предполагается, что известны томографические данные экспериментов для векторного поля и весовой скалярной функции. Задача обращения сведена к решению системы линейных алгебраических уравнений. Предварительно векторное поле и скалярная весовая функция представляются в виде рядов по специальным базисным векторным и скалярным функциям, соответственно. Важной особенностью метода является возможность аналитического вычисления трехмерного интеграла свертки в Фурье пространстве (автор: д.ф.-м.н. А.Л. Баландин).

Для задачи об инициировании тепловой волны краевым режимом, заданном на подвижном многообразии, и последующем ее движении с конечной скоростью по холодному (нулевому) фону доказаны новые теоремы существования и единственности решений в классе аналитических функций с построением последних в виде сходящихся степенных рядов с рекуррентно вычисляемыми коэффициентами. Рассмотрен общий случай двух пространственных переменных (без источника), а также частный случай задачи со степенным источником. Кроме того, для исследованных задач найдены новые классы точных решений, построение которых сводится к интегрированию задач Коши для обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ). Решения ОДУ исследованы и интерпретированы с точки зрения свойств соответствующих тепловых волн (авторы: д.ф.-м.н. А.Л. Казаков, к.ф.-м.н. П.А. Кузнецов).

Вычислен вклад от аксиально-векторных мезонов в потенциал мюонно-протонного



взаимодействия в мюонном водороде. Такой обмен индуцирован аномальной аксиально-векторной вершиной взаимодействия мезонов с двухфотонным состоянием. Показано, что такой вклад в сверхтонкое расщепление мюонного водорода оказывается достаточно заметным и важен для проведения сравнения с прецизионными экспериментальными данными (*автор: к.ф.-м.н. А.Е. Раджабов*).

Исследованы некоторые обобщения классических сумм степеней натуральных чисел, возникающих в непрерывном пределе интегрируемой иерархии цепочки Ито-Нарита-Богоявленского. В частности, для так называемых сумм степеней высшего порядка получено явное выражение для многочленов. Это выражение является прямым аналогом формулы Бернулли, в которой числа Бернулли заменяются на их высшие аналоги, и кроме того, появляются числа Стирлинга второго порядка. Аналогичные результаты получены также для некоторого класса многократных сумм степеней натуральных чисел, тесно связанных с суммами степеней высшего порядка (*автор: к.ф.-м.н. А.К. Свинин*).

Рассмотрена система ОДУ со степенными нелинейностями. Такого рода системы ОДУ встречаются в математической биологии и химической кинетике, а также могут возникать в результате редукции более сложных моделей. Найдены условия на параметры системы ОДУ, гарантирующие существование первых интегралов, задаваемых комбинациями степенных и логарифмических функций от фазовых переменных. С использованием первых интегралов построены периодические решения трехмерных систем, которые выражаются эллиптическими функциями Якоби. Приводится целый ряд примеров, иллюстрирующих полученные результаты (*автор: к.ф.-м.н. Э.И. Семенов*).

Изучен механизм нарушения лептонного числа в глубоко-неупругом рассеянии электронов или мюонов на фиксированной ядерной мишени. Модельно-независимый анализ основан на введении 4-х фермионных низко-энергетических эффективных операторов, описывающих взаимодействие лептонов и кварков. Были оценены константы взаимодействия за счет этих операторов для эксперимента NA64 в ЦЕРН на SPS. Был проведен анализ спектра конечных состояний и дана оценка возможности наблюдения данного эффекта на эксперименте NA64. Также был рассмотрен случай поляризованных пучков (*автор: к.ф.-м.н. А.С. Жевлаков*).

Тема 1.1.4.3. 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

В терминах тензорного произведения гильбертовых пространств проведено функционально-геометрическое изучение необходимых и достаточных условий существования дифференциальной реализации непрерывной бесконечномерной динамической системы (бихевиористической системы Я. Виллемса) в классе билинейных нестационарных обыкновенных дифференциальных уравнений второго порядка (в том числе гиперболических моделей) в сепарабельном гильбертовом пространстве. При этом билинейная структура моделирует нелинейность как самой траектории, так и скорости движения на этой траектории. Попутно аналитически обоснованы топологические



**Отчет Института динамики систем и теории управления
имени В.М. Матросова СО РАН за 2018 г.**

условия непрерывности проективизации нелинейного функционального оператора Релея–Ритца с вычислением фундаментальной группы его образа. Полученные результаты имеют приложения в структурной идентификации полилинейных дифференциальных моделей высших порядков (*авторы: д.ф.-м.н. А.В. Лакеев, д.ф.-м.н. В.А. Русанов*).

Созданы два графических редактора, предназначенных для формирования символьного описания механической системы или электрической цепи. В качестве механической рассматривается система взаимосвязанных абсолютно твердых тел, соединенных шарнирами. Первый редактор представляет собой пользовательский интерфейс, посредством которого исследователь задает структуру взаимосвязи тел (конфигурацию системы), а через контекстное меню – геометрические и кинематические характеристики для каждого тела системы. Второй визуальный редактор позволяет формировать граф электрической цепи путем интерактивного добавления связанных графических примитивов. Созданные структуры конкретной механической системы или исследуемой цепи, а также введенные данные для них автоматически представляются редакторами в виде текстового файла, который может использоваться в качестве входного для программного комплекса по моделированию и качественному анализу механических систем и электрических цепей в символьном виде (*авторы: к.ф.-м.н. А.В. Банищikov, А.А. Ветров*).

Исследован вопрос о влиянии сил на устойчивость относительного равновесия спутника с управляемым гравитационным стабилизатором на круговой орбите. Решена задача о возможности обеспечить асимптотическую устойчивость системы «сокращенным» набором из действующих сил (*автор: к.ф.-м.н. А.В. Банищikov*).

Разработан новый геометрический подход к анализу множества относительных равновесий. Предлагается определять относительные равновесия в соответствующем трехмерном евклидовом пространстве с использованием специальных агрегированных параметров системы по координатам точек пересечения двух пар соответствующих гиперболических цилиндров со сферой единичного радиуса. Показано, что при любой величине гиростатического момента и других параметров системы имеется по крайней мере восемь различных относительных равновесий (*автор: к.ф.-м.н. С.В. Чайкин*).

Рассматривается система трех степеней свободы, описываемая системой дифференциальных уравнений вращения твердого тела вокруг неподвижной точки. Для нее известны четыре первых интеграла. Три из них являются общими, четвертый – частный интеграл Гесса. Проведена классификация выделенных стационарных движений. Часть из них параметризована одним из множителей Лагранжа связки первых интегралов. Другая часть стационарных движений описывается только динамическими и статическими характеристиками системы: моментами инерции тела и координатами центра масс. Некоторые полученные стационарные движения для рассматриваемых дифференциальных уравнений движения, в частности, существуют и без интеграла Гесса. Для одного такого стационарного движения проведено исследование устойчивости по линейному приближению. Найдены области, в которых при определенном соотношении значений динамических и статических параметров системы исследуемое стационарное движение будет устойчивым (*автор: д.ф.-м.н. М.А. Новиков*).

В задаче о вращательном движении волчка Ковалевской в двойном поле сил на основе метода Рауса-Ляпунова и его обобщений проведен качественный анализ дифференциальных уравнений, которые получаются в результате редукции исходной системы на ИМ



**Отчет Института динамики систем и теории управления
имени В.М. Матросова СО РАН за 2018 г.**

коразмерности 2. Для указанных уравнений найдены особые решения и их семейства. Для ряда найденных решений построены линейные и нелинейные комбинации первых интегралов задачи, доставляющие стационарные значения этим решениям. Эти комбинации интегралов использованы при исследовании их устойчивости. Получены и сопоставлены с необходимыми достаточные условия устойчивости по Ляпунову (*авторы: д.ф.-м.н. В.Д. Иртегов, к.т.н. Т.Н. Титоренко*).

Получил развитие новый метод расчета управлений переориентацией космических аппаратов (КА). Публикация этого результата представляет собой цикл из двух статей с общим названием «Расчет программных управлений, не порождающий сингулярных состояний гиросистемы. I, II». В первой статье подробно описан новый метод решения задачи ориентации, впервые позволяющий получить законы управления, не содержащие особых (сингулярных) положений гирузлов, в которых исполнение вычисленных законов гиродинами прерывается. Это свойство новых законов решает полувекового возраста *«проблему сингулярности»* исполнительных гироудинов. Вторая статья посвящена прикладному аспекту новой технологии расчета законов программных управлений ориентацией КА. Численная реализация проведена на примере динамической модели космического телескопа с реальными характеристиками и шестью гиродинами. Результаты демонстрируют отсутствие в вычисленных законах наведения телескопа сингулярных значений углов прецессии гирузлов исполнительных гироудинов, что гарантирует безостановочное исполнение вычисленных законов с необходимой точностью и быстродействием (*авторы: ак. И.В. Бычков, Б.Б. Беляев, д.т.н. Э.И. Дружинин, к.т.н. С.А. Ульянов*).



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. РАН И.В. Бычков

Разработан ориентированный на применение суперкомпьютеров логический метод (метод булевых ограничений) и сервис-ориентированная технология создания и применения компьютерной системы для качественного исследования динамики поведения траекторий автономных двоичных динамических систем на конечном интервале времени. Спецификация динамического свойства записывается на языке логики предикатов с использованием ограниченных кванторов существования и всеобщности. Получены булевы уравнения поиска равновесных состояний и циклов двоичной системы и условия их изолированности. Специфицированы основные свойства типа достижимости (достижимость, безопасность, одновременная достижимость, достижимость при фазовых ограничениях, притяжение, связность, тотальная достижимость). Для каждого свойства построена его модель в виде булевого ограничения (булева уравнения или квантифицированной булевой формулы), удовлетворяющая логической спецификации свойства и уравнениям динамики системы. Таким образом, проверка выполнимости разнообразных свойств поведения траекторий автономных двоичных динамических систем на конечном интервале времени сведена к решению задачи выполнимости булевых ограничений с использованием современных SAT и TQBF решателей (*авторы: д.т.н. Г.А. Опарин, к.т.н. В.Г. Богданова, А.А. Пашинин*).

Разработаны новые эффективные алгоритмы самоорганизации виртуальных сообществ агентов, выбора их лидеров и распределения ими ресурсов в процессе адаптивного управления заданиями в гетерогенной вычислительной сети (*авторы: к.т.н. А.Г. Феоктистов, к.т.н. С.А. Горский, к.т.н. И.А. Сидоров, Р.О. Костромин*).

Разработаны новые булевы модели и алгоритмы для качественного исследования двоичных динамических систем (*авторы: д.т.н. Г.А. Опарин, к.т.н. В.Г. Богданова, А.А. Пашинин*).

Разработано формальное описание грамматики языка позитивно-образованных формул (ПОФ) как языка для логического программирования. В отличие от формального математического описания исчисления данный язык хорошо приспособлен для программирования на компьютере. Введены удобные конструкции описания формулы, в частности, обеспечивающие возможность декларировать формулы и термы с последующим



использованием ссылок на них. Кроме того, в грамматике учтены ограничения, которые позволяют использовать исчисление ПОФ для реализации в виде системы логического программирования (авторы: А.В. Давыдов, А.А. Ларионов).

Разработан динамический планировщик длительных миссий для группы разнородных подводных роботов (АНПА). Предложенный планировщик осуществляет управление ротацией роботов с целью обеспечить непрерывное выполнение миссии при минимальных потерях производительности группы вследствие ухода на подзарядку отдельных аппаратов. Искомое расписание рабочих циклов АНПА должно исключать одновременную зарядку большого количества аппаратов и порождать рациональную последовательность групповых сборов. В отличие от существующих подходов необходимость подзарядки здесь не является лишь дополнительным ограничением к классической задаче групповой маршрутизации, а решается на отдельном уровне, что позволяет добиться регулярности сборов группы, а также понижения размерности задачи планирования на более низком уровне.

Разработана модификация генетического алгоритма, обеспечивающая быстрое и надежное планирование эффективных расписаний ротации группы, их масштабируемость и оперативную корректировку в случае возникновения непредвиденных событий. Используется оригинальная схема кодирования решения, позволяющая значительно понизить размерность задачи и вычислительно-временные затраты на поиск ее решения. (авторы: М.Ю. Кензин, ак. И.В. Бычков, к.т.н. Н.Н. Максимкин).



Рис. 15. Построенное групповое расписание рабочих циклов четырех разнородных АНПА: выделенные цветом отрезки – периоды выходов АНПА из группы для подзарядки батарей; вертикальные линии – точки сбора действующей группы с целью обновления состава

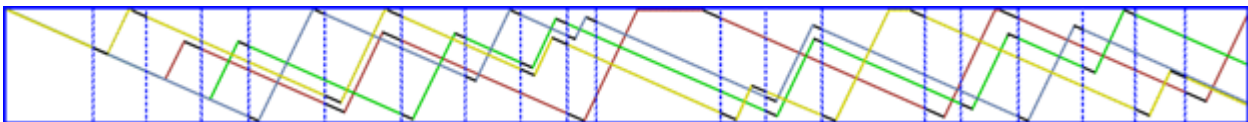


Рис. 16. График уровня заряда батарей АНПА в ходе миссии согласно расписанию на рис. 15 (черным выделены те отрезки времени, которые аппараты тратят на перемещение до зарядной док-станции и на возвращение после подзарядки обратно в группу)

Рассмотрена проблема вычислительной сложности решения задач теории супервизорного управления дискретно-событийными системами (ДСС), в том числе связанных с децентрализацией и модульностью управления, а также частичным наблюдением событий. Децентрализованное супервизорное управление реализуется набором автоматов, каждый из которых наблюдает часть поведения системы и управляет лишь подмножеством всех управляемых событий системы. Модульная структура подразумевает блочное строение как системы, так и спецификации, описывающей требования на поведение ДСС. Для некоторых популярных способов построения абстракций автоматов, задействованных в построении супервизорного управления, получены условия сохранения свойства ко-наблюдаемости языка спецификации. Наравне с управляемостью ко-наблюдаемость является одним из условий существования децентрализованного



супервизора, поэтому требует проверки каждый раз при изменении спецификации. Известные полиномиальные алгоритмы проверки ко-наблюдаемости существенным образом зависят от размерности автоматов, порождающих рассматриваемые языки, поэтому применение абстракций в этом случае представляется полезным. Поскольку проверка неконфликтности локальных супервизоров, реализующих модульную спецификацию, сводится к проверке свойства неблокируемости, получены условия сохранения неблокирования при построении модульного супервизора ДСС. Для исследования использован оригинальный метод логико-алгебраических уравнений (автор: к.ф.-м.н. Н.В. Нагул).

Разработаны алгоритмы управления группировкой автономных подводных роботов, обеспечивающие движение по заданному криволинейному пути с сохранением желаемой геометрической конфигурации при наличии навигационных ошибок, неопределенности параметров роботов и ограничений на ресурсы управления. Для управления группировкой используется подход на основе схемы «лидер-ведомый». Задача лидера группировки следовать вдоль заданной траектории, а остальные роботы как ведомые, ориентируясь на своих лидеров, должны удерживать заданную конфигурацию в процессе движения. Общая алгоритмическая схема включает а) законы управления виртуальной целью, которая как материальная точка перемещается вдоль заданной траектории, б) законы управления лидером группы, призванные отслеживать движение виртуальной цели, в) законы управления остальными роботами как ведомыми. Законы управления виртуальной целью, а, следовательно, и группы в целом, строятся таким образом, чтобы скорость движения цели корректировалась в зависимости от текущего значения показателя кривизны кривой: чем выше этот показатель, тем меньше должна быть скорость движения группы. Синтез параметров в предложенных алгоритмах управления выполнен с использованием технологии для строгого анализа и синтеза нелинейных цифровых систем управления. Параметры синтезированы с учетом изменчивости скорости движения группы, ошибок измерений, а также ограничений на ресурсы управления. Результаты численного моделирования подтвердили высокое качество предложенных алгоритмов (авторы: к.т.н. С.А. Ульянов, к.т.н. Н.Н. Максимкин, К.В. Беденко).

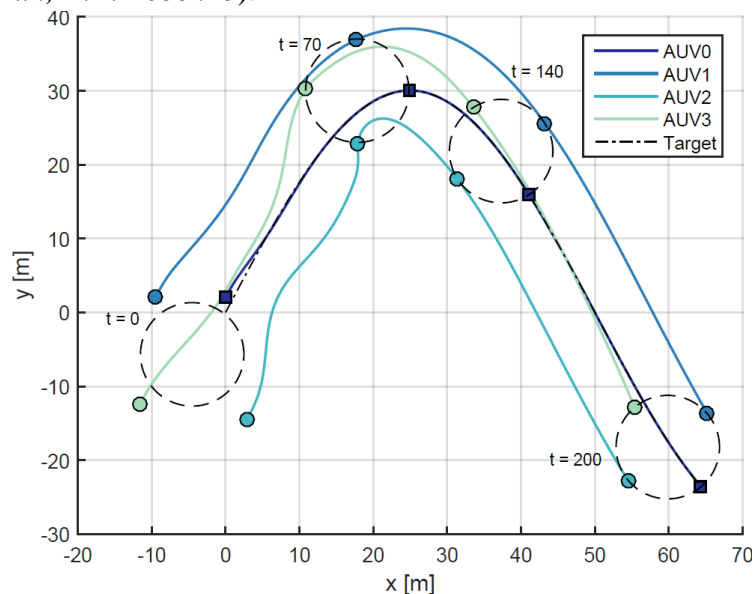


Рис. 17. Траектории АПР при движении вдоль заданного пути

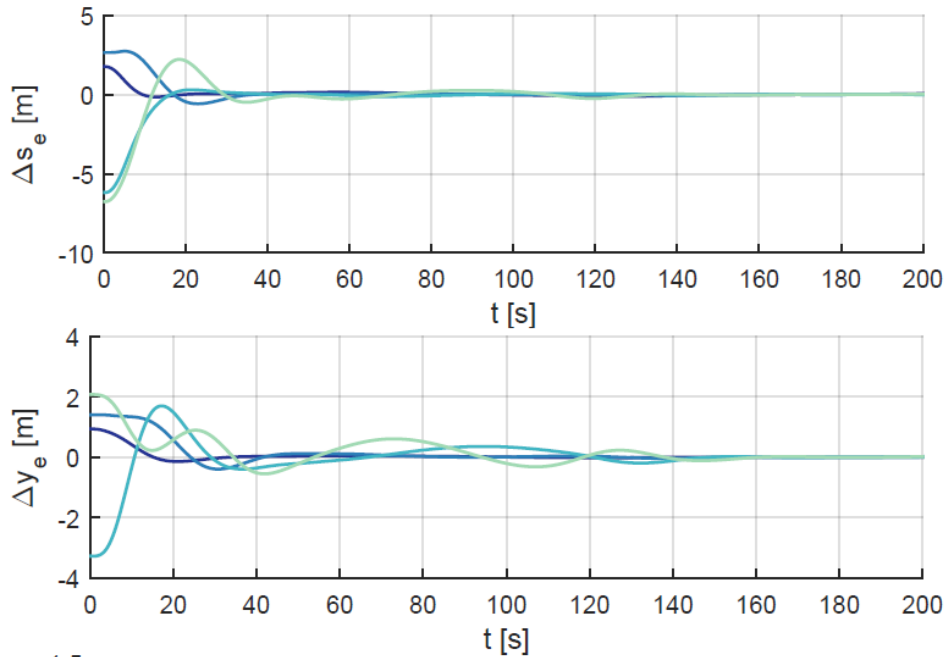


Рис. 18. Ошибки стабилизации АПР в формации

Разработаны эффективные способы стабилизации положения равновесия нелинейных механических систем, описываемых уравнениями Лагранжа второго рода, при измерении только части обобщенных координат и без построения наблюдателя для полного вектора состояния (автор: А.А. Косов).

Улучшен ранее разработанный алгоритм генерации рельефа с использованием метода «масок» на основе шума Перлина. Предложен и реализован метод формирования реалистичного рельефа морского дна, включающий четыре этапа. Первым этапом является создание основы – песчаного или глинистого дна, на котором в дальнейшем размещаются другие типы рельефа и объекты. Далее следуют этапы создания «больших» (100–400 м), «средних» (30–100 м) и «малых» (1–30 м) возвышенностей, чьи размеры классифицированы по удобству использования и генерации. Для данных этапов создания рельефа разработан и реализован графический пользовательский интерфейс (рис. 19), который позволяет:

- задавать размеры рельефа;
- выбирать текстуру основы и каждого типа возвышенностей;
- настраивать максимальную высоту холмов песка и других типов рельефа;
- настраивать масштаб шума Перлина для базового слоя каждого этапа генерации;
- определять уровень детализации этапа (количество слоев шума Перлина);
- задавать зернистость гор.

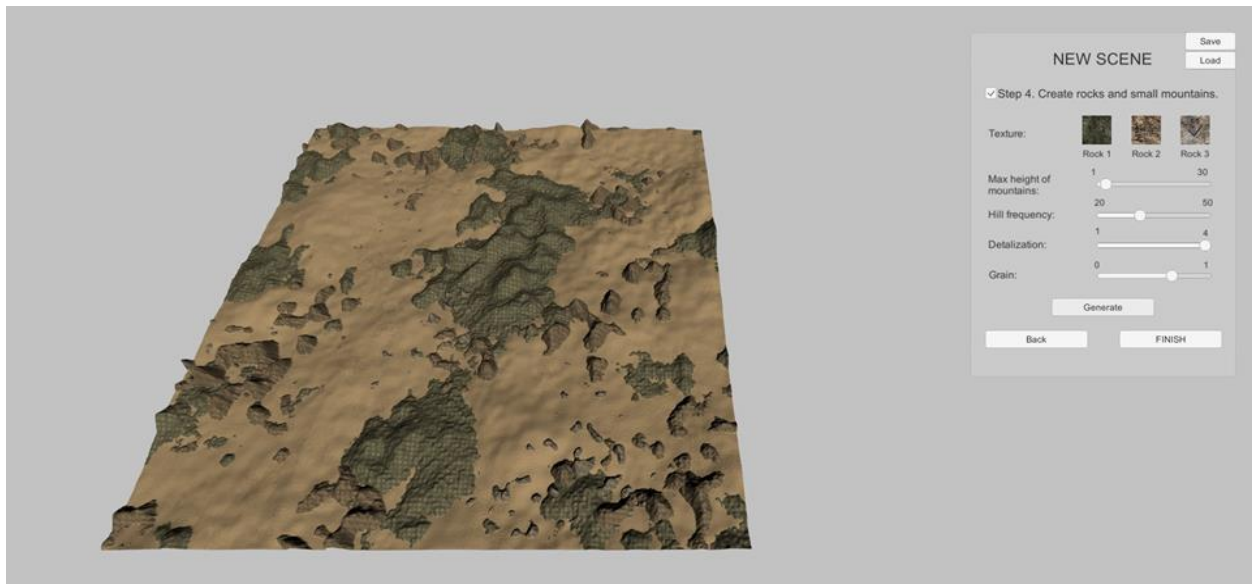


Рис. 19. Интерфейс подсистемы генерации рельефа: настройки этапа создания «малых» гор

Кроме этого, реализован подход к генерации карты высот рельефа на основе фрактального алгоритма «*diamond-square*» и предложена его модификация, которая позволяет генерировать квадратные зоны рельефа размером $2^n \times 2^n$ м² (где n – целое) на уже созданном рельефе по значениям на границах зоны генерации, что обеспечивает бесшовное встраивание новой части рельефа. Для зоны генерации задаются ее центр, диаметр и параметры модифицированного алгоритма «*diamond-square*»: случайное смещение высоты в точке, масштаб, множитель высоты и булева переменная, отвечающая за возможность генерации равнин.

В рамках подсистемы моделирования подводной среды также рассматривается задача генерации подводных течений согласно полученному рельефу. Предлагается использовать подход, основанный на алгоритме поиска пути для водного потока на квадратной регулярной сетке. Генерация течений проходит в три этапа: 1) создание бинарного поля проходимостей по карте высот рельефа; 2) размещение «источника» течения и использование алгоритма фронта волны (*wave front algorithm*) для заполнения поля «стоимостей»; 3) генерация векторов поля течения на основе вычисленных стоимостей. Реализовано расширение данного алгоритма на трехмерный случай, а также предложен ряд модификаций для этого случая. Перенос источника за пределы видимой карты позволил избавиться от точки «стягивания» всех объектов, плывущих по течению. Использование при вычислении стоимости ячейки случайного выбора смежных с ней ячеек и нахождение взвешенной суммы стоимостей этих ячеек с использованием случайного выбора весовых коэффициентов из диапазона 0 до 1 разнообразили поле течений. Обработка ячеек, смежных с непроходимыми, улучшила визуальную составляющую процесса огибания препятствия течением (автор: К.В. Беденко).

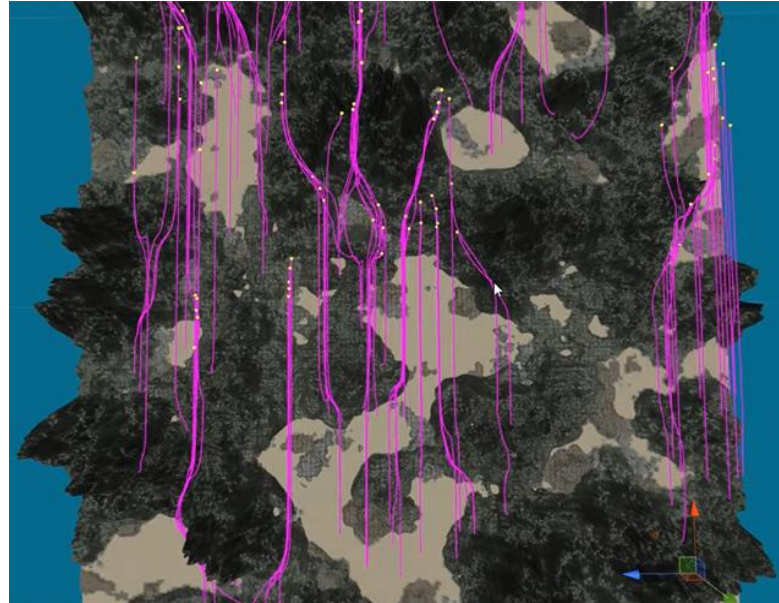


Рис. 20. Шлейфы движения объектов (желтых сфер), плывущих по течению
(вид на рельеф сверху)

Для реализация поиска местоположения АНПА на основе смоделированных снимков гидролокатора бокового обзора (ГБО) в ранее разработанную модель ГБО для виртуального имитационного моделирующего комплекса добавлен модуль автоматического сравнения получаемого изображения с глобальной картой. Для нахождения ключевых точек и их сравнения использовалась реализация алгоритма компьютерного зрения SIFT. Были проведены тесты с алгоритмом SURF, однако, несмотря на более высокую скорость работы, было принято решение отказаться от данной модификации оригинального алгоритма, так как его точность и стабильность не удовлетворяли заданным требованиям (автор: Д.А. Костылев).

```
C:\WINDOWS\system32\cmd.exe
D:\_Denis\geo_app\py>find.py ../Maps/map_obs_fwd_fov120_res100_resized.png
../Maps/scan_obs_boat_fov90_res50_resized.png 148.4 236
libpng warning: iCCP: known incorrect sRGB profile
libpng warning: iCCP: known incorrect sRGB profile
(TIME) Imgs read, out image created and colors converted in 24ms
(TIME) Keypoints found in 941ms
(TIME) Matches found in 1388ms
(TIME) Homography found in 1ms
(TIME) Whole program execution 2357ms
=====
Found coordinates:
(125.0, 232.0)
Expected coordinates:
(148.4, 236.0)
Error:
(-23.4, -4.0). Distance: 23.73941869549463
D:\_Denis\geo_app\py>
```

Рис. 21. Результат работы программы с указанием времени выполнения каждого этапа
Модуль производит поиск местоположения в три этапа:



1. нахождение ключевых точек на всех изображениях;
2. сравнение найденных ключевых точек и выбор точек, наиболее схожих между собой;
3. поиск гомографии.

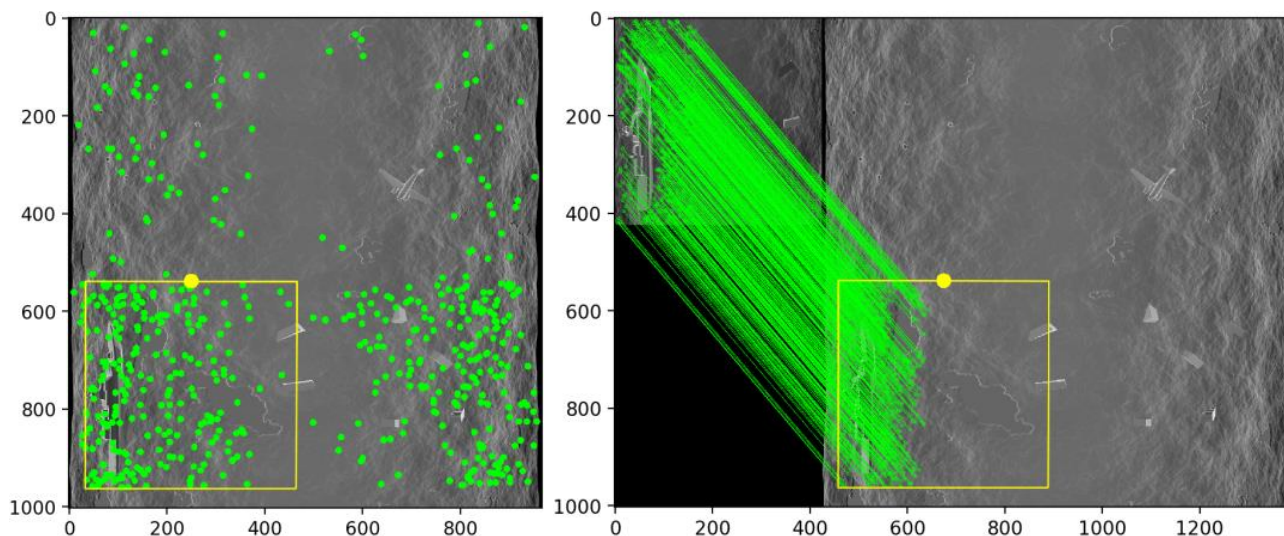


Рис. 22. Визуализация работы программы

В рамках разработки серверной части имитационного стенда (программно-аппаратного комплекса) на базе Lego EV3 для тестирования и отработки алгоритмов управления группировкой роботов проведена отладка и тестирование программного обеспечения. В отчетном году основное внимание было уделено созданию программной части, включающей серверное приложение, клиентскую часть робота Lego EV3 и виртуального робота.

Серверная часть осуществляет следующие сервисные функции:

- обмен сообщениями;
- управление миссиями;
- сбор и хранение отладочной информации;
- обеспечение точной информации о положении роботов.

Взаимодействие между отдельными частями программного комплекса осуществляется исключительно через сервис сообщений. Сервис сообщений позволяет участникам миссии обмениваться пакетами данных, которые включают в себя непосредственно передаваемую информацию, а также метаданные, такие как время отправки и получения, источник, получатель, тип сообщения. Обработка сообщений основана на системе коллбэков (событийно-ориентированный подход): при получении сообщения, открытии соединения, ошибках и т.п. вызываются функции, которые «подписаны» на данный тип события. Среднее время передачи сообщения между отдельными компонентами системы составляет около 40 мс (автор: Д.А. Костылев).

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), осуществляющий поиск траекторий движения роботов таким образом, чтобы выявить области физического поля с предельными значениями его характеристики. При этом связь внутри группы сохраняется на протяжении всей миссии, а время ее выполнения сокращается по сравнению с общепринятым методом поиска галсами. Для выхода из локальных



минимумов используется набор мнимых областей-аттракторов, вес которых динамически уточняется в процессе проведения замеров в их окрестностях.

По сравнению с предшествующим исследованием было значительно снижено время решения задачи (на 20% относительно предыдущей версии алгоритма и на 50% относительно метода обследования галсами). Это было достигнуто за счет решения частного случая задачи о размещении. Предложенный алгоритм (Swapping) позволяет быстро получить приближенное решение, достаточное для значительного ускорения выполнения миссии. Кроме того, были предложены модификации критерия останова оригинального GWO-алгоритма, позволяющие увеличить точность найденного решения.

Результаты моделирования миссии по обследованию физического поля представлены на рис. 23 (авторы: А.А. Толстихин, М.Ю. Кензин).

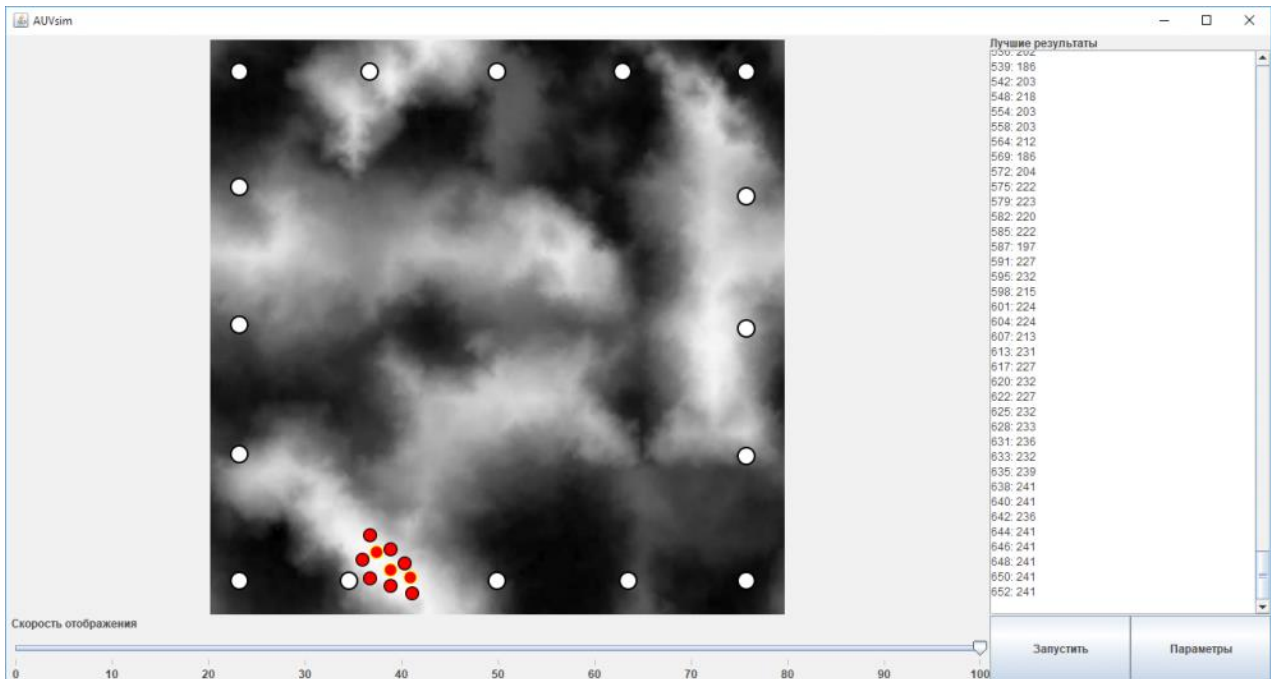


Рис. 23. Результат моделирования обследовательской миссии (белые области – мнимые области-аттракторы, красные – АНПА, красные с желтой кромкой - лидеры на данной итерации)

Разработаны 2 подхода к идентификации и определению положения робота на стенде: поиск по цветовой метке и поиск по ключевым особенностям изображения.

Первый подход отличается высокой скоростью работы и стабильностью определения координат роботов. Тем не менее его недостатками являются слабая устойчивость к изменениям освещения и необходимость проведения предварительной ручной настройки перед каждым использованием. Несмотря на высокую точность определения координат, текущая реализация первого подхода в виде программного модуля не способна определять ориентацию робота в пространстве. На рис. 24 представлен пример работы данного модуля.

Второй подход использует метод Виолы-Джонса для быстрого определения областей изображения, в которых находятся роботы. После этого применяется алгоритм компьютерного зрения AKAZE для поиска и инвариантного описания ключевых точек метки, расположенной на роботе, и сравнение с набором данных об образе метки, хранящемся в базе. Данный подход позволяет с высокой точностью идентифицировать роботов и определять их положение в пространстве. Тем не менее данный алгоритм имеет



высокую трудоемкость, из-за чего наблюдается высокая задержка получения результатов (порядка 500 мс) (автор: А.А. Толстихин).

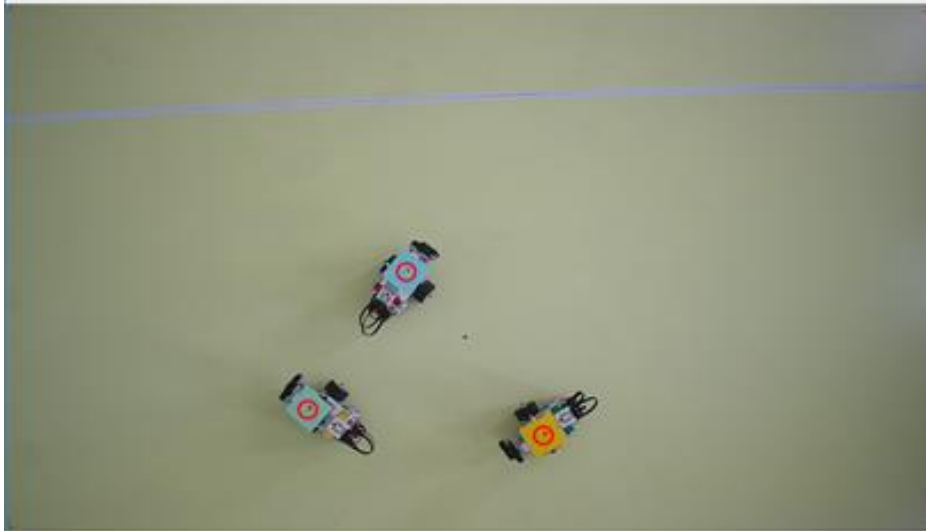


Рис. 24. Результат поиска роботов по цветовым меткам

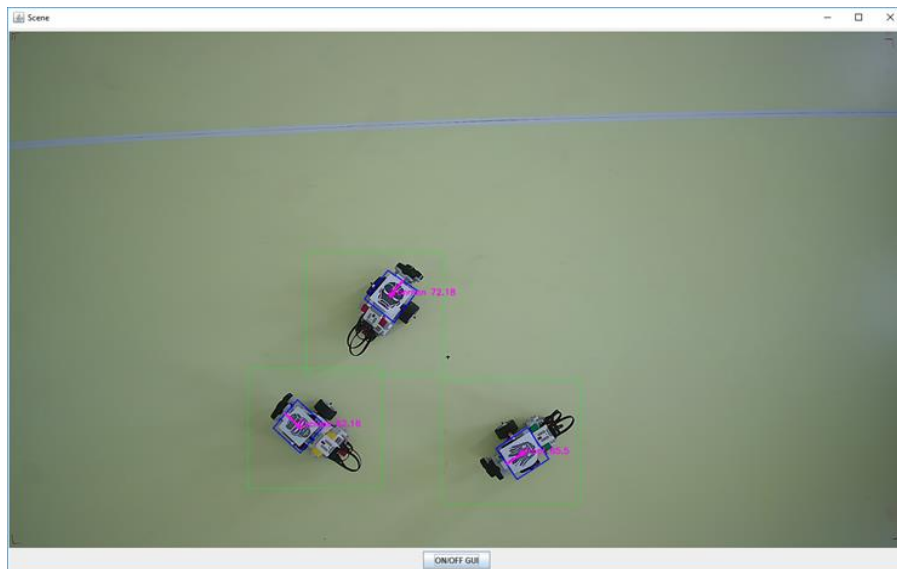


Рис. 25. Результат поиска роботов по ключевым особенностям изображения



Тема IV.38.2.3. 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

1. Языковые и инструментальные средства спецификации поддержки технологий создания кроссплатформенных проблемно-ориентированных систем, доступа к междисциплинарным данным, анализа и структурирования потоков управления программного кода.

Предложены новые языковые и инструментальные средства спецификации для поддержки разнообразных технологий доступа к междисциплинарным данным, создания кроссплатформенных проблемно-ориентированных систем, анализа и структурирования потоков управления программного кода. На предыдущем этапе проекта основные фрагменты кода, различающиеся в зависимости от выбранной технологии доступа к данным, были систематизированы и реализованы в виде виртуальных методов классов – потомков абстрактного базового класса TBaseDAT (DAT, Data Access Technology – технология доступа к данным, далее ТДД).

Для того чтобы не 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.

В некоторых случаях неудобно создавать классы-потомки в зависимости от ТДД, в основном это касается классов визуальных форм. Так, если в приложении используется одна общая форма для отображения содержимого БД при разработке спецификации, то хочется иметь возможность изменения ее поведения в зависимости от выбора ТДД. Для этих целей используются специальные классы – вариаторы поведения. При этом таблица вариаторов создается у модифицируемого объекта, и в зависимости от выбранной ТДД используется один из этих вариаторов.

С использованием предложенного подхода реализован модуль FdacDAT и ряд других модулей, предназначенных для поддержки работы с данными с использованием библиотеки доступа к данным FireDAC, которая является основной для разработки мультиплатформенных приложений в последних версиях Delphi, ее использование позволяет в перспективе разработать версии программ для мобильных устройств. Полнофункциональная поддержка всех возможностей приложений БД с использованием библиотеки потребовала существенной доработки кода по сравнению с экспериментальным



**Отчет Института динамики систем и теории управления
имени В.М. Матросова СО РАН за 2018 г.**

вариантом приложения, реализованного на предыдущем этапе.

Выполненные исследования расширяют возможности развиваемого в ИДСТУ СО РАН оригинального подхода, обеспечивающего максимально возможное ускорение разработки приложений баз данных за счет использования спецификаций структуры приложений БД, содержащих необходимый минимум информации о задаче, требующейся для создания такого приложения.

В ходе реализации проекта исследованы вопросы реализации пользовательского интерфейса с использованием различных библиотек компонентов (VCL, FireMonkey, LCL). Все имеющиеся инструменты позволяют выполнять лишь одностороннюю миграцию кода, т.е. по сути требуют отказаться от ранее использовавшейся IDE. Предложен оригинальный подход, позволяющий максимально разделить логику работы формы (в основном не зависящую от библиотеки компонентов) и описание пользовательского интерфейса таким образом, чтобы разработку можно было продолжать в любой из существующих IDE, а затем распространять сделанные изменения на другие версии пользовательского интерфейса. Реализован инструмент VCLtoMUI, позволяющий автоматизировать такое разделение кода для форм, разработанных с использованием библиотеки VCL (*авторы: к.т.н. А.Е. Хмельнов, к.т.н. Е.С. Ферреферов*).

Разработан алгоритм геокодирования объектов из записей БД и привязки их к пространственным объектам с использованием предварительной обработки данных, эвристического анализа и приближенных методов сопоставления строк. Разрабатываемые в данном разделе проекта алгоритмы ориентированы на работу с существующими БД без изменения их структуры. При этом во многих БД информация об адресах представлена в ненормализованном виде: некоторые поля БД могут содержать несколько составляющих адреса и в том числе весь адрес может быть представлен одним полем без деления на составляющие. Поля адреса могут содержать ошибки, опечатки, сокращения и пропуски некоторых элементов адреса, поэтому для поиска наиболее подходящего адреса используются алгоритмы приближенного поиска.

Для применения алгоритма привязки адреса необходимая информация адресного справочника представляется в специальном иерархическом виде. Отдельные элементы адресов: субъекты федерации, города, районы, микрорайоны, улицы, дома и квартиры могут выступать в качестве объектов классификации и, соответственно, могут быть представлены в виде узлов структурированного дерева. Поскольку некоторые элементы адреса, например, наименования районов и микрорайонов, являются необязательными и могут пропускаться в строке адреса, алгоритм поиска в дереве адресных элементов должен учитывать эту возможность и при необходимости обходить подчиненные узлы более низкого уровня, минуя несколько промежуточных уровней. Также могут пропускаться типы элементов адреса. При наличии ошибок и опечаток выполняется поиск с возвратами в дереве элементов адреса с запоминанием путей, минимизирующих общую оценку отклонения найденного адреса от заданного. Разработанный алгоритм может быть использован в задачах геокодирования информации базы данных, нормализации почтовых адресов, в обработке массивов данных, содержащих адресную информацию, а также в информационных поисковых системах. Алгоритм апробирован и внедрен в геоинформационной системе «ГИС Инвестор



г. Иркутска» (авторы: к.т.н. А.С. Гаченко, к.т.н. А.Е. Хмельнов).

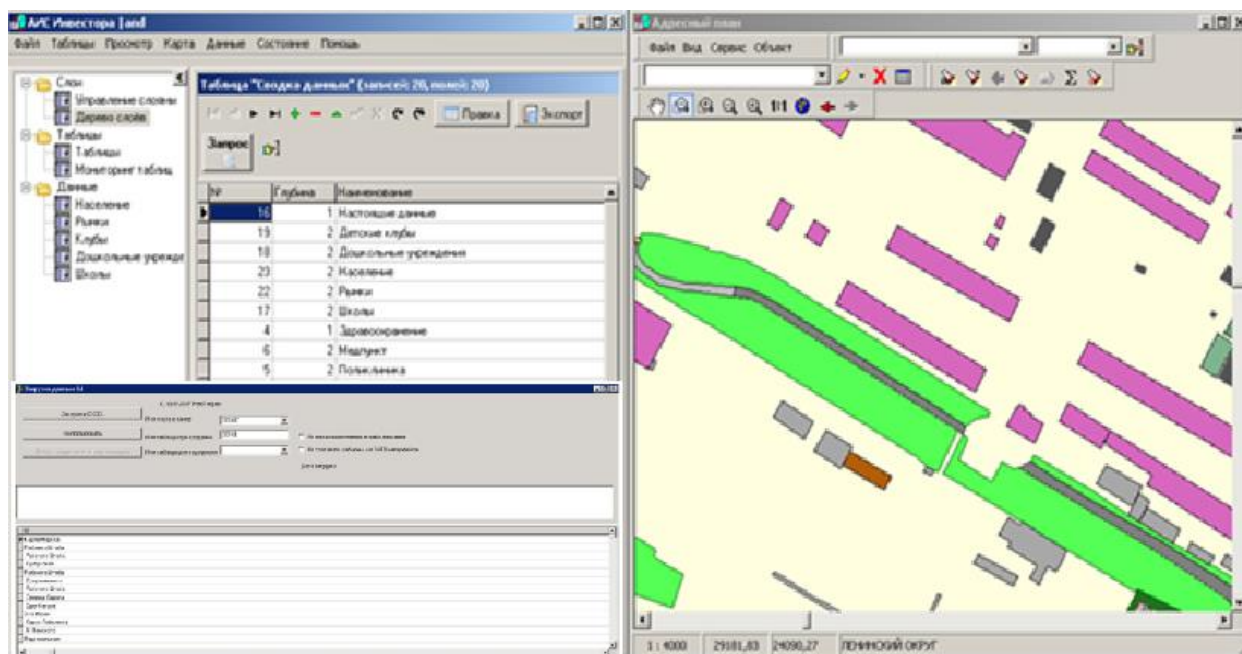


Рис. 26. Механизм автоматической привязки объектов недвижимости к адресному плану г. Иркутска в «ГИС Инвестор г. Иркутска»

Для анализа структуры потоков управления реализован алгоритм определения и визуализации уровней вложенности частей дизассемблированного кода (с точки зрения принципов структурного программирования). Алгоритм основан на вычислении доминаторов и постдоминаторов узлов графа потоков управления каждой подпрограммы. В результате выявляется структура дизассемблированного программного кода, которая отображается традиционным для структурного программирования способом: с использованием отступов. Алгоритм может работать с графами, которые не поддаются полному структурированию, и позволяет лучше понять организацию анализируемого кода, чем традиционные методы его отображения. Выявленную структуру кода предполагается далее использовать для восстановления управляющих конструкций исходного языка программирования.

Разработан метод визуализации графа потоков управления, позволяющий анализировать сложные графовые представления программ, полученные после обработки исходного кода компилятором либо в процессе декомпиляции исполняемого кода. Метод основан на выделении в управляющем графе регионов с одним входным и одним выходным узлом с последующей их заменой на абстрактные узлы. Таким образом, в результате выполнения семантически эквивалентных преобразований исходный граф сворачивается в один абстрактный узел, содержащий в себе иерархию выделенных регионов, каждому из которых ставится в соответствие один из predefined шаблонов отображения. В итоге задача визуализации управляющего графа сводится к описанию правил отображения шаблонов.

В сравнении с результатом раскладки, полученным с помощью иерархического алгоритма, на рис. 27 обратная дуга из вершины v7 в вершину v5 выделена специальным образом. Терминальные узлы (v1, v11, v2, v5, v7) выделены специальным образом, в



соответствии с шаблоном их визуализации. Остальные дуги в графе изображены в виде прямых линий без пересечений, что облегчает анализ путей передачи управления в отличие от результатов визуализации, полученных с помощью иерархического раскладчика.

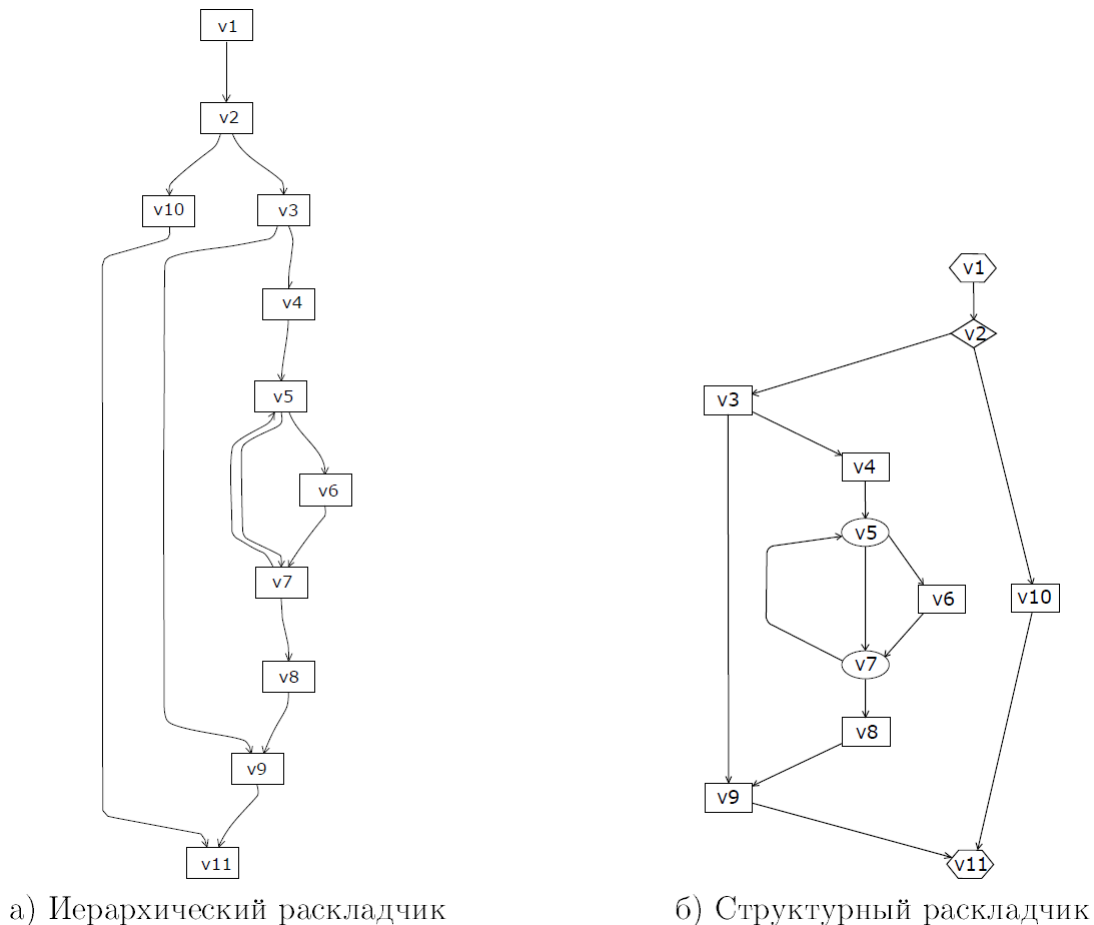


Рис. 27. Результат раскладки управляющего графа

В отличие от известных методов, разработанных для визуализации произвольных ориентированных графов, предложенный метод позволяет выделять в управляющем графе подграфы, соответствующие высокоуровневым операторам языков программирования, что дает возможность использовать изобразительные соглашения, принятые при рисовании блок-схем и получать более понятное представление потоков управления в программном коде (авторы: к.т.н. А.А. Михайлов, к.т.н. А.Е. Хмельнов).

Разработаны методика и средства конвертации моделей предметной области стандартов UML, SysML, BPMN, CMMN из стандартного обменного формата XMI в формат RDF, используемый для определения семантических данных. Для представленных в RDF моделей разработана методика трансформации в модели исходного кода структур данных информационных систем: объекты, представляющие элементы входных (форм) и выходных документов (отчетов). Структуры форм ввода строятся на основе UML-описаний объектов, а структуры отчетов конфигурируются при помощи моделей SysML.

Средства конвертации форматов и трансформации моделей согласно разработанной методике реализуются в виде распределенной системы (рис. 28). Средствами реализации процедур могут выступать любые среды программирования, имеющие возможность делать



HTTP-запросы к сервисам серверов онтологий. При помощи HTTP-запросов осуществляется внесение новых моделей на серверы, а также SPARQL-запросы к этим серверам в процессе трансформации, предоставляющие структурные элементы хранимых моделей. Сервер хранения моделей предметной области предоставляет интерфейс Pengines к подсистеме логического вывода на знаниях, загружаемых с клиентской рабочей станции и представленных в виде правил Prolog. Дополнительная семантическая информация при необходимости запрашивается при помощи SPARQL-запросов к существующим в сети Интернет сервисам онтологий.

Создана реализация методики, основывающаяся на использовании сред программирования Python, Prolog и LogTalk (объектно-ориентированного макропакета ISO Prolog), выработаны рекомендации к применению данных сред в проектировании подсистем информационных систем, в том числе интерфейсов пользователя и структур отчетных документов.

Синтаксические структуры представления объектов макропакета LogTalk исследованы в контексте реализации процедур трансформации. Выделены ключевые подходы к применению различных объектных иерархий (прототипов и классов), а также композиций с применением иерархий категорий для формирования объектно-ориентированного представления процедур (сценариев) трансформации. Приведены примеры лаконичного представления компонент типа «фасад» при помощи параметризованных объектов, статически компилируемых непосредственно в код языка Prolog, при этом накладные расходы на производительность кода не больше 1%. Разработаны структуры данных, представляющих платформонезависимые модели, которые транслируются непосредственно в программный код.

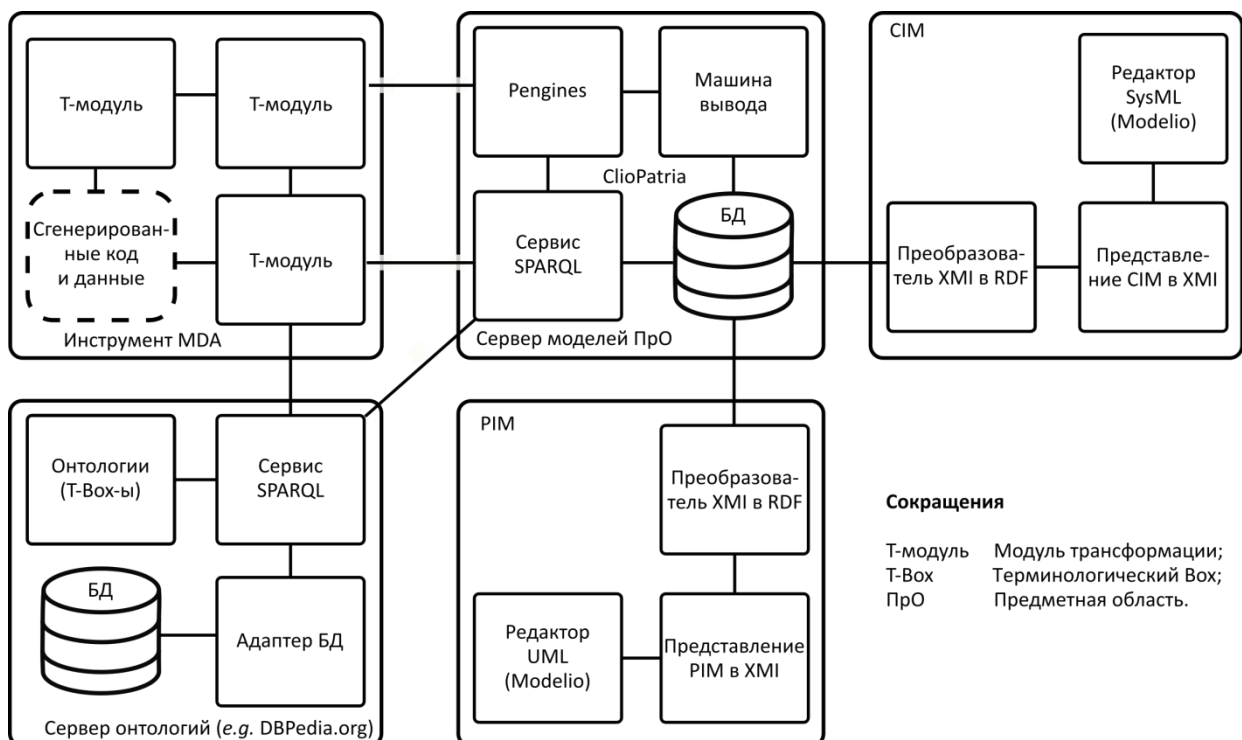


Рис. 28. Архитектура распределенной среды трансформации моделей

Иерархии прототипов используются для представления объектов, создаваемых в



единственном экземпляре. Такие объекты представляют собой (отображают) уже существующие ресурсы, например, RDF-граф исходных данных (элементы платформонезависимой модели архитектуры, управляемой моделированием). Параметризованные объекты также создаются на основе иерархий прототипов. Иерархии классов позволяют реализовывать объекты, которые, как правило, создаются в нескольких экземплярах по одному шаблону, например, блоки кода, представляющие собой элементы платформозависимой модели. Иерархии категорий позволяют создавать наборы методов, объединенных решением одной общей задачи. Категории используются в композиции новых объектов обеих иерархий. На рис. 29 представлен пример исходного кода параметризованного объекта, представляющего собой ресурс доступа к описанию исходной платформозависимой модели. В комментарии показан пример запроса на перечисление методов класса графа `mothur`, класс идентифицируется `ClassID`.

```
:- object(query(_RDF)).
:- protected(xmi/1).
:- public([class/2, attribute/3, method/3]).
xmi(XMI) :- parameter(1, XMI).
class(Name, ID) :- % Распознавание класса в RDF
    ::xmi(XMI),
    XMI::rdf(ID, rdf:type, uml:'Class'),
    XMI::rdf(ID, rdfs:label, literal(Name)).
attribute(Name, ClassID, ID) :- % ...атрибута...
    ::xmi(XMI),
    XMI::graph(G),
    XMI::rdf(ClassID, G:ownedAttribute, ID),
    % XMI::rdf(ID, rdf:type, uml:'Property'),
    XMI::rdf(ID, rdfs:label, literal(Name)).
method(Name, ClassID, ID) :- % ...метода...
    ::xmi(XMI),
    XMI::graph(G),
    XMI::rdf(ClassID, G:ownedOperation, ID),
    XMI::rdf(ID, rdfs:label, literal(Name)).
:- end_object.

% query(mothur)::method(Name,ClassID,MethodID).
```

Рис. 29. Параметризованный объект, инкапсулирующий набор стандартных запросов к платформонезависимой модели

Методика успешно опробована в реализации процедуры синтеза исходного кода Java-модулей визуального представления структуры прикладного пакета `Mothur`. В виде блоков `Rapidminer` представлены 143 процедуры обработки данных прикладным пакетом `Mothur` (рис. 30). Разработанные средства позволяют на следующих этапах исследований в проекте реализовывать генераторы визуального представления для других модулей и вычислительных сред NGS, таких как `QIIME`, `QIIME2`, `Usearch` и др., что позволит решить две важные задачи. Первая – это расширить методический комплекс алгоритмами других прикладных пакетов, вторая – это актуализировать процесс проектирования вычислений на текущее состояние отрасли NGS. Основные преимущества использования логического



программирования в MDA в сравнении с языками ATL – это более широкая распространенность языка, его простая и регулярная структура, возможность использовать любые структуры для представления исходной PIM, а также внешние библиотеки.

Новизна подхода заключается во впервые разработанной методике структурирования знаний при помощи объектно-ориентированного языка LogTalk, позволяющем разрабатывать модели платформ в рамках популярной парадигмы объектно-ориентированного программирования, при этом представляя процесс трансформации моделей MDA в виде логической теории. Кроме того, новым является использование формата RDF для представления исходных данных (моделей CIM, PIM и в перспективе PSM), что позволяет а) представлять исходную модель близко к теоретико-множественному виду, б) глобально стандартизировать обозначения элементов модели (метамодель) (автор: к.т.н. Е.А. Черкашин).

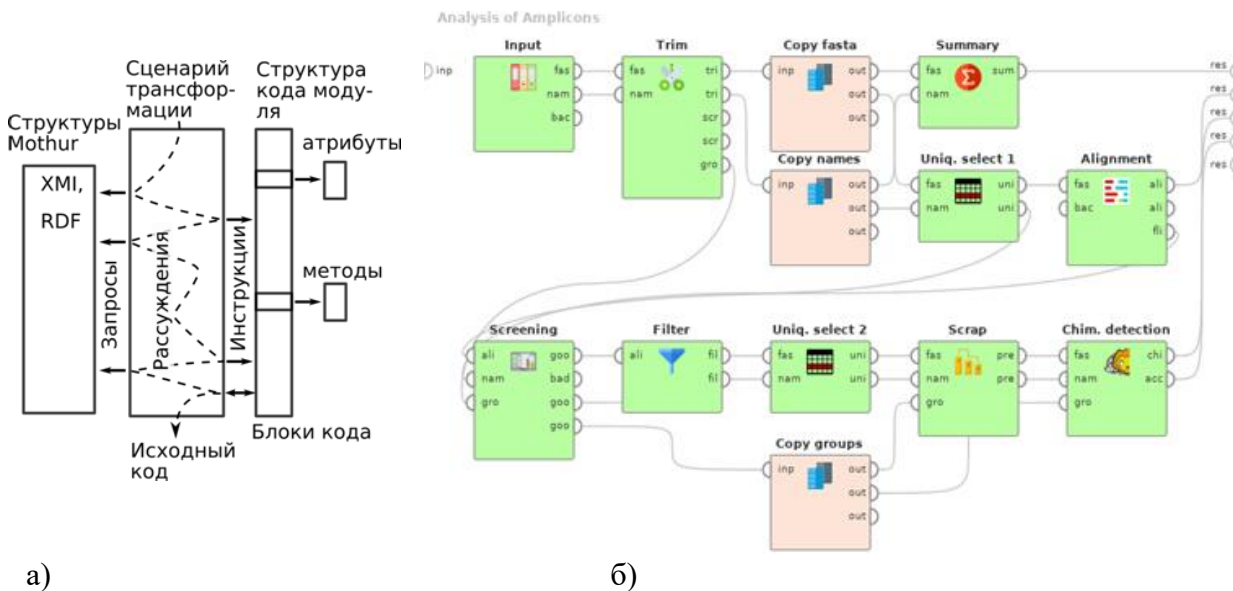


Рис. 30. Общая структура процесса порождения исходного кода модуля (а) на основе данных анализа структуры прикладного пакета Mothur; представление части вычислительного процесса анализа ампликонов (б) в виде визуальной диаграммы Rapidminer

2. Методы поиска сервисов в распределенной сервис-ориентированной среде.

Разработаны методы и технологии поиска сервисов в рамках распределенной сервис-ориентированной среды, в которой применение сервиса должно быть согласовано с данными и средствами отображения данных, которые в свою очередь являются сервисами.

Поиск сервиса сводится к задаче формирования композиции сервисов. Формирование композиции сервисов – комбинаторно сложный процесс, в котором нужно определить решаемую каждым сервисом задачу и согласовать по входным и выходным данным их сочетания. Предлагается проводить поиск на основе заранее сформированной семантической сети сервисов, которая определяет возможные связи сервисов в соответствии с передаваемыми данными, т.е. дуги этой сети задают возможность элементарной композиции – цепочки выполнения из двух сервисов, когда результаты работы одного сервиса могут быть применены в качестве входных данных другого сервиса. Одним из способов формирования семантической сети является использование метаинформации (в том числе структурных спецификаций) и онтологий. Следует отметить, что автоматическое построение



семантической сети является сложной задачей из-за нехватки информации в спецификации сервисов и непроработанности онтологий.

Для получения недостающей информации при построении семантической сети предлагается метод, основанный на анализе статистических данных о применении сервисов пользователями. В системе выполнения сервисов и их композиций ведется сбор данных о произведенных вызовах сервисов. Данные включают название сервиса и его адрес, значения входных и выходных параметров, время выполнения сервисов, успешность выполнения, ошибки выполнения и т.д. Для каждого сервиса известно его расположение, список входных и выходных параметров, типы данных. Введем ниже следующие обозначения, необходимые для описания работы метода:

$s = \langle \text{name}, I, O \rangle$ – сервис, где *name* – это имя сервиса, *I* – множество входных параметров, *O* – множество выходных параметров сервиса. Далее будем обозначать через *s.I* и *s.O* параметры, принадлежащие определенному сервису. Пользовательский вызов сервиса имеет одинаковую структуру: исходные параметры, известные пользователю, и параметры, которые должны быть получены.

$t = \langle VI, VO \rangle$ – вызов сервиса *s* со значениями *VI, VO* параметров *s.I* и *s.O*.

Log – это множество успешных вызовов сервисов, совершенных пользователями. Причиной неудачного вызова сервиса могут быть некорректные значения параметров, поэтому статистические данные фильтруются и оставляются только успешные вызовы.

Построение семантической сети сводится к задаче определения наличия семантической связи между параметрами сервисов (Semantic causal link) *si.O* и *sj.I*.

Множество параметров можно разделить по значениям на передаваемые непосредственно в теле вызова и на передаваемые в виде ссылки файлы. В теле вызова сервиса и его результата могут передаваться и получаться строковые и числовые параметры, по значениям которых довольно сложно определить наличие семантической связи между параметрами сервисов. Параметры, имеющие одинаковое значение, могут иметь разный смысл. По параметрам файла можно точно определить, что файл был передан от одного сервиса другому. Каждый файл однозначно идентифицируется URL, который используется для его загрузки WPS сервисом.

В методе для анализа вызовов используется следующий алгоритм построения семантической сети сервисов:

```
Input: Log
Output: list – семантические связи между сервисами
for each  $t_i$  in Log:
    for each  $t_j$  in Log:
        for each  $v_m$  in  $t_i.VO$ :
            for each  $v_n$  in  $t_j.VI$ :
                If (typeof  $v_m = \text{file}$  and typeof  $v_n = \text{file}$  and  $v_m = v_n$ ) then
                    add ( $t_i, t_j$ ) into list
                end if
            end for
        end for
    end for
end for
```

Данный алгоритм проводит поиск сочетания вызовов сервисов, в которых файл, являющийся результатом работы одного сервиса, передается в качестве параметра другому



сервису.

Проведена апробация метода на статистических данных о применении сервисов обработки пространственных данных. Обработка пространственных данных интересна тем, что сервисы часто в качестве входных параметров используют базовые пространственные данные, семантика которых заранее известна. Источники базовых пространственных данных представлены в виде сервисов, у которых присутствуют только исходящие дуги. Представленный метод позволил автоматически сформировать семантическую сеть сервисов обработки пространственных данных. Семантическая сеть позволяет упростить разработку композиции сервисов за счет автоматизации поиска и построения цепочек сервисов по данным. Семантическая связь между двумя сервисами подтверждается работоспособным примером, демонстрирующим передачу данных от одного сервиса другому. Необходимо отметить, что метод семантику всех параметров сервисов не определяет. Но в сочетании с метаданными сервисов дает дополнительную информацию для анализа. В результате работы метода вместе с семантической сетью получаем возможные значения параметров, частотные характеристики использования пользователями сервисов и их композиций, время выполнения сервисов и т.д.

Реализация метода является новым и перспективным направлением исследований по следующим направлениям:

- автоматическое формирование композиции сервисов для типичных операций пользователя;
- определение альтернативных композиций сервисов;
- распознавание семантики параметров сервисов;
- подсказка разработчику возможных значений параметров;
- и т.д.

Апробация метода в области обработки пространственных данных обусловлена тем, что часто используются базовые пространственные данные, семантика которых заранее известна, формируются реляционные данные с пространственными атрибутами, предоставляемые сервисам. Следовательно, в этой области значительная часть семантической сети в той или иной мере определена, что подчеркивает перспективность исследования.

Разработана технология поиска сервисов в рамках распределенной сервис-ориентированной среды, которая состоит из следующих этапов:

- 1) сбор статистических данных о вызовах сервисов и их параметрах;
- 2) построение семантической сети сервисов;
- 3) поиск сервисов на основе семантической сети.

Научная новизна метода заключается в том, что впервые для построения семантической сети применяется анализ статистических данных о применении сервисов пользователями. Преимуществом данного метода является то, что семантическая связь между двумя сервисами подтверждается работоспособным примером, демонстрирующим передачу данных от одного сервиса другому (*авторы: к.т.н. Р.К. Федоров, А.С. Шумилов, к.т.н. А.Ю. Авраменко, А.А. Ветров, к.т.н. А.К. Попова*).

3. Методологическое и инструментальное обеспечение поддержки процессов трансформации неструктурированных данных из произвольных таблиц.



**Отчет Института динамики систем и теории управления
имени В.М. Матросова СО РАН за 2018 г.**

Разработано инструментальное средство поддержки процессов трансформации неструктурированных табличных данных (SSDC, Spreadsheet Data Canonicalization). Инструментальное средство обеспечивает следующие операции: загрузку исходных табличных данных (произвольных электронных таблиц, программ на языке правил DRL (Drools Rule Language), YAML-спецификаций категорий) на сервер; настройку и запуск системы трансформации данных из произвольных электронных таблиц Excel на основе исполнения DRL-программ; генерацию выходных JSON данных (исходную произвольную таблицу, восстановленные семантические отношения, выходную каноническую таблицу); сохранение на сервере выходных данных и предоставление доступа к ним. Инструментальное средство реализовано в виде Java сервлета, размещенного на сервере приложений Apache Tomcat.

Инструментальное средство задействует программную библиотеку Apache POI для загрузки и разбора исходных табличных данных. В результате формируются факты, представляющие компоновочные, стилевые и содержательные свойства ячеек таблиц. Они добавляются в рабочую память системы исполнения правил Drools Expert. Словари категорий, описывающих содержание таблиц, в формате YAML также загружаются в рабочую память как факты. Для синтаксического разбора словарей используется парсер SnakeYAML. Реализованы структуры данных, представляющие факты описания таблиц, в виде POJO классов. Правила анализа и интерпретации таблиц выражаются на языке правил DRL, ориентированном на исполнение в системе Drools Expert. В результате исполнения DRL-правил создаются новые факты, описывающие семантические свойства ячеек таблиц (роли и связи). Из них генерируется каноническая таблица. Инструментальное средство имеет веб-ориентированный пользовательский и клиентский интерфейс, обеспечивающий управление, визуализацию и интерактивную работу с трансформируемыми данными в формате JSON (<http://cells.icc.ru/ssdc>).

Научная новизна заключается в том, что впервые нотация записи фактов свойств ячеек произвольных таблиц, предложенная в рамках развития инструментального средства поддержки процессов трансформации неструктурированных табличных данных, была адаптирована для обеспечения интерпретации табличных документов при создании технологии кросс-контекстного обмена документами с внедренной семантической разметкой (авторы: к.т.н. В.В. Пармонов, к.т.н. А.О. Шугаров).

Объединение данных, получаемых из разных источников, имеющих различную структуру, позволяет проводить их анализ с учетом большего числа критериев. Однако гетерогенные данные могут содержать ошибки: опечатки, орфографические ошибки, ошибки оптического распознавания и т.п. Подобные ошибки являются серьезным препятствием для обработки и интеграции данных. Для устранения таких некорректностей необходимо проводить операции по очистке данных с целью повышения их качества. В исследовании были рассмотрены методы очистки текстовых, включающие комбинацию нечеткого сравнения строк, фонетических алгоритмов.

Выделяют несколько проблем, связанных с необходимостью очистки данных перед проведением процедур консолидации. Это, в частности, обеспечение корректности форматов и представлений данных; уникальность первичных ключей в таблицах базы данных; полнота и целостность данных; полнота связей; соответствие некоторым аналитическим ограничениям и т.д. На данном этапе исследований внимание уделено обеспечению



корректности форматов и представлений данных; уникальности первичных ключей в таблицах базы данных в том случае, если данные для обработки являются текстовыми и, в частности, на русском языке.

Одним из основных классов алгоритмов для определения похожести строк является **нечеткое сравнение строк**. Данный класс алгоритмов позволяет оценить похожесть строк, т.е. минимальное количество операций вставки одного символа, удаления одного символа и замены одного символа на другой, необходимых для превращения одной строки в другую. В настоящее время существует ряд методов нечеткого сравнения строк, отличающихся по быстрдействию, например, алгоритмы Левенштейна и Укконена. При этом ни один из методов не обладает языковой зависимостью и могут быть использованы для обработки текстов на различных языках. Однако для некоторых слов может понадобиться одинаковое число модификаций строки. Например, слово, содержащее ошибку «мук», с одинаковой похожестью может соответствовать названию растений «лук», «бук», «дуб».

Для сужения множества похожих слов предлагается применять **фонетические алгоритмы**, позволяющие оценить похожесть слов на основе их фонетического сходства. Данные алгоритмы используют кодирование слов в зависимости от особенностей произношения текста.

Применение фонетических кодов повышает качество сравнения слов при неправильном или различном написании. В основном фонетические алгоритмы используются для сопоставления фамилий. Представляется также достаточно эффективным использование фонетических алгоритмов для сопоставления пользовательских строк с эталонными значениями из различного рода классификаторов.

Практически все фонетические алгоритмы ориентированы на использование фонетических правил английского языка. Реализованы некоторые модификации алгоритмов, например, для французского, испанского языков. Существуют и другие адаптации фонетических алгоритмов для языков, отличных от английского. Как правило, в этом случае используется транслитерация, а в качестве алгоритма используются вариации Soundex. Транслитерация в большинстве случаев не позволяет учесть особенности фонетики искомого языка. Для обработки строк на русском языке с учетом фонетических особенностей предлагается применять разработанный алгоритм Polyphon.

В данном алгоритме проводится кодирование букв в простые числа. Преобразования последовательностей букв основываются на фонетических правилах русского языка и с учетом основных типов ошибок (морфологических, фонологических, фонетических, традиционных), а также возможной гиперкоррекции при написании слов.

Проведенные исследования также показали, что предложенный алгоритм фонетического кодирования можно использовать для сопоставления слов на монгольском языке. При этом для адаптации требуется изменить преобразования буквенных последовательностей с учетом фонетических правил монгольского языка.

Для монгольского языка можно выделить, что также как и русский язык, он использует кириллические буквы. В обоих языках существуют звуки, похожие друг на друга, например, гласные [а], [о] и согласные [м], [с]. Языки имеют некоторые общие фонетические законы, хотя они не всегда проявляются в каждом из них одинаково. В связи с этим была реализована адаптация Polyphon для монгольского языка.

Пример кодирования некоторых букв монгольского языка приведен в табл. 1, а вариант



кодирования – в табл. 2.

Таблица 1. Замена некоторых букв

Бук вы	А, Е, Ё, И, О, Ө, Ы, Э, Я																		
Результа т	Э	П	Ф	К	Т	С	Ш	Ш	Н	у									

Таблица 2. Кодирование букв

Буква	К	Л	Н	П	Р	С	Т	У	Ф	Х	Ц	Ч	Ш	Э
Код	2	3	5	7	11	13	17	19	23	29	31	37	41	43

При обработке текстов на русском языке фонетические алгоритмы целесообразно использовать для сопоставления слов, представленных в виде имен существительных в именительном падеже. Таким образом, этот метод эффективно использовать для идентификации значений, которые можно сопоставить с классификаторами. Связано это с тем, что русский язык является морфологически богатым, и изменение словоформы может существенно отразиться на фонетическом представлении слова. Однако в монгольском языке нет понятия грамматического рода. Существительное в форме основы может выполнять синтаксические функции подлежащего, определения, дополнения и именной части составного сказуемого. В связи с этим возможности использования фонетических алгоритмов в монгольском языке гораздо шире, чем в русском.

Таким образом, комплексный подход к очистке данных посредством применения алгоритмов нечеткого сравнения строк и фонетических алгоритмов позволяет повысить качество данных.

Представленный в работе подход, в частности, позволил создать инструментальные средства для обработки и загрузки в прототип информационно-аналитической системы (<http://tbd.icc.ru/>) слабоструктурированные данные об активности иксодовых клещей на территории Иркутской области и Республики Бурятия.

Научная новизна работ, проведенных в рамках блока, заключается в том, что методы фонетического кодирования с учетом фонетических особенностей русского и монгольского языка, используемые как часть комплекса процедур по очистке данных, предложены впервые (авторы: к.т.н. А.О. Шигаров, к.т.н. В.В. Парамонов, к.т.н. А.А. Михайлов, В.В. Христюк).

4. Предметно-ориентированный декларативный язык описания трансформаций концептуальных моделей (Transformation Model Representation Language, TMRL).

Предложен алгоритм автоматизированной разработки продукционных баз знаний (БЗ) на основе преобразования авторской нотации диаграмм Исикавы. Алгоритм основан на выделении структурных, причинно-следственных элементов диаграммы и их преобразования в конструкции целевого языка представления знаний – CLIPS.

Постановка задачи состоит в следующем: необходимо определить оператор преобразования концептуальной модели



**Отчет Института динамики систем и теории управления
имени В.М. Матросова СО РАН за 2018 г.**

$$T : CM^{FD} \rightarrow KB,$$

где CM^{FD} – исходная концептуальная модель (диаграмма Исикавы); KB – целевая БЗ, при этом $KB = \langle Code^{CLIPS} \rangle$. Уточним оператор преобразований

$$T = \langle T_{CM-RM}, T_{RM-KB} \rangle,$$
$$T_{CM-RM} : M_{XML}^{FD} \rightarrow M^{PR}, \quad T_{RM-KB} : M^{PR} \rightarrow Code^{CLIPS},$$

где T_{CM-RM} – оператор преобразования диаграммы Исикавы в модель продукций; T_{RM-KB} – оператор преобразования модели продукций в код БЗ на ЯПЗ CLIPS; M_{XML}^{FD} – представление диаграммы Исикавы в XML-формате; M^{PR} – представление полученных знаний в виде модели продукций; $Code^{CLIPS}$ – код БЗ на ЯПЗ CLIPS.

В рамках предложенного алгоритма разработаны исходная метамодель диаграммы Исикавы, расширенная метамодель диаграммы Исикавы для определения механизма деградационного процесса, целевая метамодель для унифицированного представления правил (модель продукций), оператор трансформации, основные этапы создания программного компонента (модуля) трансформации, а также методика преобразования диаграммы Исикавы с использованием созданного программного компонента.

Новизной алгоритма является применение принципов модельно-управляемого подхода для создания продукционных экспертных систем на основе диаграмм Исикавы.

Апробация и оценка достоверности алгоритма выполнена на примере автоматизированного создания продукционной базы знаний для диагностирования и прогнозирования деградационных процессов, обуславливающих состояние механических систем (авторы: д.т.н. А.Ф. Берман, к.т.н. Н.О. Дородных, д.т.н. О.А. Николайчук, к.т.н. А.Ю. Юрин).

Предложен алгоритм автоматизированной разработки продукционных БЗ для проблемно-ориентированных систем анализа риска опасных технических объектов. Алгоритм основан на анализе структурных элементов деревьев отказов, расширенных конструкциями механизма процесса и кинетики, и их преобразования в конструкции целевого языка представления знаний CLIPS.

Постановка задачи состоит в следующем: необходимо определить оператор преобразования концептуальной модели

$$T : CM^{FT} \rightarrow KB,$$

где CM^{FT} – исходная концептуальная модель ДО (дерево отказов); KB – целевая БЗ, при этом $KB = \langle Code^{CLIPS} \rangle$. Уточним оператор преобразования:

$$T = \langle T_{CM-RM}, T_{RM-KB} \rangle, \quad T_{CM-RM} : M_{XML}^{FT} \rightarrow M^{PR}, \quad T_{RM-KB} : M^{PR} \rightarrow Code^{CLIPS},$$

где T_{CM-RM} – оператор преобразования ДО в модель продукций; T_{RM-KB} – оператор модели продукций в код БЗ на ЯПЗ CLIPS; M_{XML}^{FT} – представление расширенной модели ДО в XML-формате; M^{PR} – представление полученных знаний в виде модели продукций; $Code^{CLIPS}$ – код БЗ на ЯПЗ CLIPS.

В рамках предложенного алгоритма разработаны исходная метамодель дерева отказов (рис. 31), оператор трансформации, основные этапы создания программного компонента



(модуля) трансформации, а также методика преобразования дерева отказов с использованием созданного программного компонента.

Новизной алгоритма является применение принципов модельно-управляемого подхода для создания продукционных экспертных систем на основе деревьев отказов.

Предложенный метод позволяет, с одной стороны, избежать ошибок программирования на этапе формализации знаний за счет автоматической кодогенерации, а также сократить время, затрачиваемое на разработку БЗ, с другой – приблизить специалистов-предметников к непосредственной разработке интеллектуальных компонентов проблемно-ориентированных программных систем, позволяя им создавать программный код, оперируя понятными предметно-ориентированными моделями.

Апробация и оценка достоверности алгоритма выполнена на примере автоматизированного создания продукционной базы знаний для диагностирования и прогнозирования деградационных процессов, обуславливающих состояние механических систем (авторы: д.т.н. А.Ф. Берман, к.т.н. Н.О. Дородных, д.т.н. О.А. Николайчук, к.т.н. А.Ю. Юрин).

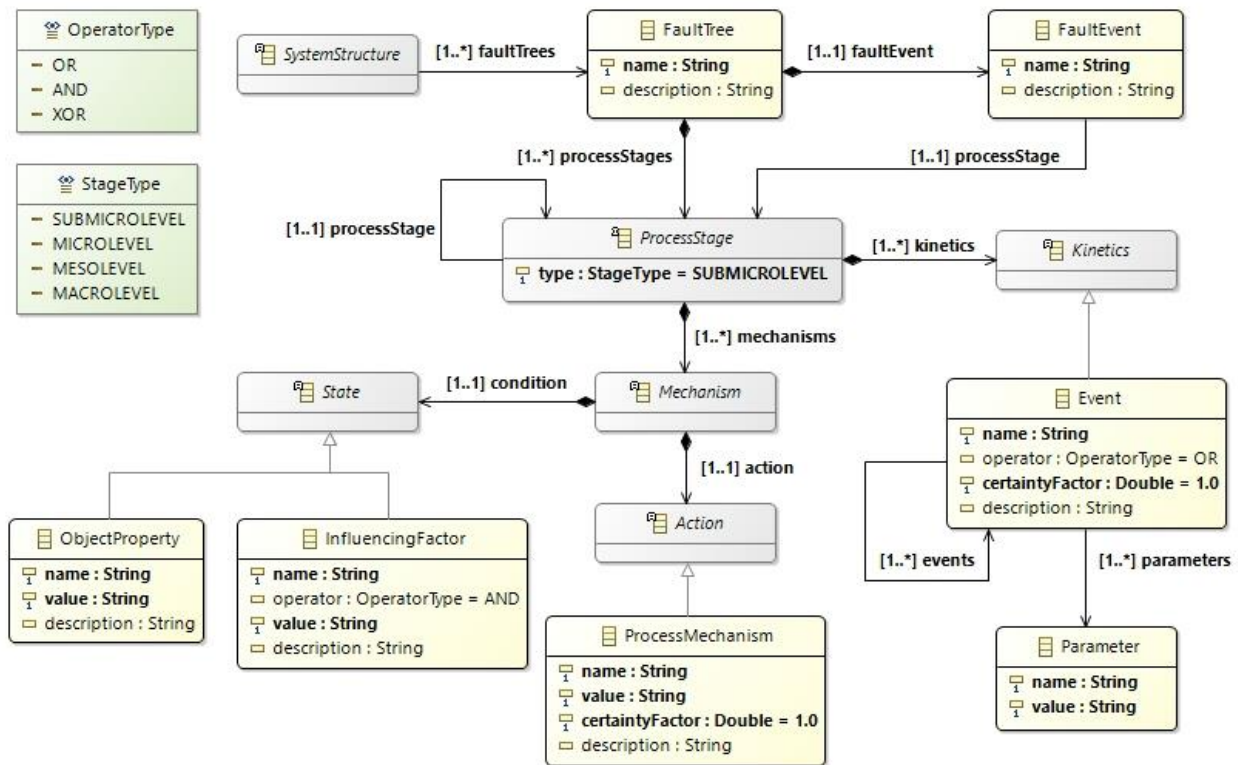


Рис. 31. Метамоделерасширенной модели дерева отказов

Предложена модель онтологии, позволяющая описывать мультидисциплинарную информацию о рассматриваемой задаче, в том числе методы и средства ее решения. Модель основана на иерархии онтологий предметной и проблемной областей, онтологии представления и онтологии верхнего уровня. Онтологии верхнего уровня содержат описание моделей объекта исследования, дисциплины и методов исследования. Содержание этих онтологий определяется следующими основными факторами: информационное пространство классифицируется по мультидисциплинарным информационным аспектам (аспекты исследования), классам состояний объекта, соответствующим задачам, а также дисциплинам,



к которым принадлежат задачи. В свою очередь компоненты задачи, закономерности предметной области и методы также определяются информационными структурами онтологии.

Новизна модели обусловлена тем, что модель обеспечивает представление разнородной, по степени формализации, информации о решаемой проблеме; независимость представления данных и знаний от методов их обработки; коллективность разработки информационного пространства; возможность применения модельно-ориентированного подхода при разработке приложений.

Апробация модели осуществлена при создании онтологии для решения задач управления безопасностью сложных технических систем в рамках разработки прототипов системы автоматизации исследований и агентной системы имитационного моделирования. В настоящее время разработана иерархия междисциплинарных задач управления безопасностью сложных технических систем, отражающая соответствующую структуру онтологии (рис. 32) (авторы: д.т.н. А.Ф. Берман, к.т.н. А.И. Павлов, д.т.н. О.А. Николайчук, к.т.н. А.Ю. Юрин).

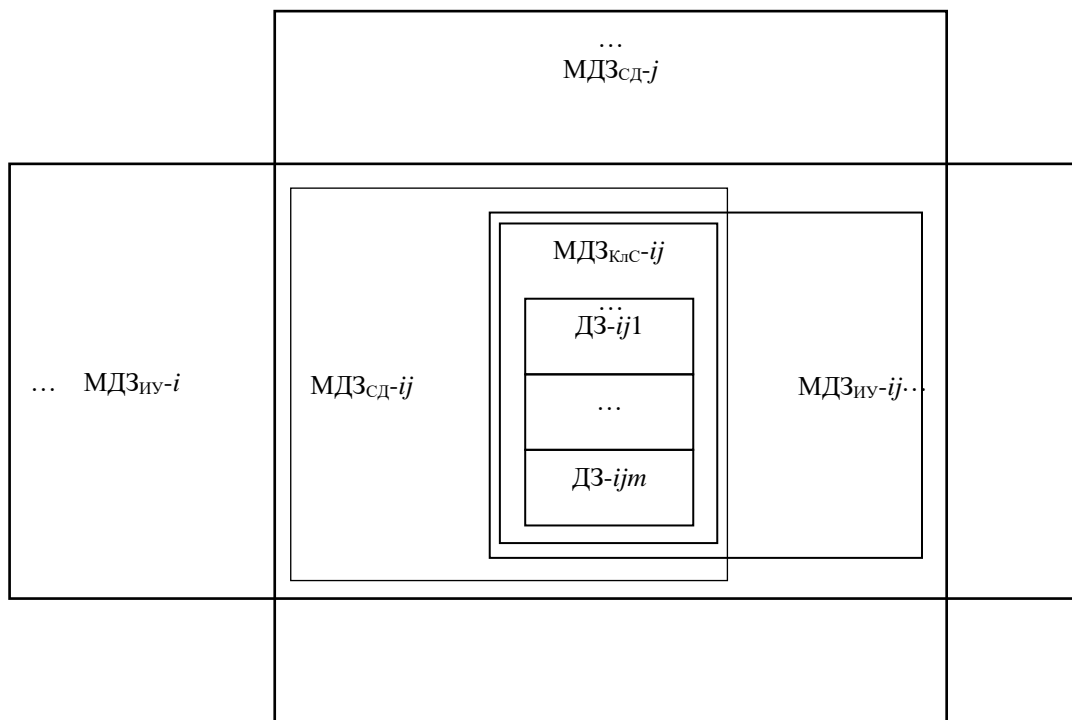


Рис. 32. Иерархия междисциплинарных задач

МДЗ_{сд} – междисциплинарные задачи стадий динамики; МДЗ_{иу} – междисциплинарные задачи информационных уровней; МДЗ_{клс} – междисциплинарные задачи классов опасных состояний, ДЗ – дисциплинарные задачи.

Проведено развитие программного модуля поддержки преобразований агентно-ориентированной модели и ее интерпретации для агентного имитационного моделирования. Данный модуль реализует разработанный в рамках данного проекта (2017 г.) информационный процесс формирования спецификаций агентных имитационных моделей (АИМ) и обеспечивает поддержку пользователя при создании АИМ. Поддержка осуществляется на основе представления и реализации информационного процесса в виде



семантической сети (рис. 33), узлами которой являются ключевые артефакты процесса разработки АИМ, а связями – существующие между ними зависимости, которые могут содержать функции перехода, формализующие правила преобразования одних артефактов в другие. Данный алгоритм использует иерархическую систему информационно-логических моделей, разработанной в неделимом соавторстве с к.т.н. А.Б. Столбовым, элементы которой позволяют описать типовые элементы (структуры, поведение, процессы) и инструменты, используемые при создании АИМ.

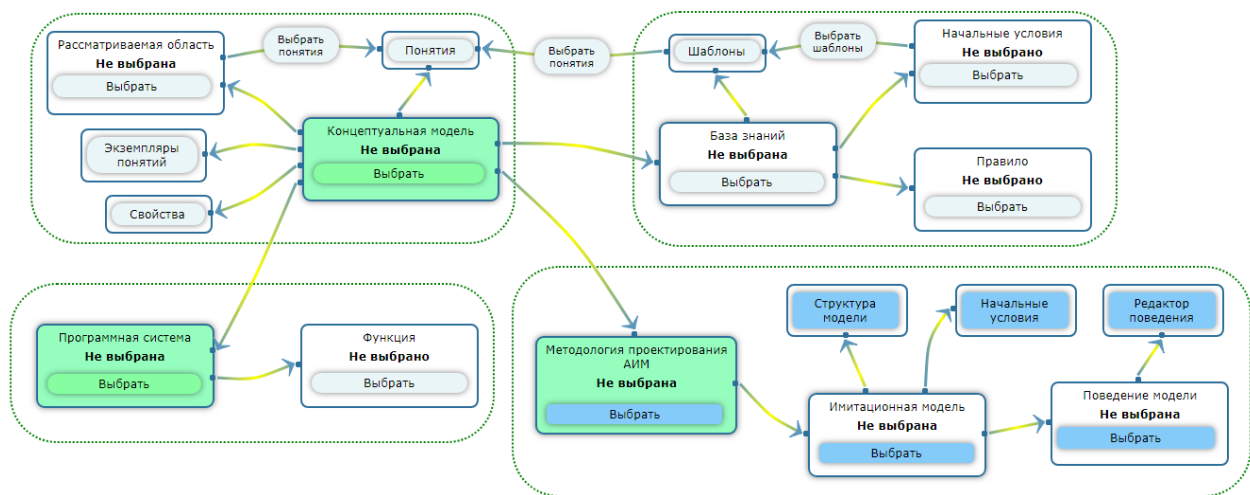


Рис. 33. Экранная форма с изображением информационного процесса формирования спецификаций АИМ в виде семантической сети

Разработанный программный модуль позволяет осуществить поддержку действий пользователя при формировании спецификации АИМ за счет наглядной визуализации возможных направлений движения в соответствии с существующими зависимостями между артефактами и интерактивного отображения влияния внесенных изменений на интерактивной семантической сети артефактов модели и их трансформаций.

В рамках данного программного модуля полученные спецификации поведения АИМ и ее активных элементов (агент, среда) могут быть преобразованы к исполняемому виду путем интерпретации. Преобразования осуществляются на основе следующей модели, обеспечивающей описание поведения АИМ:

$$M^{Op} = \langle Op^B, Op^C \rangle,$$

где Op^B – базовая операция, представляющая метод компонента системы агентного имитационного моделирования,

$$\begin{aligned} \langle Op^B \rangle &= \langle \text{Имя метода} \rangle \{ \langle \text{Параметр} \rangle \} \langle \text{Реализация} \rangle \\ \langle \text{Реализация} \rangle &= \langle \text{Адрес} \rangle \langle \text{Протокол доступа} \rangle \\ \langle \text{Протокол доступа} \rangle &= \text{HTTP} \mid \text{SOAP} \mid \text{Websocket} \mid \text{Local} \\ \langle \text{Параметр} \rangle &= \langle \text{Имя} \rangle \langle \text{Вход} \mid \text{Выход} \rangle \langle \text{Тип} \rangle \\ \langle \text{Тип} \rangle &= \langle \text{Литерал} \rangle \mid \langle \text{Понятие} \rangle, \end{aligned}$$

Op^C – композитная операция, функциональность которой формируется на основе комбинации базовых операций,

$$\begin{aligned} \langle Op^C \rangle &= \langle \text{Имя} \rangle \{ \langle \text{Параметр} \rangle \} \{ \langle Op^B \rangle \mid \langle Op^C \rangle \mid \langle \text{Оператор} \rangle \{ \langle Op^B \rangle \mid \langle Op^C \rangle \} \} \\ \langle \text{Оператор} \rangle &= \text{Oif} \mid \text{OL} \mid \text{Ov}. \end{aligned}$$

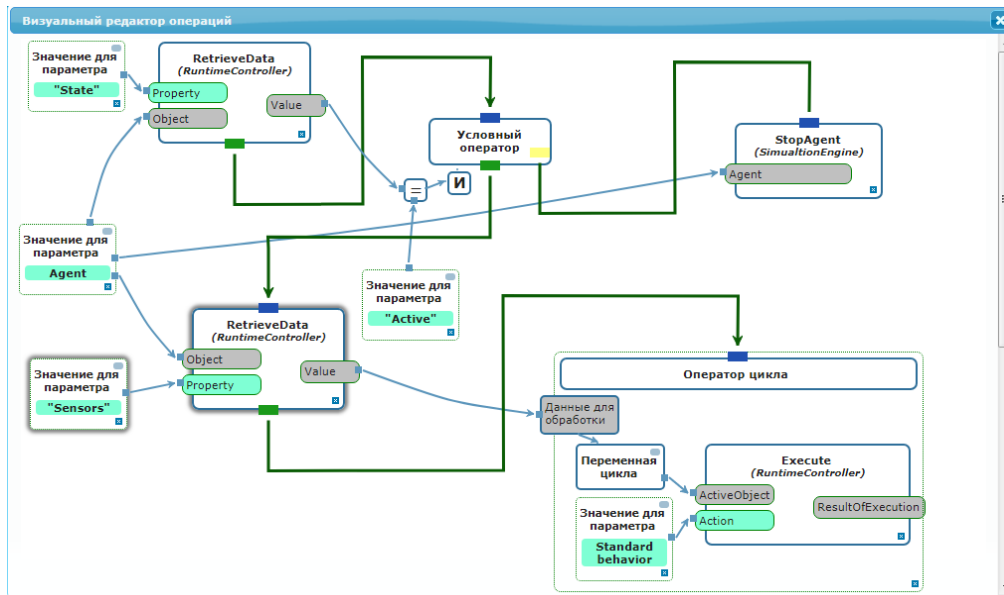


Рис. 34. Редактор описания поведения АИМ

Разработанная модель описания поведения АИМ и ее элементов обеспечивает возможность спецификации необходимого поведения путем визуального конструирования на основе методов функциональных компонентов системы агентного имитационного моделирования (компонент работы с базой данных, коммуникационный компонент, компонент рассуждений на основе правил и т.п.) и стандартных операторов ветвления и цикла (рис. 34). При этом интерпретация полученных спецификаций в исполняемый вид может быть выполнена автоматически.

Новизна представленного результата обусловлена использованием оригинальной иерархической системы информационно-логических моделей, позволяющей описать типовые элементы АИМ (структуры, поведение, процессы), включая модель композитной операции, обеспечивающей описание сложного поведения путем комбинирования базовых операций (авторы: д.т.н. О.А. Николайчук, к.т.н. А.И. Павлов, к.т.н. А.Б. Столбов).

Предложен алгоритм и программное обеспечение, обеспечивающие поддержку принятия решений на основе совместного применения прецедентного подхода и методов группового принятия решений. Апробация алгоритма осуществлена на примере решения задачи выбора конструкционного материала при проектировании изделий в нефтехимии.

Алгоритм состоит из двух основных шагов: 1) поиск прецедентов-аналогов, включающих информацию о материалах и опыте их применения в различных условиях; 2) применение методов многокритериального выбора (АРАМИС, АИР, МОПС) для получения окончательного решения на основе сужения множества аналогов, полученных на первом этапе. Программная реализация алгоритма произведена в составе программной системы «Выбор+».

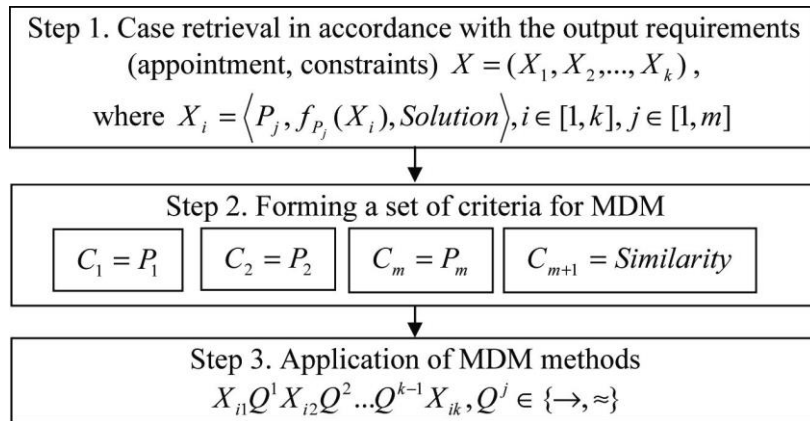


Рис. 35. Схема совместного использования прецедентов и методов группового выбора

Совместное применение прецедентного подхода и методов повышает эффективность принятия решений за счет уточнения результатов извлечения прецедентов-аналогов. На практике такой подход позволяет предоставлять лицу, принимающему решение, как единственный наиболее подходящий вариант, так и упорядоченную последовательность (что позволит избежать повторного решения задачи в случае отказа ЛПР от наиболее предпочтительного варианта). Наличие строгого математического базиса как на этапе извлечения прецедентов из библиотеки прецедентов, так и на этапе применения методов многокритериального выбора, а также успешное применение предложенного подхода к решению ряда практических задач, в том числе для выбора конструкционных материалов, свидетельствуют о высоком уровне достоверности результатов его применения (авторы: к.т.н. А.Ю. Юрин, Г.С. Малтузьева).



Проект № 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

Развиты теоретические основы невыпуклого оптимального управления (ОУ) на невыпуклую негладкую задачу ОУ с целевым функционалом и ограничениями типа неравенства, задаваемыми функционалами Больца с d.c. функциями. В частности, доказаны новые условия глобальной оптимальности (УГО) для такой задачи (*авторы: д.ф.-м.н. А.С. Стрекаловский, М.В. Янулевич*).

Разработаны теоретические основы локального и глобального поисков в простейшей иерархической задаче с равновесием на нижнем уровне: для двухуровневой задачи с линейной функцией на верхнем уровне и матричной игрой на нижнем уровне доказана теорема редукции к задаче математической оптимизации с невыпуклым допустимым множеством, а также построены явные d.c. разложения невыпуклых функций, входящих в постановку задачи, в виде разности двух выпуклых функций (*авторы: к.ф.-м.н. А.В. Орлов, к.ф.-м.н. Т.В. Груздева*).

Исследованы приложения задач целочисленного программирования, в частности, задач размещения в области интеллектуального анализа больших массивов данных. Для задачи оптимального замещения с приложением в автомобильной промышленности разработан новый точный параллельный метод решения, включающий в виде блоков несколько известных методов и подходов (*авторы: к.ф.-м.н. И.Л. Васильев, к.ф.-м.н. А.В. Ушаков*).

Разработаны новые алгоритмы, ориентированные на оптимизацию псевдоболевых функций типа «черный ящик» (pseudo Boolean Black-box function), которые были применены для оценивания трудоемкости алгебраических атак в отношении ряда поточных шифров (Mickey, Salsa20 и Rabbit, а также сжимающий и самосжимающий генераторы) (*авторы: к.т.н. О.С. Заикин, С.Е. Кочемазов*).

Ряд задач, относящихся к подводной акустике, был решен в проекте Acoustics@home. Более конкретно, были исследованы вопросы точности восстановления профиля скорости звука в волноводе мелкого моря. Соответствующие проблемы сводились к задаче black-box оптимизации функции невязки. Были проанализированы два подхода. В первом из них профиль скорости звука рассматривается как кусочно-линейная функция с зафиксированными узлами, расположенными равномерно по глубине (от поверхности моря до дна). В этих узлах значение профиля скорости звука находится с помощью решения обратной задачи. В рамках второго подхода глубины узлов профиля скорости звука также рассматриваются как неизвестные параметры, значения которых восстанавливаются при решении обратной задачи. В результате проведения нескольких крупномасштабных вычислительных экспериментов было выяснено, что для рассмотренных задач второй подход позволяет находить более точные оценки профиля скорости звука (*автор: к.т.н. О.С. Заикин*).

Получены новые результаты, относящиеся к теории сложности пропозициональных доказательств. А именно, было показано, что недавно построенная система вывода, основанная на использовании двухрельсовой кодировки (dual-rail encoding, DRE) и последующего применения MaxSAT-резолюции (такая система пропозиционального вывода



названа DRMaxSAT или dual-rail MaxSAT) полиномиально моделирует общую резолюцию. В сочетании с ранее полученным результатом о существовании полиномиального доказательства в системе DRMaxSAT для формул Дирихле это означает, что система вывода DRMaxSAT является более мощной по сравнению с общей резолюцией. Было также показано, что система DRMaxSAT не моделирует полиномиально системы на основе алгоритма Гомори (cutting planes systems) (автор: к.ф.-м.н. А.С. Игнатьев).

Разработана библиотека PySAT для эффективного прототипирования с применением SAT-решателей на языке Python: <https://pysathq.github.io/>. Библиотека предоставляет пользователю инкрементальный (incremental) доступ к оригинальным низкоуровневым реализациям некоторых современных SAT-решателей, например, MiniSAT, Glucose и Lingeling, что позволяет существенно облегчить реализацию прототипов, решающих практические задачи с помощью SAT-оракулов. Кроме того, на примере MaxSAT-решателя RC2 было продемонстрировано, что реализация решений на основе PySAT не ведет к существенной потере производительности, несмотря на «высокоуровневость» языка Python. Так, MaxSAT решатель RC2 победил в обеих категориях главного трека ежегодного международного соревнования MaxSAT Evaluation 2018, выиграв две «золотые» медали FLoC Olympic Games 2018, Oxford, UK (автор: к.ф.-м.н. А.С. Игнатьев).

Предложены эффективные кодировки и использующие SAT подходы к построению «множеств решений» (decision sets или rule sets), а также «деревьев решений» (decision trees), используемых при решении задач классификации в современном машинном обучении (автор: к.ф.-м.н. А.С. Игнатьев).

Исследованы некоторые свойства диагональных латинских квадратов (ДЛК) малых порядков. Были разработаны программные реализации эффективного генератора ДЛК и алгоритма построения трансверселей ДЛК путем перебора в глубину с возвратами. С помощью данных программ были перечислены трансверсели для ДЛК до порядка 8 включительно. Была также предложена классификация ДЛК порядка 10 по количеству ортогональных им ДЛК (авторы: к.т.н. О.С. Заикин, С.Е. Кочемазов).

Разработан метод создания агентных имитационных моделей (АИМ), позволяющий описывать и применять различные методологии проектирования на основе единого языка спецификаций. При создании метода была использована иерархическая система информационно-логических моделей, позволяющих описать типовые элементы (структуры, поведение, процессы) и инструменты, используемые при создании АИМ. Отдельное внимание при создании метода было уделено специализации тех моделей иерархической системы, которые связаны с описанием средств реализации АИМ. В отличие от известных подходов разработанный метод обеспечивает поддержку процесса создания АИМ на более абстрактном уровне, что позволяет варьировать разные способы агентного моделирования и повторно использовать существующие программные средства (автор: к.т.н. А.Б. Столбов).

Для задач о размещении элементов резервной и дублирующей системы обслуживающих логистических центров (ЛЦ) с пространственными ограничениями предложена математическая модель в виде задачи о кратном покрытии ограниченного многосвязного множества наборами равных кругов. При этом 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



**Отчет Института динамики систем и теории управления
имени В.М. Матросова СО РАН за 2018 г.**

вычислительный эксперимент, включающий решение тестовых и модельных задач (*автор: к.ф.-м.н.А.А. Лемперт*).

Для транспортно-пересадочных узлов «Владыкино» и «Кутузово», которые расположены на Московском центральном кольце, определена структура основных входящих пассажиропотоков. На основе собранных статистических данных построены их математические модели в виде ВМАР-потоков, которые позволяют объединить в единую структуру несколько различных потоков заявок. Ключевой особенностью предложенной модели является то, что время между двумя последовательно прибывающими группами пассажиров подчинено экспоненциальному распределению. Последнее позволяет применять для изучения групповых пассажиропотоков аппарат классической теории массового обслуживания (*авторы: д.ф.-м.н. А.Л. Казаков, к.ф.-м.н.А.А. Лемперт, М.Л. Жарков*).

Представлен всесторонний анализ формирования и динамики теплового потока в озере Байкал на основе детальных натурных измерений. Коэффициент эффективного турбулентного обмена оценивается путем решения обратной задачи Стефана с использованием данных о толщине ледяного покрова и распределения температуры во льду и подледной воде. При моделировании использованы результаты прямых измерений скорости диссипации турбулентной кинетической энергии, которые послужили основой для качественного доказательства наличия слоя постоянного турбулентного напряжения подо льдом Байкала, оценки диапазона скоростей течения, при которых формируется логарифмический слой. Для воспроизведения процессов, приводящих к появлению кольцевых структур, было выполнено их описание в рамках двумерной, осесимметричной относительно вертикальной оси математической модели нарастания и таяния ледового покрова. Согласование с крупномасштабной гидродинамической моделью осуществлялось через задание осредненных по времени полей скорости течений в районе кольца, используемых в осесимметричной модели как входные параметры. Коэффициенты горизонтальной и вертикальной турбулентной диффузии оценивались косвенным методом. Численное моделирование динамики ледового покрова позволило воспроизвести основные характеристики наблюдаемых кольцевых структур на льду озера Байкал (*автор: В.В. Козлов*).