



## ВАЖНЕЙШИЕ НАУЧНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

### Приоритетное направление 1. Теоретическая математика

#### 1. Эволюционное включение с максимально монотонным оператором и невыпуклым многозначным возмущением

Рассмотрено эволюционное включение в гильбертовом пространстве, правая часть которого содержит зависящий от времени максимально монотонный оператор и многозначное отображение с замкнутыми невыпуклыми значениями. Зависимость максимально монотонного оператора от времени описывается с помощью функции расстояния между максимально монотонными операторами в смысле Владимира. Предполагается, что такое расстояние как функция от времени имеет ограниченную вариацию с верхней границей, заданной некоторой положительной неатомической мерой Радона. Под решением включения понимается непрерывная функция ограниченной вариации, чья производная (мера Стильеса) абсолютно непрерывна относительно указанной выше положительной меры Радона, а значения соответствующей функции плотности принадлежат почти всюду множеству из правой части включения. При традиционных предположениях (измеримость, липшицевость по фазовой переменной в метрике Хаусдорфа, условие подлинейного роста) доказываются существование решений и устанавливается ряд их свойств.

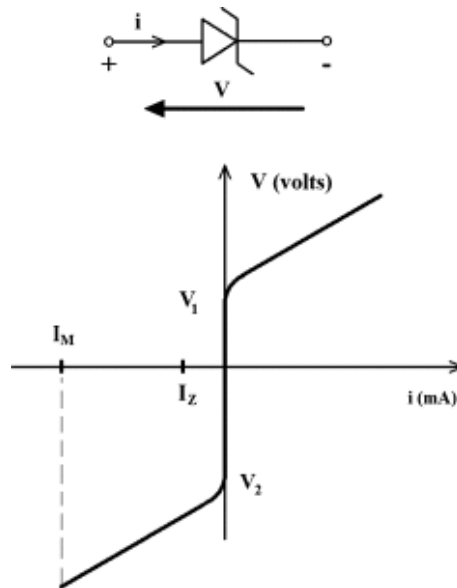


Рис. 1. График простейшего максимально монотонного оператора

Автор: чл.-к. РАН А.А. Толстоногов

#### 2. Позиционный принцип минимума второго порядка в задачах оптимального управления

Получено необходимое условие глобальной оптимальности программного управления в классе позиционных управлений спуска по функционалу, экстремальных относительно новой квадратичной опорной мажоранты функционала. Результат усиливает и дополняет классический и позиционный принципы минимума первого порядка, и особенно эффективен в задачах с особыми и скользящими режимами.

Автор: д.ф.-м.н. В.А. Дыхта



### 3. Оптимальное управление в модели популяционной динамики с гистерезисом

Рассмотрена нелинейная управляемая система в частных производных, возникающая при моделировании динамики популяций. Система состоит из трех уравнений диффузии, описывающих эволюцию трех биологических видов: добыча, хищник и пища для добычи. Уравнение для плотности пищи включает в себя гистерезисный оператор типа обобщенный упор, учитывающий гистерезисные эффекты, возникающие при рассмотрении данного процесса. Изучена задача минимизации заданного интегрального функционала на решениях указанной системы. Многозначное отображение, определяющее ограничение на управление, имеет замкнутые, невыпуклые значения, а интегрант целевого функционала является функцией, невыпуклой по управлению. Наряду с исходной рассматривается релаксационная задача минимизации интегрального функционала с овыпукленным по управлению интегрантом на решениях управляемой системы с овыпукленным ограничением на управление. Доказан аналог классической теоремы Н.Н. Боголюбова в вариационном исчислении, устанавливающей связь между исходной задачей минимизации и релаксационной задачей.

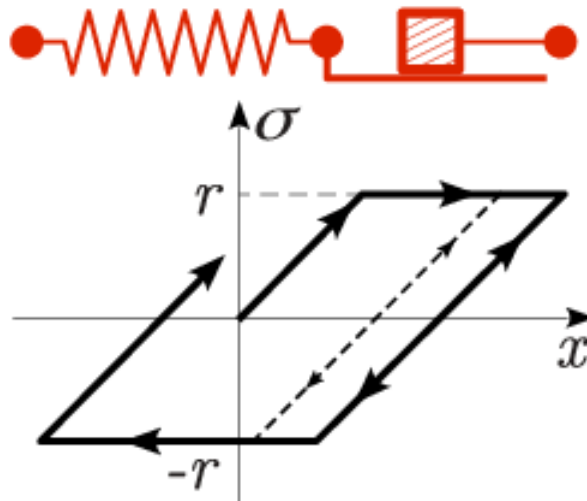


Рис. 2. Гистерезисный оператор типа упор

*Автор: к.ф.-м.н. С.А. Тимошин*

### 4. Метод численного решения задач управления динамическими системами с двумя независимыми типами импульсных воздействий на основе сингулярного пространственно-временного преобразования

Для гибридной задачи управления динамической системой с двумя независимыми типами импульсных воздействий разработана схема численного решения на основе нового сингулярного пространственно-временного преобразования, сочетающего разрывную замену времени с расширением фазового пространства. Последнее соответствует расщеплению разрывной траектории на две ветви, отвечающие ее (левому и правому) односторонним пределам. Схема позволяет адаптировать для изучаемого класса задач существующие алгоритмы оптимального управления и сторонние решатели. В рамках апробации развиваемого подхода получены результаты численного исследования нескольких моделей механических систем с блокируемыми степенями свободы и гиперимпульсными воздействиями вибрационной природы. Расчеты проведены прямым методом с привлечением пакета GEKKO и решателей IPOPT, APOPT и WPOPT.

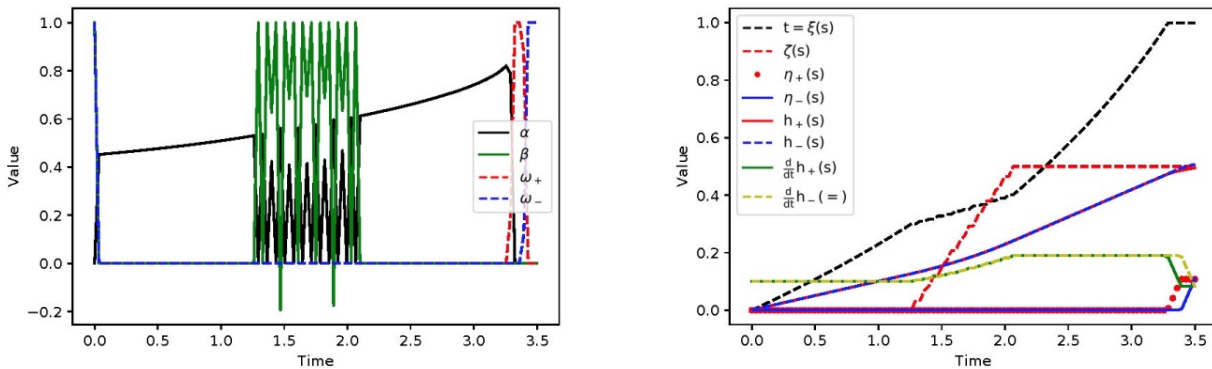


Рис. 3. Телескопический маятник с блокируемой степенью свободы: управления (слева) и траектории (справа) в преобразованной задаче. пилообразный участок на графике управлений (зеленый и черный цвет) соответствует вибрации – гиперимпульсу; финальный сегмент (красная и синяя пунктирные линии) характеризует импульсное блокирование линейной координаты

Авторы: к.ф.-м.н. Е.В. Гончарова, к.ф.-м.н. М.В. Старицын

## 5. Оптимизация нелинейных импульсных процессов

Рассмотрен класс задач оптимизации нелинейных импульсных процессов с управлениями, заданными борелевскими мерами, и ограничениями на промежуточные значения разрывной траектории. Развита метод составных (векторных) функций типа Ляпунова со свойствами сильной и/или слабой монотонности относительно импульсной управляемой системы. Получены условия оптимальности, основанные на использовании множеств составных функций типа Ляпунова. Для билинейной задачи оптимального импульсного управления найдены составные функции, точно описывающие множества достижимости в промежуточные моменты времени и конкретизирующие необходимые и достаточные условия оптимальности.

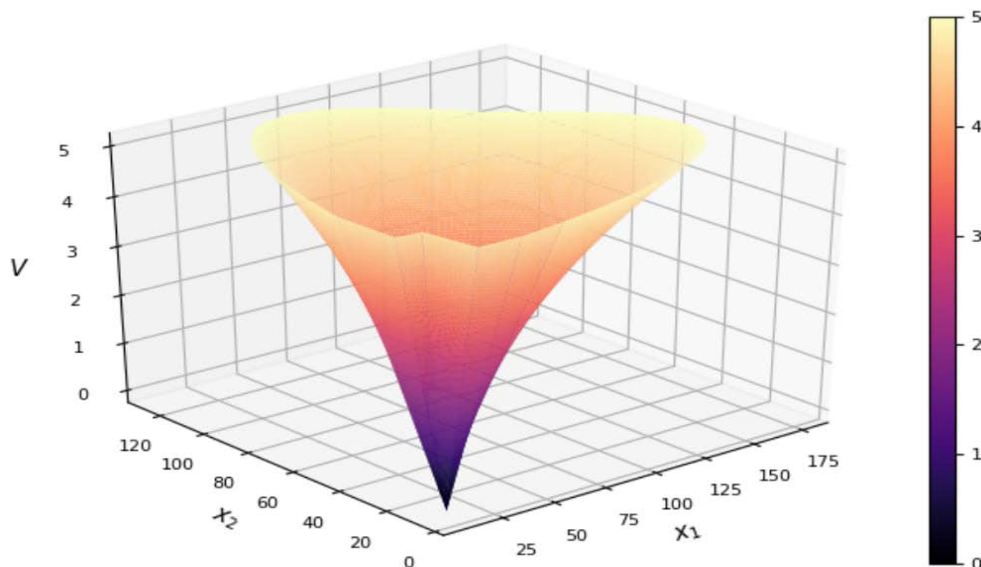


Рис. 4. Точное описание множества достижимости билинейной импульсной системы, заданное векторной (составной) функцией типа Ляпунова

Автор: к.ф.-м.н. О.Н. Самсонок



## 6. Математическая модель кипения недогретой жидкости в кольцевом канале

Рассмотрена модель кипения недогретой жидкости в кольцевом канале, представленная в виде смешанной системы обыкновенных дифференциальных уравнений, алгебраических соотношений и одного уравнения в частных производных. С помощью теории дифференциально-алгебраических уравнений определена область существования решения математической модели и предложен численный метод. Определенное в результате расчетов время исчезновения жидкой пленки соответствует данным физического эксперимента по изучению нарушения эффекта Лейденфроста при охлаждении металлической поверхности, омываемой потоком этанола (рис. 5).

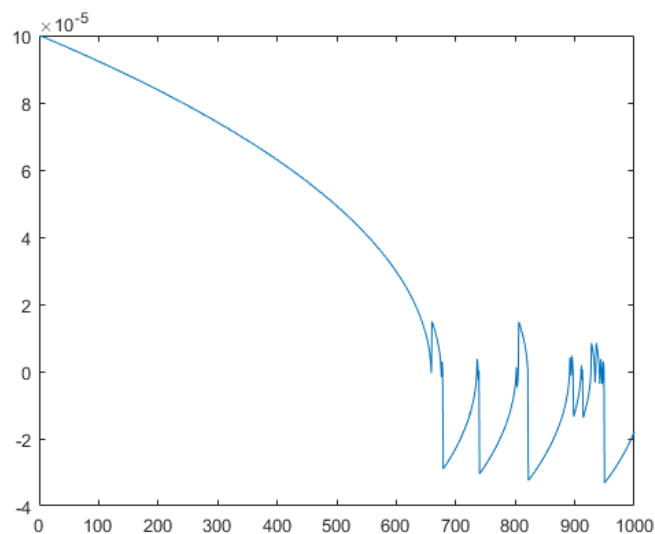


Рис. 5. Динамика изменения толщины слоя перегретой выше температуры насыщения жидкости

Авторы: д.ф.-м.н. В.Ф. Чистяков, к.ф.-м.н. Е.В. Чистякова

## 7. Параллельная вычислительная технология аппроксимации интегральной воронки динамической системы с полиэдральным управлением

Выполнена программная реализация методов решения задач аппроксимации интегральной воронки для полиэдрально управляемых динамических систем с применением технологий параллельного программирования. Предложенная технология основывается на редукции к задачам фазового оценивания и оптимального управления с ограничениями более простой структуры. Используемые для исследования вспомогательных задач обобщенные методы стохастической аппроксимации множества достижимости управляемой динамической системы опираются на построение управлений в виде функций релейного типа с заданным числом точек переключения. Для параллельной генерации допустимых управлений из полиэдрального множества с последующим интегрированием дифференциальной системы с целью нахождения соответствующего значения функционала применялись современные графические ускорители. Предлагаемые в работе подходы реализованы на языке C/C++ с использованием технологии параллельного программирования NVIDIA CUDA.

Расширенная коллекция тестовых задач с полиэдральными управляющими воздействиями использована для тестирования предложенных алгоритмов и программных средств. На рис. 6 представлены рассмотренные варианты полиэдральных ограничений на



управления:  $u(t) \in U_i, i = \overline{1,5}$ , а также множества достижимости динамической системы  $\dot{x}_1 = 0.1u_2 \sin x_2, \dot{x}_2 = u_1 - |x_1|^{x_1}$  с фиксированными начальными значениями траектории  $x_1(t_0) = 0.1, x_2(t_0) = 0$ . Вычислительные эксперименты проводились на различных системах, имеющих в своём составе ускорители NVIDIA GeForce 1060, GeForce 1070 и GeForce 2080 Ti. Результаты, полученные в режиме одинарной точности (float), продемонстрировали значительное ускорение расчётов. С использованием разработанных вычислительных технологий решены содержательные задачи рассматриваемого типа.

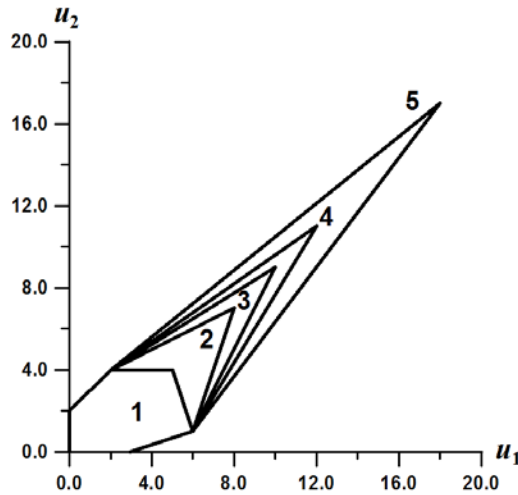


Рис. 6. Полиэдральные множества допустимых управлений для семейства тестовых ЗОУ

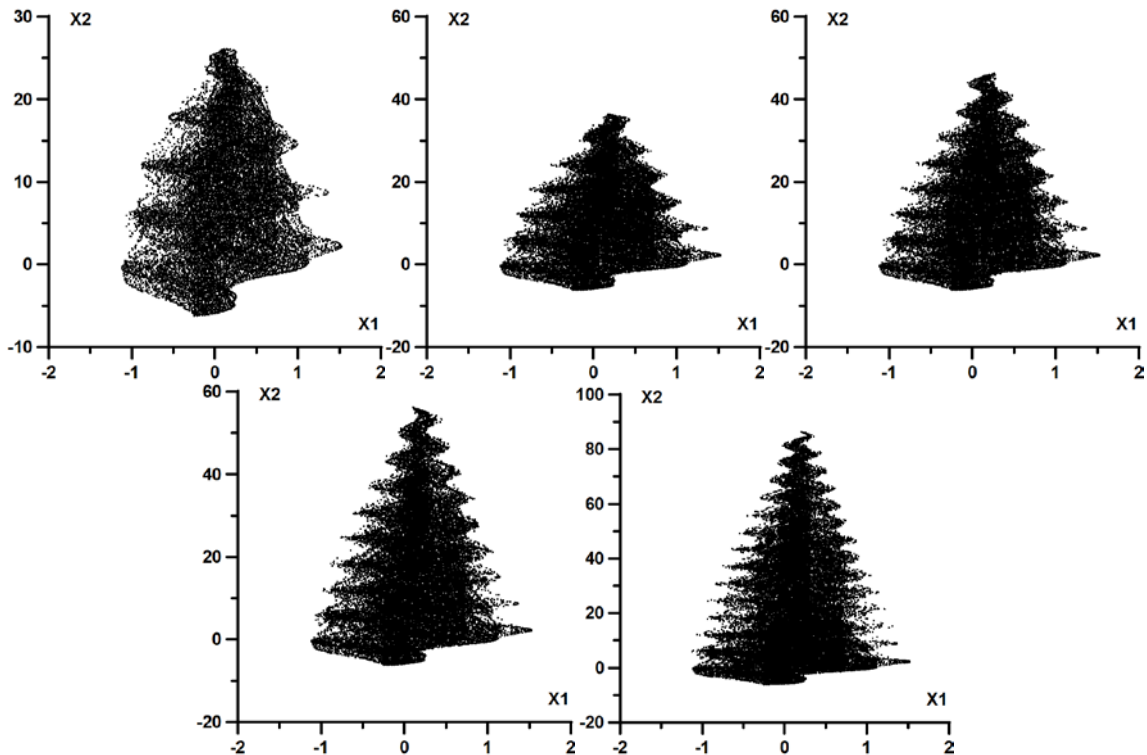


Рис. 7. Аппроксимация множества достижимости управляемой динамической системы для рассмотренного семейства тестовых задач

Авторы: д.т.н. А.Ю. Горнов, к.т.н. Т.С. Зароднюк, А.С. Аникин, П.С. Сорокиков

## 8. Гамильтонов формализм для мягких бозе-возбуждений в кварк-глюонной плазме

Решена задача построения гамильтоновой теории для коллективных продольно-поляризованных бесцветных возбуждений (плазмонов) в высоко-температурной глюонной плазме. Для решения этой задачи был применён общий формализм построения теории волн в нелинейных средах с дисперсией, развитый В.Е. Захаровым. В рамках данного подхода получено в явном виде специальное каноническое преобразование в форме функционального разложения по квазичастичным операторам рождения и уничтожения плазмонов, позволяющее упростить исходный гамильтониан взаимодействия мягких глюонных возбуждений, исключив из него вклад третьего порядка по взаимодействию и тем самым определить новый эффективный гамильтониан четвёртого порядка, описывающий процесс упругого рассеяния двух бесцветных плазмонов друг на друге. Эффективная амплитуда плазмон-плазмонного взаимодействия, которая входит в эффективный гамильтониан, имеет простую диаграммную интерпретацию, представленную на рис. 8:

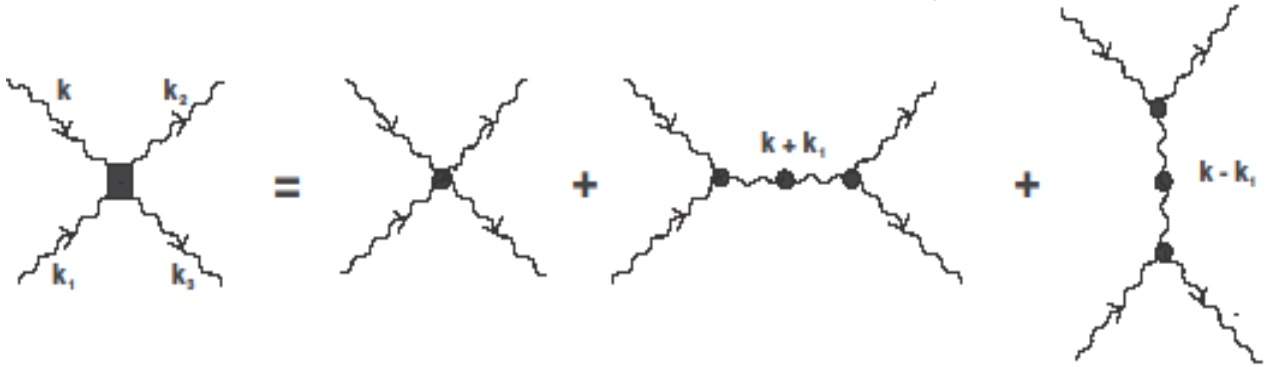


Рис. 8. Матричный элемент для четырехплазмонного распада.

Волновые линии обозначают плазмоны, а черные точки – эффективные трех- и четырех-глюонные вершинные функции в приближении жестких температурных петель

Введена в рассмотрение корреляционная функция второго порядка, определяющая функцию распределения числа плазмонов. Дан анализ корреляционных функций четвёртого и шестого порядков по операторам рождения и уничтожения.

Развитый подход использован далее для построения кинетического уравнения больцмановского типа, которое описывает процесс упругого рассеяния мягких бозонных возбуждений в чисто глюонной плазме и эффект так называемого нелинейного затухания Ландау. Проведено детальное сравнение эффективной амплитуды плазмон-плазмонного взаимодействия, определенной в рамках классической гамильтоновой теории, и соответствующего матричного элемента, вычисленного в рамках высокотемпературной квантовой хромодинамики, что позволило определить границы справедливости чисто классического подхода, представленного в работе. Определены в явном виде трёхплазмонные и четырёхплазмонные вершинные функции в рамках приближения жёстких температурных петель и аппроксимация эффективного глюонного пропагатора в плазмонном полюсе. Намечены возможные пути обобщения гамильтонового описания на случай сильновозбужденной горячей глюонной плазмы.

*Авторы: д.ф.-м.н. Ю.А. Марков, д.ф.-м.н. М.А. Маркова, Н.Ю. Марков*



### 9. Решение задачи рассеяния с использованием принципа максимума энтропии

Решена трехмерная обратная задача рассеяния применительно к комптоновскому рассеянию с использованием принципа максимума энтропии, идея которого как метода решения физических задач с неполной информацией была предложена Е.Т. Джейнсом в 1957 году. Так как любые обратные задачи характеризуются, как правило, недостатком информации, то решение, соответствующее максимуму энтропии с наименьшей вероятностью, могут вводить в заблуждение наличием разного рода артефактов. В работе разработана итерационная процедура для реконструкции рассеивающего объекта по результатам комптоновского рассеяния, т.е. восстановление объекта по лучевому преобразованию в конической системе координат. На рис. 9 представлены результаты численного эксперимента (модельный объект слева, реконструкция справа). Ошибка реконструкции представлена на рис. 10.

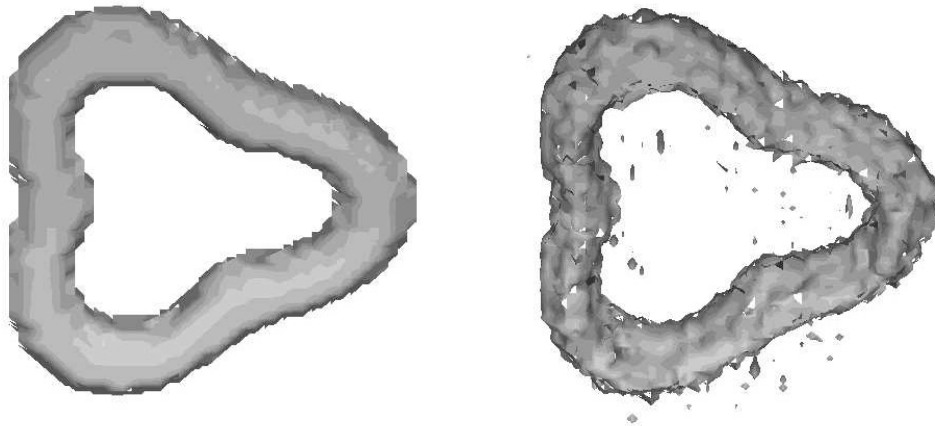


Рис. 9. Возмущенный тороидальной модой  $m = 3$  модельный тороид (слева) и реконструированный (справа) с аспектным отношением  $Asp = 5.0$ . Относительная погрешность восстановления не более 10,5%

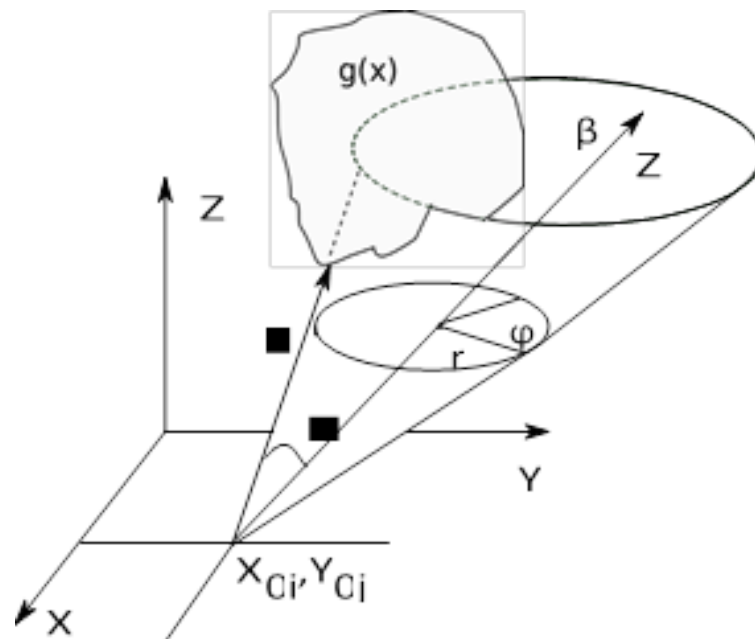


Рис. 10. Ошибка реконструкции (в процентах) в зависимости от числа измерений для различных тороидальных мод ( $m = 1$  (- + -),  $m = 2$  (- x -),  $m = 3$  (-\*-))

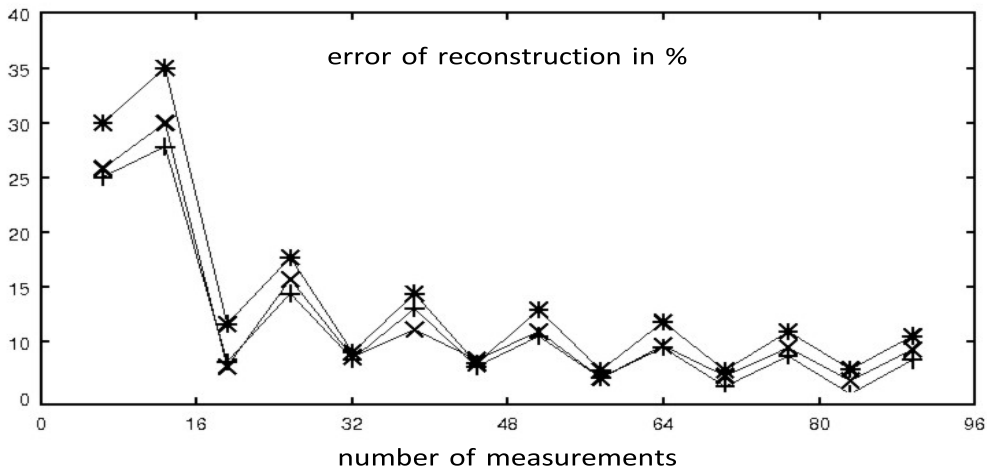


Рис. 11. Схема измерения рассеянного излучения для инверсии лучевого преобразования

Автор: д.ф.-м.н. А.Л. Баландин

## 10. Символьно-численный анализ необходимых условий устойчивости относительных равновесий орбитального гиростата

Исследована динамика вращательного движения по круговой орбите спутника-гиростата в центральном ньютоновском поле сил, а также получены необходимые условия устойчивости относительного положения равновесия (ОПР) общего вида для орбитального гиростата. При определении конкретных ОПР рассмотрен случай, когда вектор гиростатического момента системы находится в одной из трех плоскостей, образуемых главными центральными осями инерции. В пространстве введенных безразмерных параметров проведен параметрический анализ условий устойчивости некоторых равновесных состояний. Выполнено сравнение необходимых и полученных другими авторами достаточных условий устойчивости. Полученные области имеют аналитический вид или графическое представление в виде 2D-изображений (см., например, рис. 12). Нахождение необходимых условий устойчивости позволяет, например, рассмотреть вопрос о возможности гироскопической стабилизации неустойчивой системы под действием потенциальных сил. При исследовании применялись функции символьно-численного моделирования системы компьютерной алгебры (СКА) «Mathematica» и прикладное программное обеспечение, разработанное ранее на базе этой СКА.

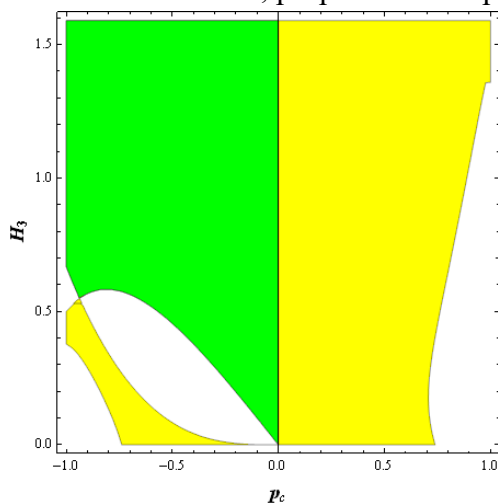


Рис. 12. Область необходимых условий устойчивости для одного из ОПР при конкретных значениях некоторых параметров, где в её зелёной части матрица потенциальных сил положительно определена

Автор: к.ф.-м.н. А.В. Банищikov





### 11. Построение и исследование решений, имеющих тип диффузионной волны, для нелинейных параболических уравнений и систем с особенностью

В рамках развития предложенной ранее технологии построения и исследования решений нелинейных параболических уравнений и систем с вырождением, описывающих диффузионные процессы в механике и физике, разработан оригинальный метод изучения специального класса решений – диффузионных волн, распространяющихся по невозмущенному фону с конечной скоростью. Основой предложенного метода является совместное использование характеристических рядов, методов граничных элементов и двойственной взаимности и точных решений, построение которых сводится к интегрированию задач Коши (зК) для обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ), наследующих особенность у исходной задачи. Свойства уравнений исследуются аналитически, численно и методами качественной теории дифференциальных уравнений. Метод был применен для исследования нелинейного уравнения теплопроводности с источником и системы уравнений «реакция–диффузия». На рис. 13 показан фазовый портрет динамической системы, описывающей тепловую волну с логарифмическим фронтом, рис. 14 соответствует решениям зК для ОДУ, описывающим профиль волны.

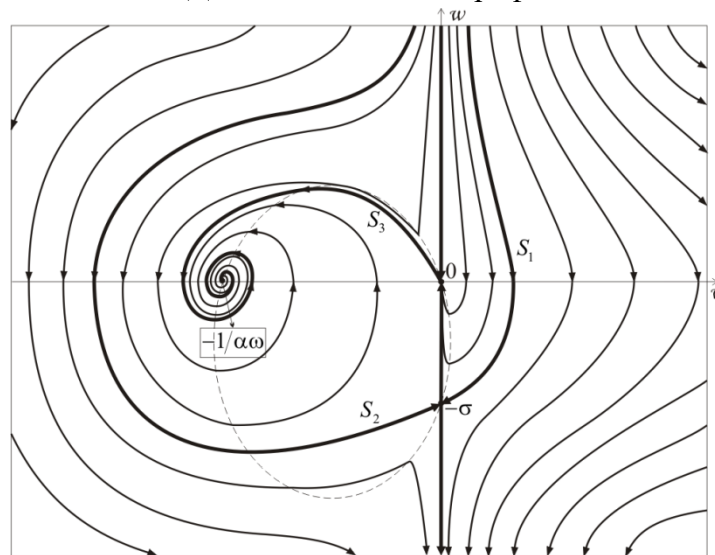


Рис. 13. Фазовый портрет

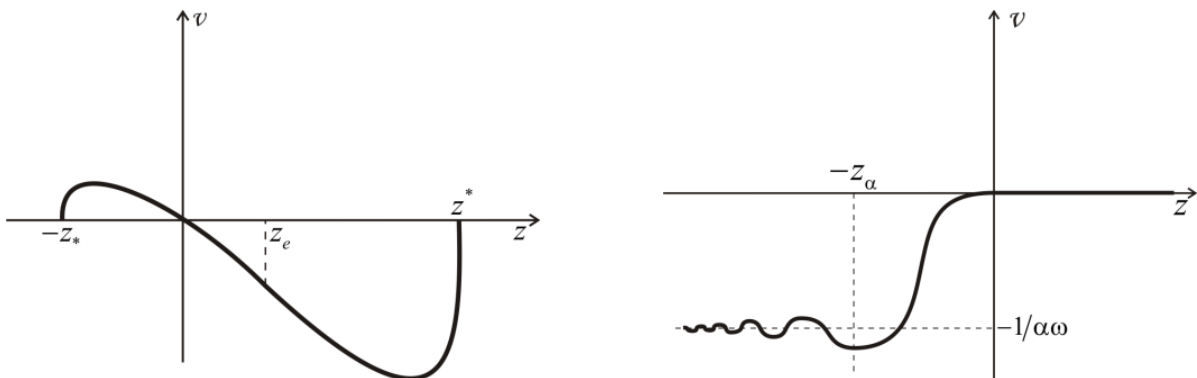


Рис. 14. Решение (слева), соответствующее сепаратрисам  $S_1$  и  $S_2$ ;  
решение (справа), соответствующее сепаратрисе  $S_3$ .

Автор: д.ф.-м.н. А.Л. Казаков



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

### 1. Событийный подход к планированию пути в неизвестной среде для автономного необитаемого подводного аппарата

Успешное выполнение отдельных этапов сложной многоцелевой миссии невозможно без наделения автономного необитаемого подводного аппарата способностью коррекции своего движения в режиме реального времени для того, чтобы избежать столкновения с препятствиями. Исследована постановка задачи планирования пути в неизвестной среде, в рамках которой подводному аппарату предписано следовать по заданной опорной траектории и обходить препятствия, обнаруживаемые по ходу движения локатором секторного обзора. Для решения поставленной задачи разработан событийный подход, центральным компонентом которого является дискретно-событийная система, ответственная за выявление ситуаций, требующих коррекции пути. Предложены два алгоритма планирования пути, обеспечивающие безопасный обход обнаруживаемых препятствий и возврат на опорную траекторию по завершению обходного маневра. Генерируемые алгоритмами пути являются гладкими и удовлетворяют кинематическим ограничениям, заданным минимальным радиусом поворота аппарата. Разработанный подход в отличие от большинства известных не требует значительных вычислительных ресурсов и имеет потенциал быть реализованным на борту.

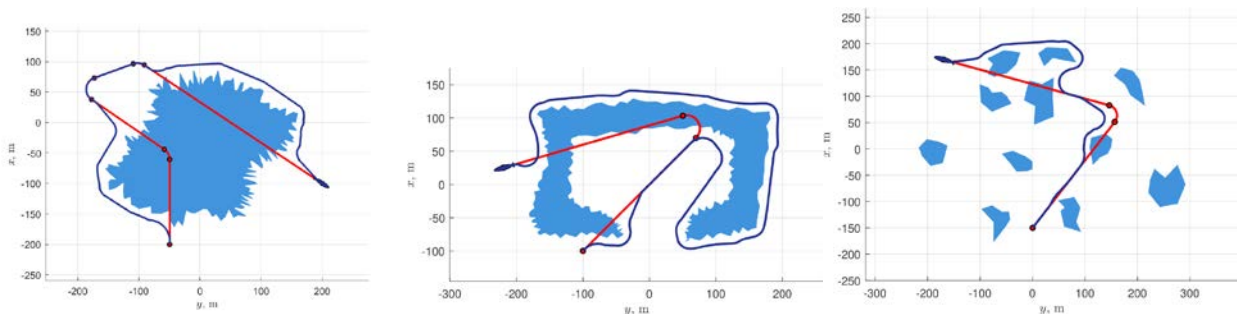


Рис. 15. Результаты моделирования для различных сценариев.

На рисунке: синие области – препятствия, красная линия – опорная (желаемая) траектория, синяя линия – фактическая, полученная моделированием траектория

*Авторы: к.т.н. С.А. Ульянов, ак. И.В. Бычков, к.т.н. Н.Н. Максимкин*

### 2. Эвристический подход к решению задачи экстренного оповещения распределенной группы мобильных роботов в условиях ограниченной коммуникации

Эффективность группы мобильных роботов во многом определяется ее способностью оперативно реагировать на возникающие изменения. Информирование всех членов группы об изменениях, способных повлиять на успех миссии, является нетривиальной задачей для больших мобильных группировок, особенно в условиях ограниченной коммуникации, когда обмен данными может осуществляться только между физически близкими роботами. Исследована задача поиска такого маршрута движения для робота, обладающего важной информацией, который обеспечил бы наискорейшее оповещение распределенной группы



роботов, функционирующей в заданном регионе. Предложена оригинальная постановка задачи, объединяющая в себе черты мультиагентных сетевых моделей и задач групповой маршрутизации. Ключевой особенностью постановки является тот факт, что каждый робот, получивший обновленные данные, также прекращает выполнение своих текущих целей и присоединяется к задаче группового оповещения. Для решения задачи предлагается ряд конструктивных эвристик для построения начальных маршрутов и процедура локального поиска для их дальнейшего улучшения. Получены результаты сравнительного анализа эвристик, разработаны алгоритмы для генерации реалистичного набора тестовых задач.

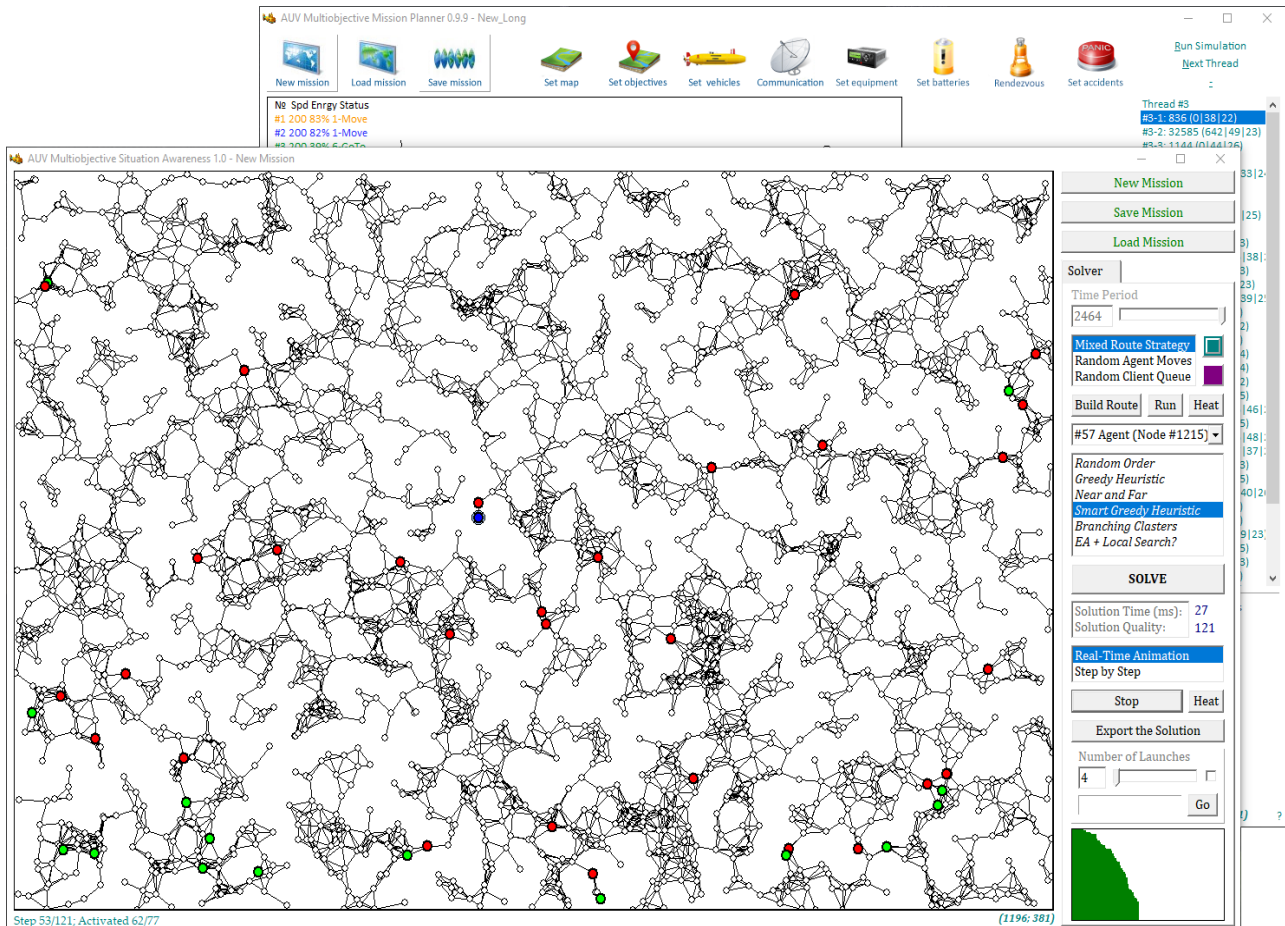


Рис. 16. Программная реализация задачи оповещения в рамках моделирующего комплекса

*Авторы: М.Ю. Кензин, ак. И.В. Бычков, к.т.н. Н.Н. Максимкин*

### 3. Верификация предсказаний глубоких нейросетевых моделей обнаружения таблиц в неразмеченных PDF документах

В настоящее время, большой объем нередатируемых документов публикуется и распространяется в формате PDF. Обычно они являются «неразмеченными», т.е. они не сопровождаются аннотацией о собственной структуре, в том числе нет метаданных о месторасположении и структуре таблиц. Одной из первостепенных задач автоматического понимания таких документов является обнаружение таблиц. Перспективным подходом к решению этой задачи является применение глубоких нейросетевых моделей обнаружения таблиц на изображениях документов. Однако значительная часть предсказаний, производимых такими моделями, все еще оказывается ложной.



С целью повышения качества обнаружения таблиц нами предлагается метод верификации таких предсказаний на основе сборки и анализа графового представления компоновки кандидатных таблиц, извлекаемых из неразмеченных PDF-документов. Предсказанный ограничивающий прямоугольник кандидатной таблицы используется, чтобы вырезать ее текстовое и графическое наполнение из PDF-документа. Анализ компоновки наполнения таблицы на основе адаптации алгоритмов «Т-Rec» позволяет построить граф, вершины которого соответствуют текстовым блокам (т.е. абзацам текста внутри вероятных ячеек таблицы), а ребра выражают расположение текстовых блоков относительно друг друга (т.е. размещение внутри вероятных строк и столбцов таблицы). Набор таких графов, построенных по реальным позитивным примерам PDF-таблиц и синтетическим негативным примерам, позволил выделить и изучить графовые признаки, позволяющие идентифицировать наиболее вероятные таблицы среди кандидатных.

В результате была создана модель верификации кандидатных таблиц на основе алгоритма машинного обучения «Случайный лес». Обученная модель выполняет двоичную классификацию графов кандидатных таблиц, разделяя их на два класса: «истинные» и «ложные» случаи. Экспериментальные результаты демонстрируют, что реализованная верификационная модель позволяет исключить значительную часть ложноположительных случаев и тем самым существенно повысить точность обнаружения таблиц в неразмеченных PDF-документах.

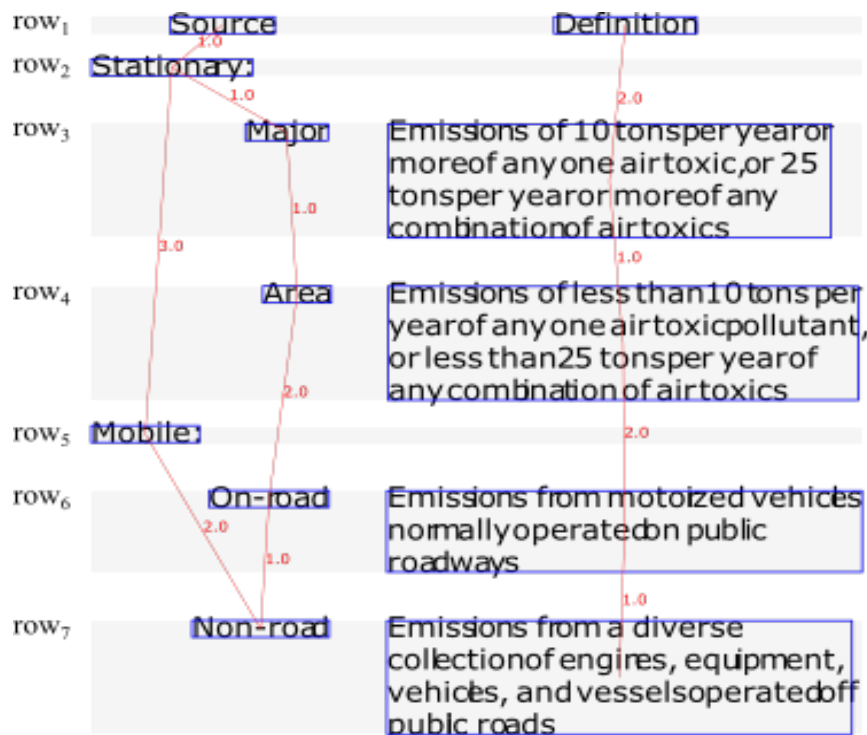


Рис. 17. Пример графового представления верифицируемой кандидатной таблицы

Авторы: к.т.н. А.А. Михайлов, И.А. Черепанов, Е.В. Рожков, к.т.н. А.О. Шугаров



#### 4. Технология прототипирования производственных экспертных систем на основе модельных трансформаций (ПЭСот)

Разработана информационная технология создания интеллектуальных систем, а именно, производственных экспертных систем, переопределяющая и специализирующая принципы модельно-управляемого подхода, в частности, модели, метамодели, схемы метамоделирования и трансформаций.

Научная новизна технологии обусловлена включением в процесс разработки, переопределением и активным использованием вычислительно-независимой модели в форме онтологии; использованием авторских языков и нотаций: проблемно-ориентированного декларативного языка описания модельных трансформаций (TMRL); визуальной проблемно-ориентированной нотации для моделирования знаний в виде логических правил (RVML); оригинальным алгоритмическим и программным обеспечением, реализующим предлагаемый подход. Технология направлена на решение проблемы повышения эффективности и качества (технологичности) разработки компонентов проблемно-ориентированных систем искусственного интеллекта (включая базы знаний и экспертные системы). Технология апробирована при решении прикладных задач в области надежности и безопасности технических систем.

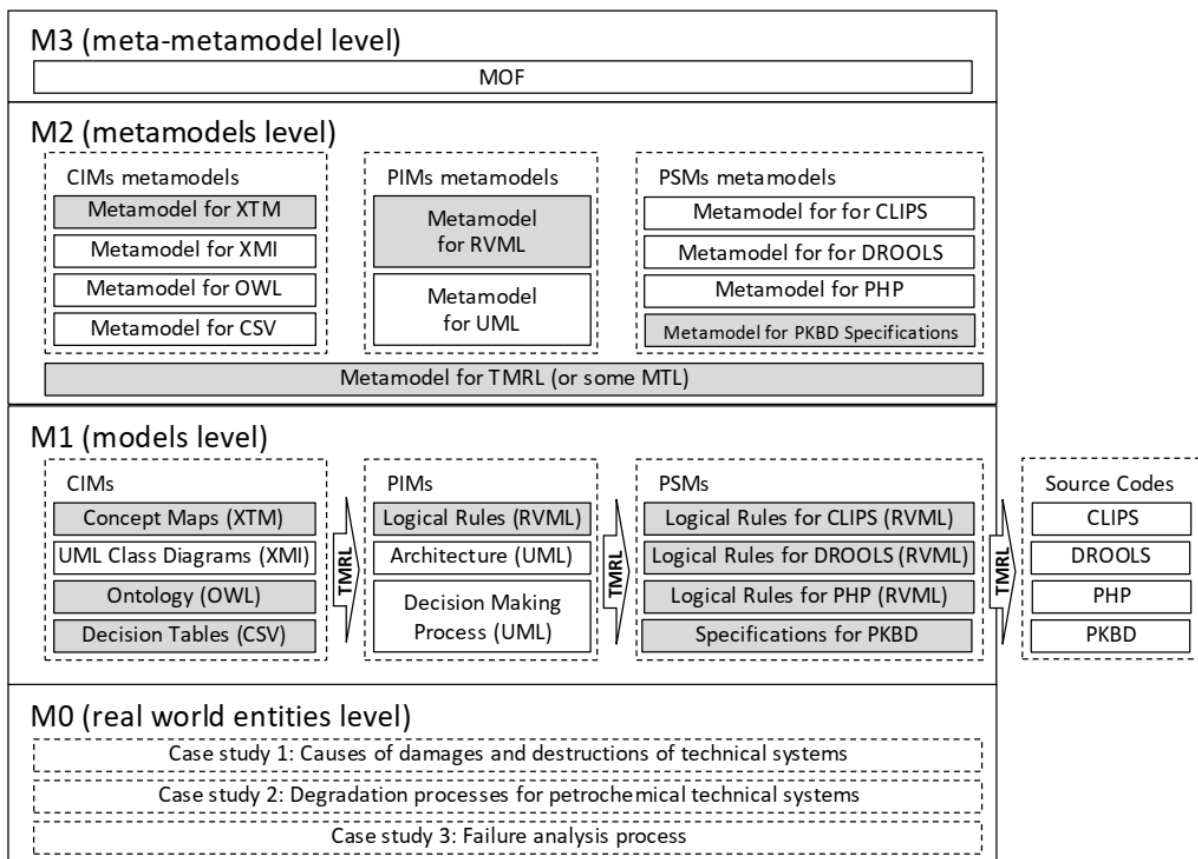


Рис. 18. Основные этапы, модели и трансформации технологии ПЭСот с точки зрения метамоделирования (новые элементы отмечены серым)

Авторы: к.т.н. Н.О. Дородных, к.т.н. А.Ю. Юрин, д.т.н. О.А. Николайчук



## 5. Принцип самоорганизации алгоритма обоснования свойств безопасности и приемлемого риска техногенных катастроф (ТК)

Новизна принципа самоорганизации основана на использовании метапродукций и продукций, формирующих совокупность требуемых задач и соответствующих экспертных систем и вычислительных модулей для их решения. Алгоритм самоорганизации с помощью метапродукций определяет предметную область и некоторую последовательность процесса обработки информации. Непосредственное решение задач осуществляется с помощью продукций. Алгоритм самоорганизации обеспечивает автоматическое/автоматизированное формирование интеллектуальной программной системы для решения задач.

Реализация процесса решения осуществляется в три этапа. На первом этапе на основе исходных данных, характеризующих воздействующие на объект факторы и требования к свойствам объекта, экспертные системы первого уровня (ЭС1) формируют набор задач, решение которых обеспечивает обоснование свойств безопасности. Информация о задачах поступает на вход экспертных систем второго уровня (ЭС2), которые определяют средства решения: экспертные системы, вычислительные модули (ВМ) и базы данных третьего уровня (ЭС3 и ВМ3), которые, в свою очередь, осуществляют непосредственное решение задач, сформированных на первом этапе.

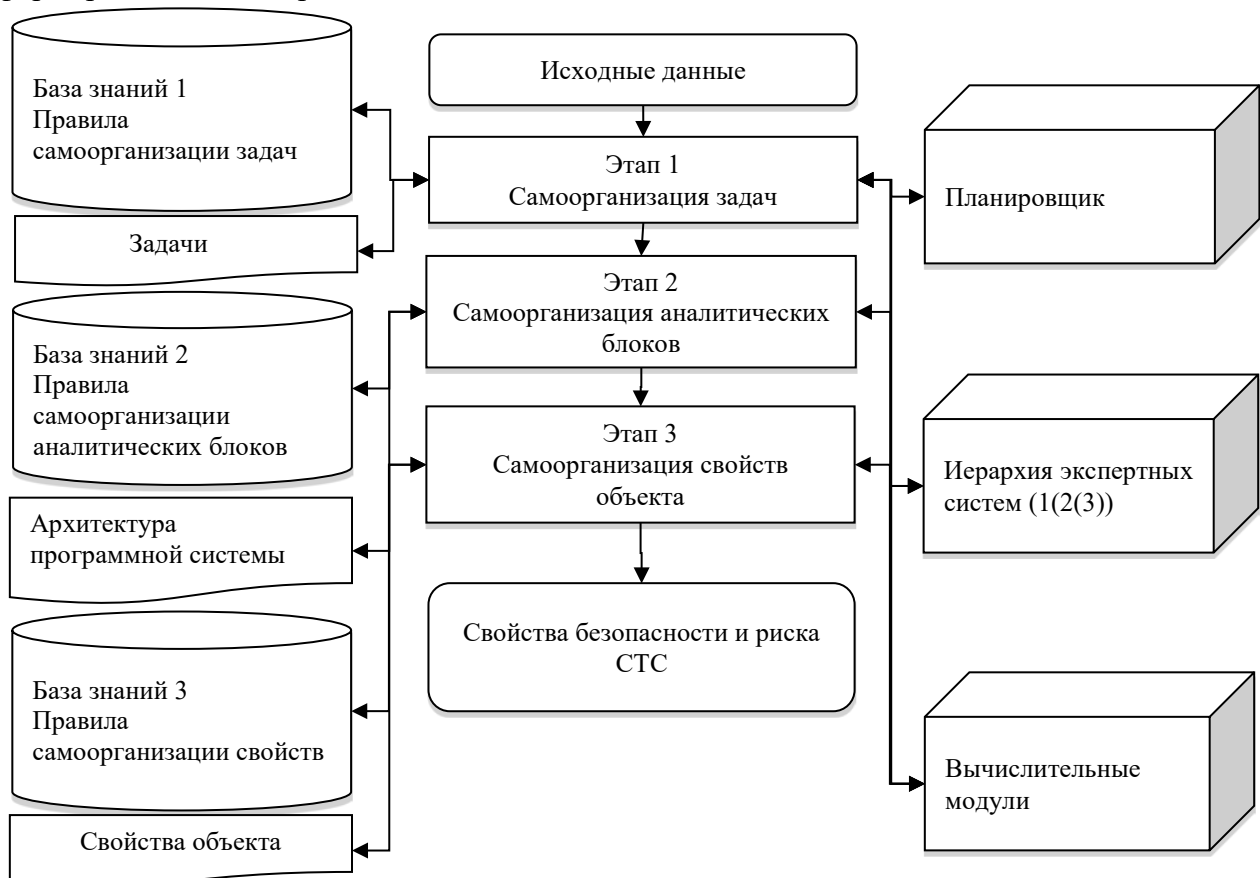


Рис.19. Алгоритм самоорганизации свойств безопасности и приемлемого риска техногенных катастроф

Авторы: д.т.н. А.Ф. Берман, д.т.н. О.А. Николайчук

## 6. Средства автоматизации разработки композиций микросервисов для гибридных научных вычислений

Разработаны средства автоматизации построения композиций и ансамблей микросервисов на основе платформы HPCSOMAS-MSC (рис. 20). Эти средства ориентированы на применение в пакете прикладных микросервисов для решения вычислительно сложных задач качественного исследования двоичных динамических систем (ДДС) на основе метода булевых ограничений в гибридной вычислительной инфраструктуре, которая включает как облачные, так и локальные ресурсы. Преимуществом HPCSOMAS-MSC является поддержка как статического создания композитного сервиса на основе процедурной постановки задачи с иерархическим управлением его выполнения, так и динамического формирования композиции микросервисов на основе декларативной формулировки задачи с децентрализованным асинхронным управлением этой композицией на семантической P2P сети агентов, что обеспечивает адаптивность, надежность, масштабируемость вычислений и автоматическое подключение посредством агентов дополнительных ресурсов в силу открытости сети. Разработанные средства позволяют автоматизировать проведение исследований в разнообразных предметных областях, в которых ДДС используются в качестве моделей изучаемых объектов, например, биоинформатике и криптоанализе.

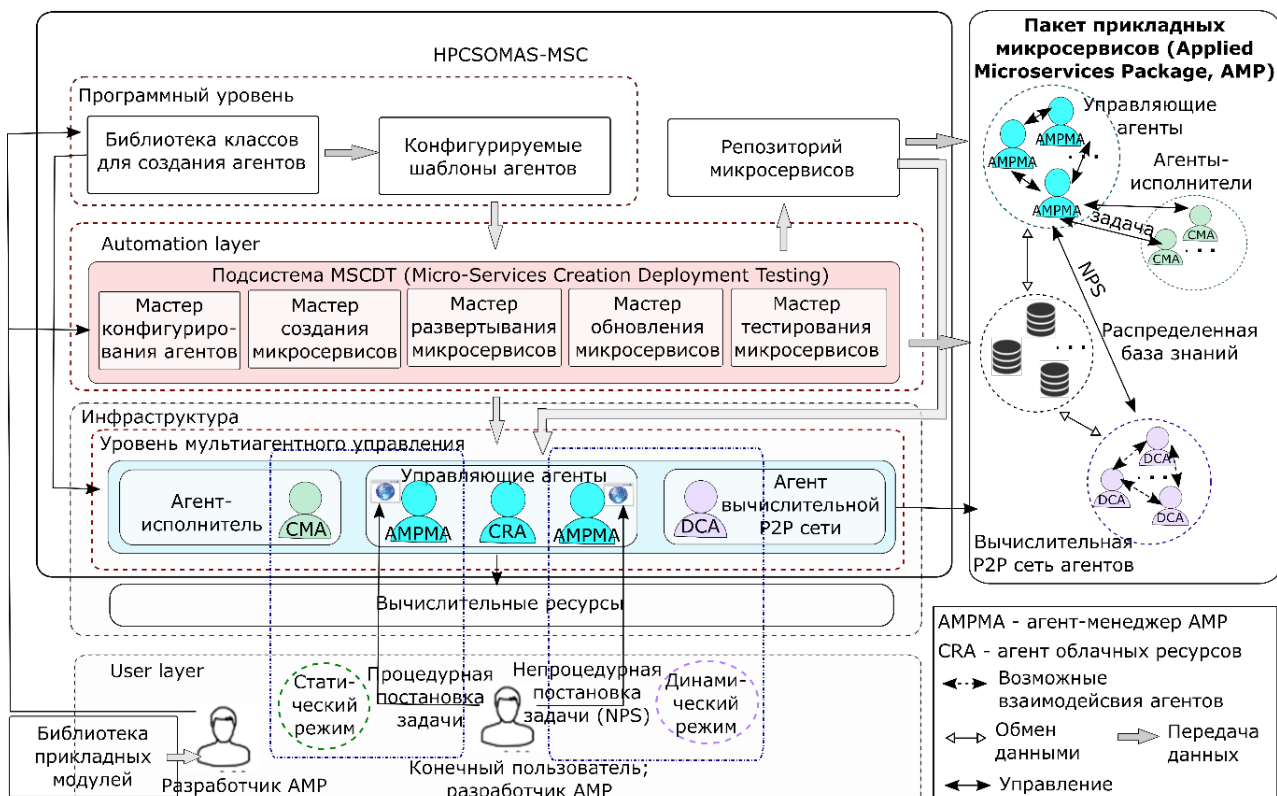


Рис. 20. Средства создания и управления композицией и ансамблем микросервисов на основе платформы HPCSOMAS-MSC

Авторы: д.т.н. Г.А. Опарин, к.т.н. В.Г. Богданова, А.А. Пашинин



## 7. Инструментальные средства создания масштабируемых приложений на основе суперкомпьютерного инжиниринга

Разработаны средства создания масштабируемых приложений и их выполнения в среде, которая может включать ресурсы грид-систем, суперкомпьютерных центров и облачных платформ. В отличие от известных инструментариев, они базируются на применении инженерии знаний, непрерывной интеграции системного и прикладного ПО, конфигурирования ресурсов и мультиагентного управления. Ускорение вычислений, обеспечение их надежности и масштабируемости, а также повышение эффективности использования ресурсов при решении больших задач достигаются путем смягчения неопределенностей, возникающих при распределении вычислительной нагрузки, за счет извлечения знаний о времени выполнения приложений на ресурсах, классификации заданий, использования знаний о соответствии ресурсов классам заданий, а также сведений, получаемых в процессе разработки, доставки, развертывания и тестирования ПО. Практическая значимость разработанных средств показана при создании среды поддержки принятия решений в процессе моделирования Единой системы газоснабжения России с учетом отказов ее элементов (рис. 21).

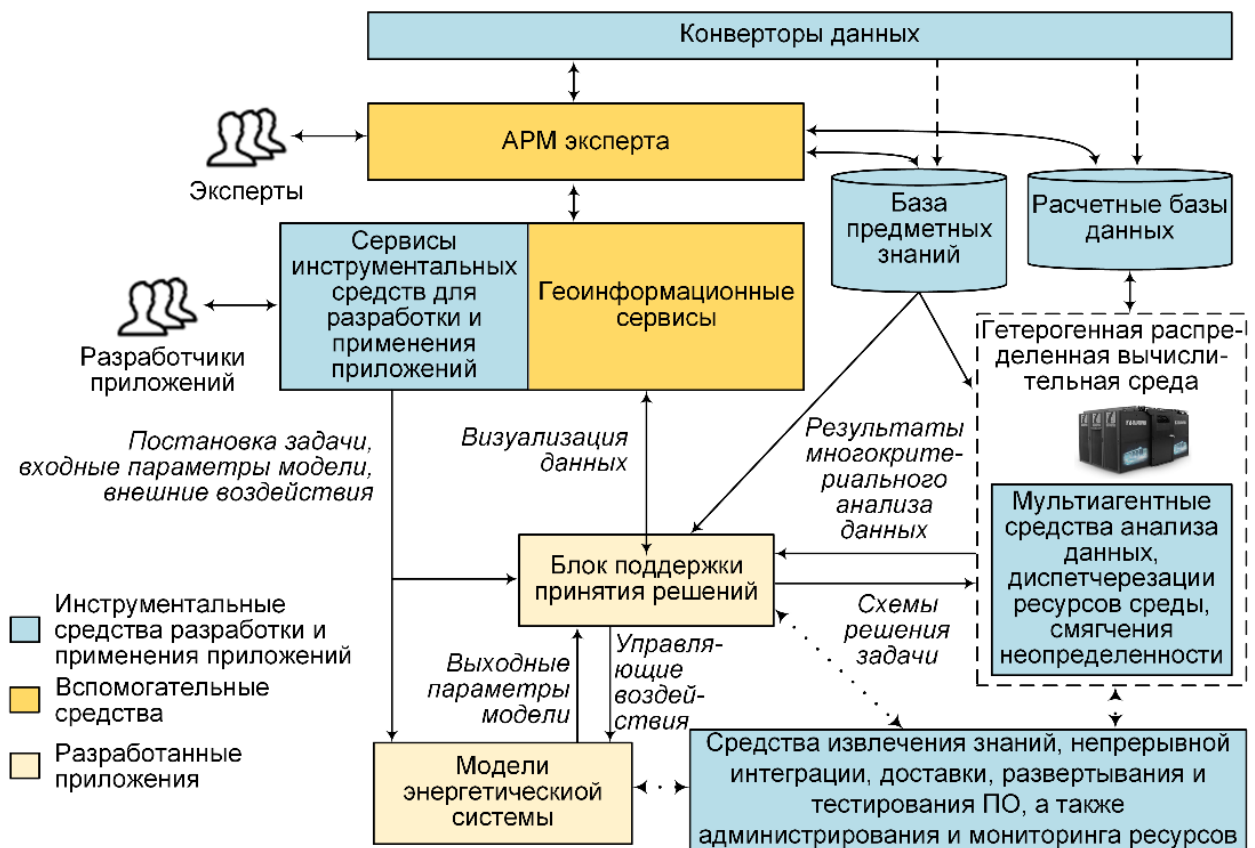


Рис. 21. Среда поддержки принятия решений

Авторы: ак. И.В. Бычков, к.т.н. А.Г. Феоктистов, к.т.н. С.А. Горский,  
к.т.н. И.А. Сидоров, Р.О. Костромин





## 8. Методы локального и глобального поисков в невыпуклых задачах оптимизации

Для общей задачи математической оптимизации, где целевая функция и ограничения заданы d.c. функциями (т.е. представимыми в виде разности выпуклых функций) на основе условий глобальной оптимальности (УГО), разработаны новые специальные методы локального поиска, а также Схема (Стратегия) Глобального поиска. При этом важнейшее преимущество Схемы заключается в возможности использования для решения выпуклых линейризованных задач, порожденных УГО, современных и классических методов выпуклой оптимизации, которые применяются «внутри» (на каждой итерации) методов локального поиска. Вся методология выглядит как матрешки: самая большая – Схема Глобального поиска; внутри – семейство методов локального поиска; и самые маленькие матрешки (для решения выпуклых задач) – классические методы оптимизации. Как следствие, для решения невыпуклых прикладных задач открываются возможности применения современных пакетов прикладных программ. Разработанная Схема может применяться для поиска именно глобальных решений в сложных практических задачах экономики, управления, энергетики, военного планирования, технического проектирования, искусственного интеллекта и машинного обучения и т.д., и т.п.



Рис 22. Иерархическая структура модулей Схемы Глобального поиска

*Автор результата: д.ф.-м.н. А.С. Стрекаловский*

## 9. Алгоритмы решения задач псевдобулевой оптимизации, дополняющие стратегию, основанную на принципе склеивания переменных.

Были разработаны алгоритмы решения задач псевдобулевой оптимизации, дополняющие стратегию, основанную на принципе склеивания переменных (Merging Variables Principle, MVP). Конкретно, были предложены новые техники выхода из т.н. «сильных» локальных экстремумов. Для этой цели использовались эволюционные алгоритмы («Fast Evolutionary Algorithm», предложенный Б. Доерром с соавторами, а также один вариант генетического алгоритма, показавший ранее хорошие результаты на задачах криптоанализа генераторов ключевого потока). Алгоритмы были реализованы в виде многопоточного программного приложения. Полученная программа показала более высокую эффективность в сравнении с известными многопоточными SAT решателями Lingeling и



Painless на задачах обращения известных криптографических хеш-функций (MD5, SHA-1, SHA-256) с дополнительными ограничениями на хеш. Также разработанный решатель на базе MVP был применен к экземплярам задачи MaxSAT, кодирующим один вариант известной проблемы размещения производств (Facility Location Problem). На этих тестах MVP-решатель превзошел по эффективности известный MaxSAT решатель Loandra, победивший в 2019 году на соревнованиях MaxSAT решателей среди неполных алгоритмов.

На рис. 23 показан график сравнения эффективности MVP-решателя, использующего новые техники выхода из сильных локальных экстремумов, с решателями Plingeling и Painless на задачах обращения криптографических хеш-функций с дополнительными ограничениями на хеш.

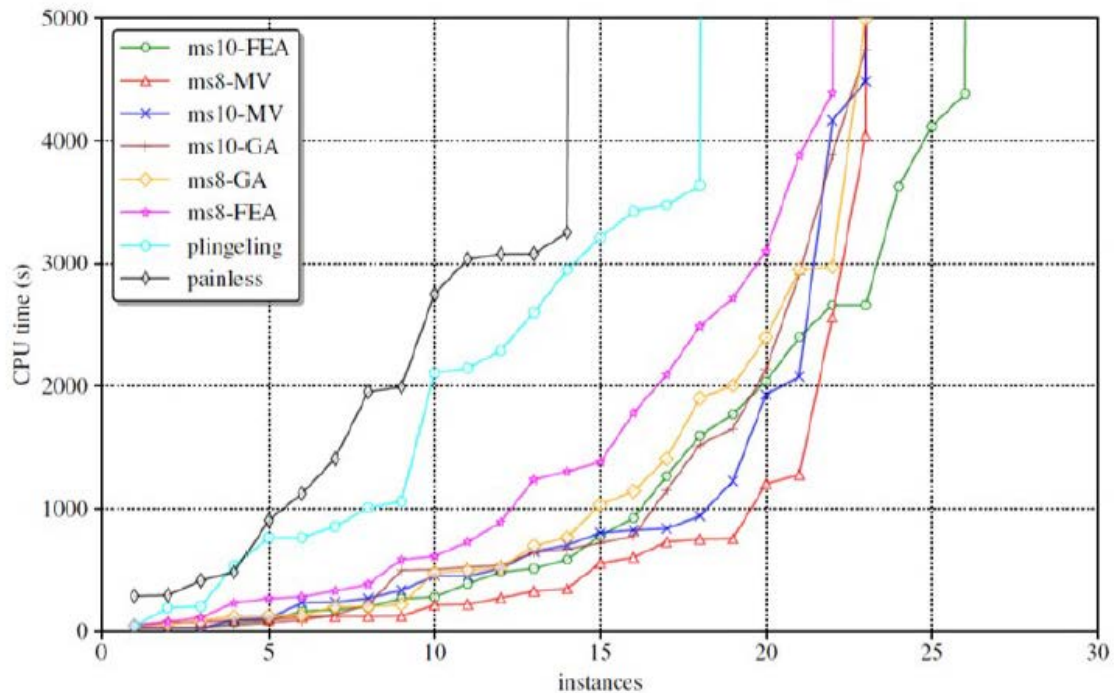


Рис.23. Сравнение эффективности различных алгоритмов на задачах обращения хеш-функций

*Авторы результата: к.т.н. И.В. Отпущенников, к.т.н. А.А. Семёнов*

## 10. Эвристики, нацеленные на повышение практической эффективности алгоритмов, ориентированных на построение разбиений трудных вариантов задачи о булевой выполнимости (SAT)

Разработанные эвристики используют информацию о пройденных точках пространства поиска и значениях целевой функции в них для приоритизации перспективных точек при обработке окрестностей текущих рекордов. Напомним, что при автоматическом построении разбиений трудных примеров SAT обычно применяются функции типа «черный ящик» (блэкбокс-функции), принимающие на вход описание подмножества переменных SAT-задачи и оценивающие их численно при помощи алгоритмов из класса методов Монте-Карло. При этом вычисление каждого значения целевой функции, как правило, обходится очень дорого. В силу особенностей задания целевой функции наиболее эффективные методы для её минимизации относятся к классу алгоритмов локального поиска и эволюционных вычислений. В рамках проведенных исследований были предложены две эвристики, которые



используют информацию о значениях целевой функции, полученных для ранее пройденных окрестностей пространства поиска с целью изменения порядка обработки точек из текущей окрестности. Вычислительные эксперименты показали, что предложенные эвристики позволяют существенно увеличить эффективность поиска разбиений трудных SAT-задач.

На рис. 24 представлены графики минимизации прогнозной функции для SAT-задач, кодирующих криптоанализ шифров Grain\_v1, Trivium, ASG-192 и Wolfram-256. Ось абсцисс соответствует времени (в секундах), которое прошло с начала работы алгоритма оптимизации, а ось ординат – значению целевой функции в секундах для одного ядра процессора. По графикам легко видеть, что алгоритм Hill Climbing, дополненный предложенными эвристиками, зачастую показывает эффективность на уровне или лучше, чем у (1+1)-EA.

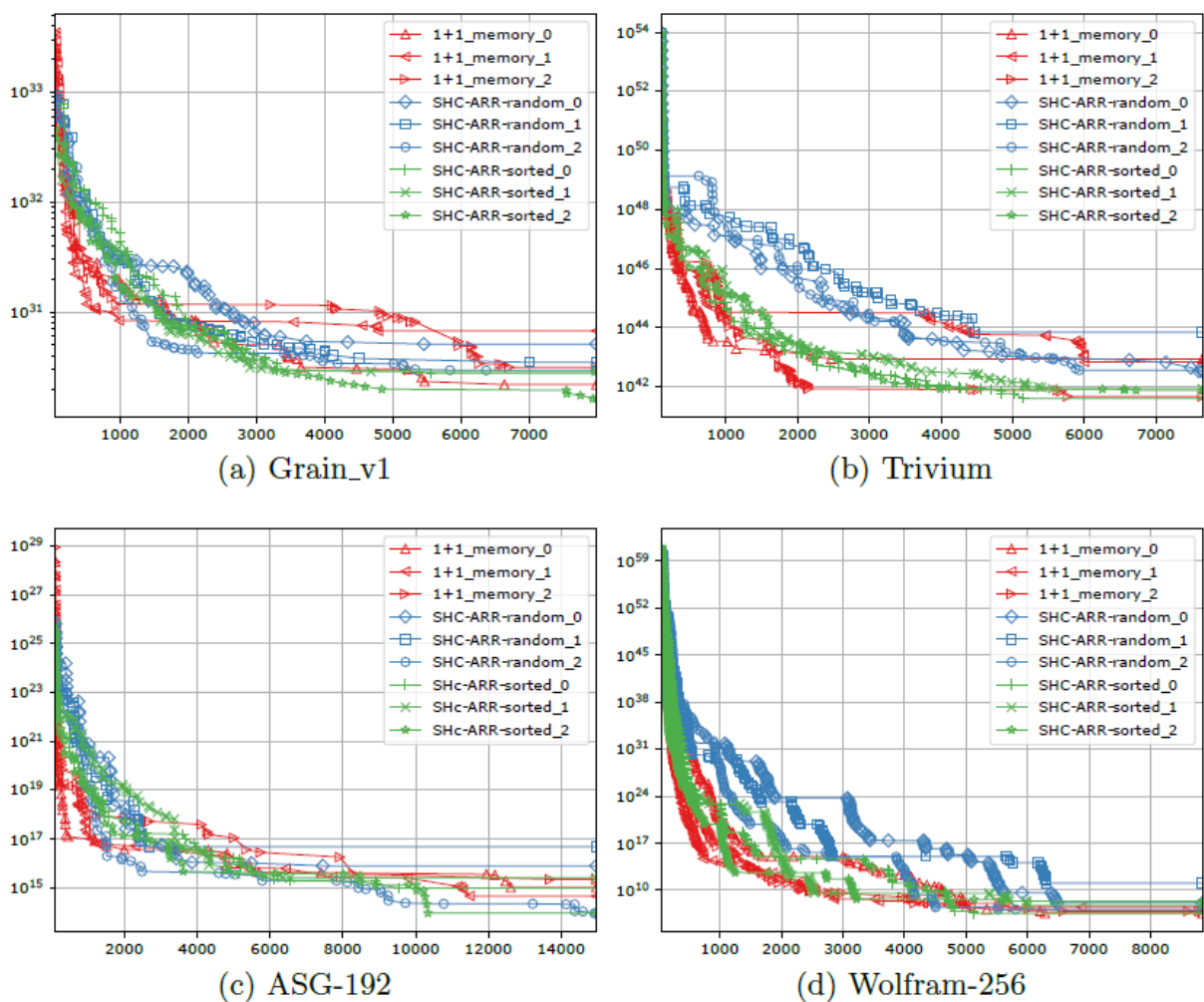


Рис. 24. Сравнение всех рассмотренных алгоритмов оптимизации. Ось X показывает количество вычислений целевой функции, прошедших с начала прогона, ось Y показывает обновления текущего наиболее известного значения целевой функции.

Для проведения вычислительных экспериментов использовался вычислительный кластер «Академик В.М. Матросов» Иркутского СКЦ.

Авторы результата: к.т.н. О.С. Заикин, С.Е. Кочемазов