



**РЕЗУЛЬТАТЫ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ  
ПО ПРОГРАММАМ СО РАН**

В соответствии с Планом НИР и Государственным заданием на 2019 год выполнялись исследования по 7 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*

Изучены правила вычисления плотностей борелевских мер, абсолютно непрерывных относительно положительной неатомической меры Радона. Борелевские меры порождены сложными функциями, которые зависят от определенных на отрезке непрерывных функций ограниченной вариации. Исследованы вопросы абсолютной непрерывности борелевских мер, порожденных сложными функциями, относительно положительной меры Радона и правила вычисления плотностей борелевских мер, порожденных сложными функциями, относительно положительной неатомической меры Радона (*автор: чл.-к. РАН А.А. Толстоногов*).

Рассмотрена дифференциально-алгебраическая система уравнений в частных производных второго порядка. Для такой системы построена сплайн-коллокационная разностная схема, основанная на аппроксимации искомой функции бикубическим сплайном, представленным в виде разложения по базису из нормализованных В-сплайнов (*автор: к.ф.-м.н. С.В. Свинина*).

Для нестационарных систем ДАУ исследован вопрос о робастной управляемости с возмущениями, заданными в виде матричных норм, присутствующими в матрицах при искомой вектор-функции и вектор-функции управления. Задача робастной управляемости заключается в нахождении условий, при которых возмущенная система (система с неопределенностью) сохранит свойства управляемости на некотором отрезке при наличии этого свойства у исходной (номинальной) системы. Получены достаточные условия робастной полной и R-управляемости нестационарных ДАУ. Системой ДАУ, к примеру, можно описать модель химического реактора изомеризации с внешним охлаждением (см. рис. 1). При этом параметры реактора, такие как концентрация, температура, скорость реакции, могут определяться с некоторыми погрешностями, что можно описать в виде неопределенности (*автор: к.ф.-м.н. П.С. Петренко*).



**Отчет Института динамики систем и теории управления  
имени В.М. Матросова СО РАН за 2019 г.**

Разработан и обоснован новый метод исследования асимптотического поведения решений неавтономных разрывных систем с измеримой по совокупности аргументов правой частью. Полученные результаты носят форму обобщений принципа инвариантности Ла-Салля с использованием функций Ляпунова со знакопостоянной производной. Полученные результаты применяются к исследованию механических систем с сухим трением в общей форме уравнений Лагранжа 2-го рода с параметрами, зависящими от времени (коэффициентами трения и инерции) (автор: д.ф.-м.н. И.А. Финогенко).

Предложены и обоснованы новые коллокационно-вариационные разностные схемы с несколькими точками коллокации первого и второго порядков. Их построение основано на решении специальных задач квадратичного программирования. Данные алгоритмы исследованы на жестком уравнении Далквиста на предмет А- и L-устойчивости. Проведено сравнение созданных методов с известными (методами типа Рунге-Кутты, классическими многошаговыми методами и др.) на ряде тестовых примеров. Данные расчеты показали преимущество предлагаемых схем, они просты в программной реализации и не требуют вычисления проекторов и производных входных данных. Были проведены численные эксперименты для ДАУ индекса не выше двух, у которых правая часть задана с возмущением в метрике С. Было выявлено, что коллокационно-вариационные схемы обладают свойством саморегуляризации. В качестве параметра регуляризации выступает шаг сетки, который выбирают из принципа невязки (авторы: д.ф.-м.н. М.В. Булатов, к.ф.-м.н. Л.С. Соловарова).

Рассмотрены системы дифференциально-алгебраических уравнений, возмущенные оператором Фредгольма. Для таких систем получены условия разрешимости и исследована устойчивость к возмущениям входных данных. В рамках теоремы существования построен численный метод на основе метода наименьших квадратов, доказана его сходимость (авторы: д.ф.-м.н. В.Ф. Чистяков, к.ф.-м.н. Е.В. Чистякова).

Рассмотрена динамическая система, состоящая из линейного закона сохранения и обыкновенного дифференциального уравнения, в который входит управляющий параметр. Подобные системы, как правило, используются для описания движения материальной точки, взаимодействующей с некоторым распределенным объектом. Для задачи оптимального управления такой системой найдено необходимое условие оптимальности в форме принципа максимума Понтрягина (автор: к.ф.-м.н. Н.И. Погодаев).

Рассмотрена система уравнений в частных производных, описывающая модель фазовых переходов с ограничением на фракцию фазы, зависящим от относительной температуры. Система состоит из уравнения баланса энергии с нелинейным источником тепла и уравнения фазовой динамики, учитывающего гистерезисный характер процесса. Доказано существование периодического решения для данной системы при минимально возможных требованиях на кривые, определяющие область гистерезиса (автор: к.ф.-м.н. С.А. Тимошин).

Разработана схема улучшения управления для негладкой задачи оптимального управления с терминальным функционалом, который задается произвольной липшицевой функцией. Метод основан на равномерной аппроксимации целевой функции квадратичной inf-конволюцией Моро-Иосиды, которая является как полувогнутой, так и DC-функцией с



гладкой выпуклой составляющей (тип квадрата нормы) и негладкой вогнутой. Такая структура аппроксимирующей функции позволяет использовать для итерационного улучшения управления аппроксимативный позиционный принцип минимума для субоптималей задачи, причем без предположения выпуклости множества скоростей динамической системы и введения обобщенных управлений (скользящих режимов). Предшествующие результаты охватывали только случай проксимально супердифференцируемой целевой функции или разности гладкой и выпуклой функций непосредственно в исходной постановке задачи (*автор: д.ф.-м.н. В.А. Дыхта*).

Изучены вопросы существования решения и получения условия оптимальности для разрывных управляемых процессов с гистерезисной нелинейностью. Рассмотрена задача оптимального управления с гистерезисной нелинейностью, заданной векторным Play оператором, и разрывными траекториями ограниченной вариации. Доказана теорема существования оптимального решения и предложен метод доказательства необходимых условий оптимальности. Предложено расширение Play оператора на входы ограниченной вариации и изучен вопрос разрешимости совместной системы, состоящей из дифференциального уравнения с мерой и дифференциального вариационного неравенства (*автор: к.ф.-м.н. О.Н. Самсонок*).

Рассмотрен класс нелинейных импульсно-гибридных систем в форме дифференциального уравнения в мерах с явным представлением скачков траекторий, задаваемым с помощью абстрактного замкнутого отношения односторонних пределов в точках скачка, без предположений типа робастности. Для таких систем и связанных с ними задач оптимального управления развит аппарат сингулярных пространственно-временных представлений. На основе последнего построено релаксационное расширение изучаемого класса систем в подходящей (достаточно слабой) топологии пространства функций ограниченной вариации. При стандартных предположениях регулярности показано существование решения задачи оптимального управления. Подход основан на разрывной замене времени и преобразовании разрывного решения в фазе импульса, согласованном с предложенным ранее методом аппроксимации траекторий импульсно-гибридной системы непрерывными процессами. Заметим, что для систем общего вида аппроксимация разрывной траектории требует наличия двух непрерывных процессов сравнения, приближающих односторонние пределы разрывной функции и независимых друг от друга (*авторы: к.ф.-м.н. Е.В. Гончарова, к.ф.-м.н. М.В. Старицын*).

Разработан и реализован численный метод приближенного решения задачи оптимального управления на основе нелокального условия оптимальности. Соответствующий алгоритм опирается на предварительное формирование набора успешно решенных задач с дальнейшей экстраполяцией заложенных в базе оптимальных решений. Рассматривается однопараметрическое семейство задач оптимального управления, по единственному параметру которого формулируется и решается набор точечных задач. С использованием традиционных нелокальных методик анализа данных на основе полученной «обучающей выборки» строятся приближения к решению целого семейства задач оптимального управления, каждая из которых соответствует определенному значению параметра. Для проверки качества сформированных приближений полученный результат



**Отчет Института динамики систем и теории управления  
имени В.М. Матросова СО РАН за 2019 г.**

используется как начальное значение в локальном алгоритме оптимизации, глубина спуска которого и может выступать в качестве оценки эффективности предложенного способа экстраполяции имеющихся точечных решений. Задачи оптимального управления в предложенной схеме решаются с использованием метода приведенного градиента, для построения нелокальной экстраполяции применяется метод Шепарда (*авторы: к.т.н. Т.С. Зароднюк, к.ф.-м.н. С.П. Сорокин*).

Разработанные алгоритмы апробированы при численном решении задач, полученных путем дискретизации прикладных задач оптимального управления с непрерывным временем. Для этой цели использовались как классические хорошо известные модели, так и их модификации, позволяющие генерировать дополнительные вычислительные трудности для разработанных алгоритмов: модель Видала-Вулфа оптимизации рекламной стратегии фирмы, модель экономического роста Мэнкью-Ромера-Вейла, неоклассическая модель экономического роста (модель Солоу) и другие. Исходные постановки хорошо изучены, в том числе аналитически, что позволило провести сравнение полученных с помощью разработанных алгоритмов результатов с известными решениями и убедиться в их эффективности для исследования управляемых динамических моделей (*авторы: к.т.н. Т.С. Зароднюк, д.т.н. А.Ю. Горнов, к.ф.-м.н. С.П. Сорокин, А.С. Аникин, П.С. Сороковиков*).

Реализованы модификации метода Л.С. Понтрягина, позволяющие находить нелокальные решения задач оптимального управления. Предлагаемый подход опирается на построение расширенной системы дифференциальных уравнений, включающей исходные и сопряженные уравнения. Для формирования соответствующей задачи Коши используются известные значения начальных фазовых координат и стартовые значения сопряженных переменных, выбираемые для двумерного случая с окружности единичного радиуса, для трехмерного – с единичной сферы. Для задач большей размерности с использованием технологии параллельного программирования Nvidia CUDA для графических ускорителей реализован стохастический способ генерации значений сопряженного вектора в начальный момент времени с дальнейшим параллельным запуском процедуры интегрирования динамической системы. Результаты проведенных экспериментов позволили продемонстрировать эффективность применения технологий распараллеливания вычислительных процессов для численного решения задач оптимального управления (*авторы: д.т.н. А.Ю. Горнов, А.С. Аникин, к.т.н. Т.С. Зароднюк*).

Разработана технология решения задач аппроксимации интегральной воронки для полиэдрально управляемых динамических систем. Эффективным подходом к исследованию подобных задач является метод стохастической аппроксимации в комбинации с алгоритмами генерации управляющих воздействий релейного типа с фиксированным числом точек переключения, использующийся для решения задач фазового оценивания и оптимального управления с ограничениями более простой структуры. Предложенная вычислительная технология включает также программные реализации методов интегрирования систем дифференциальных уравнений, генерации управляющих воздействий, глобальной оптимизации, а также обобщенные методы аппроксимации множества достижимости для задач с полиэдральными ограничениями на управляющие воздействия (*авторы: д.т.н. А.Ю. Горнов, к.т.н. Т.С. Зароднюк, А.С. Аникин, П.С. Сороковиков*).



**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

Построена гамильтонова теория для коллективных продольно-поляризованных бесцветных возбуждений (плазмонов) в высокотемпературной глюонной плазме. Для этого был применен 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, позволяющее упростить гамильтониан взаимодействия мягких глюонных возбуждений и тем самым определить новый эффективный гамильтониан. Развитый подход использован далее для построения кинетического уравнения бoльцмановского типа, которое описывает процесс упругого рассеяния коллективных продольно-поляризованных возбуждений в глюонной плазме и эффект так называемого нелинейного затухания Ландау. Проведено детальное сравнение эффективной амплитуды плазмон-плазмонного взаимодействия, найденной 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.

В рамках формализма Баба-Мадхаварао предложен самосогласованный подход вывода системы волновых уравнений четвертого порядка для описания частицы со спином  $3/2$ . Для этой цели были введены в рассмотрение дополнительный алгебраический объект, так называемый  $q$ -коммутатор и новый набор матриц  $\eta_\mu$  вместо исходных  $\beta_\mu$ -матриц. Было проведено соответствующее обобщение полученных результатов на случай присутствия в системе внешнего электромагнитного поля (авторы: д.ф.-м.н. Ю.А. Марков, д.ф.-м.н. М.А. Маркова, А.И. Бондаренко).

Предложен метод восстановления полей Бельтрами по известным из эксперимента интегральным данным (лучевым преобразованиям). Метод использует представление векторного поля в виде мультипольного разложения по векторным волновым функциям. Получены аналитические выражения лучевых преобразований для базисных векторных волновых функций. Коэффициенты разложения для модельного поля были вычислены с использованием регуляризованного метода наименьших квадратов (автор: д.ф.-м.н. А.Л. Баландин).

Построены новые точные и приближенные решения нелинейного уравнения теплопроводности, в том числе с источником (стоком), имеющие тип тепловой волны, которая движется по холодному (нулевому) фону с конечной скоростью. Точные решения получены путем редукции исходного нелинейного дифференциального уравнения с частными производными к обыкновенным дифференциальным уравнениям различного вида. Приближенные решения строятся двумя способами: а) с использованием авторского метода, основанного на гранично-элементном подходе; б) в виде степенных рядов, коэффициенты которых определяются при решении систем линейных алгебраических уравнений. Полученные результаты пригодны для сравнения как между собой, так и с ранее полученными решениями. Их анализ позволил сделать содержательные выводы о свойствах соответствующих тепловых волн. Кроме того, при построении рядов доказаны новые теоремы существования и единственности решений краевых задач для рассмотренных



**Отчет Института динамики систем и теории управления  
имени В.М. Матросова СО РАН за 2019 г.**

уравнений в классе аналитических функций (авторы: д.ф.-м.н. А.Л. Казаков, к.ф.-м.н. П.А. Кузнецов).

Была расширена модель со скалярным и псевдоскалярным секторами взаимодействия с включением векторных и аксиально-векторных частиц. Показано, что в результате смешивания между псевдоскалярными мезонами и продольной компонентой аксиально-векторных состояний, псевдоскалярные состояния приобретают дополнительную компоненту. Такое смешивание не меняет природу пиона как частицы Голдстоуна, а вклад дополнительной компоненты в константу слабого распада пиона представляет собой небольшую поправку к вкладу основной структуры. Исследования адронных поправок в аномальный магнитный момент от процесса рассеяния света на свете считаются важными благодаря утверждению Мельникова и Вайнштейна, что аксиально-векторные мезоны могут давать заметный вклад. Однако расчеты в нелокальной киральной кварковой модели показали, что такой сценарий не выполняется, и вклад аксиально-векторных мезонов существенно меньше вклада псевдоскаляров (автор: к.ф.-м.н. А.Е. Раджабов).

Исследован бесконечный класс многократных сумм, возникающих в непрерывном пределе дифференциально-разностных эволюционных уравнений. Доказан ряд утверждений о представлении этих сумм соответствующими многочленами. Полученные результаты обобщают известные классические результаты для обычных сумм степеней последовательных натуральных чисел (автор: к.ф.-м.н. А.К. Свинин).

Изучена нелинейная система двух дифференциальных уравнений эллиптического типа с нелинейностями, зависящими от произведения степеней искомых функций

$$\Delta\psi = \psi F(\psi^\alpha a^\beta), \quad \Delta a = aG(\psi^\alpha a^\beta), \quad (1)$$

где  $\alpha + \beta \neq 0$ ,  $\alpha, \beta$  – произвольные параметры. Получены условия, при выполнении которых систему (1) удастся свести к одному уравнению. Доказана соответствующая теорема редукции. Выделены случаи правых частей системы (1), для которых найдены классы точных решений, выражаемых через элементарные и гармонические функции, и решения известного уравнения Лиувилля.

Исследована система двух нелинейных уравнений в частных производных четвертого порядка. Правые части системы уравнений содержат многомерные аналоги уравнения Буссинеска, выражаемые через двукратные операторы Лапласа и квадраты градиентов искомых функций, а также линейные функции взаимосвязи. Точные решения отыскиваются в виде анзаца, содержащего квадратичную зависимость от пространственных переменных и произвольные функции от времени. Использование предложенного анзаца позволяет декомпозировать процесс отыскания компонент решения, зависящих от пространственных переменных и от времени. Найдено общее решение этой системы уравнений в параметрическом виде. Для отыскания компонент решения исходной системы, зависящих от времени, возникает система нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений. Эта система сведена к одному уравнению четвертого порядка, для которого найдены частные решения. Приводится ряд примеров точных решений исходной системы уравнений типа Буссинеска, в том числе выражаемые через функции Якоби по времени и анизотропные по пространственным переменным.

Рассмотрена система реакции-диффузии, моделируемая двумя нелинейными уравнениями в частных производных параболического типа со степенными нелинейностями. Построено семейство точных решений, выражаемых через полиномы второй степени по пространственным переменным и функции времени, удовлетворяющие линейным обыкновенным дифференциальным уравнениям. Найдены условия, выделяющие из этого



семейства периодические по времени точные решения системы реакции-диффузии (автор: к.ф.-м.н. Э.И. Семенов).

Рассмотрен вклад в электрический дипольный момент (ЭДМ) нейтрона за счет CP-нарушенных распадов  $\eta$  и  $\eta'$  мезонов в пару  $\pi$ -мезонов. В рамках псевдоскалярного подхода взаимодействия псевдоскалярных мезонов и нуклонов данный вклад генерируется за счет двухпетлевого вклада. Получена зависимость ЭДМ нейтрона от констант распада CP-нарушенного перехода  $\eta$ - и  $\eta'$ - мезонов в пару  $\pi$ -мезонов. Вклад CP-нарушенных распадов  $\eta$ - и  $\eta'$ - мезонов вычислен с учетом как электрического заряда, так и магнитных моментов нуклонов. Показано, что вклад, генерируемый за счет магнитных моментов нуклонов, подавлен по сравнению с вкладом за счет учета взаимодействия внешнего электромагнитного тока с заряженными нуклонами или  $\pi$ -мезонами. Ограничения, полученные на ширину распада  $\eta$ - и  $\eta'$ - мезонов в пару  $\pi$ -мезонов из данных по измерению ЭДМ нейтрона, в  $10^{12} - 10^{14}$  раз меньше, чем верхняя граница на данный распад, полученная коллаборацией LHCb в 2016 году. Используя соотношение между константой связи CP-нарушенных распадов  $\eta$  и  $\eta'$  мезонов в пару пионов и  $\theta$ -углом вакуума квантовой хромодинамики, из правила сумм была сделана оценка сверху на величину CP-нарушения в секторе сильного взаимодействия (автор: к.ф.-м.н. А.С. Жевлаков).

Проведено исследование численного метода решения уравнения осцилляции нейтрино в среде при помощи разложения Магнуса. Целью исследования ставились реализация алгоритма M4 и оценка его чувствительности к вариации параметров. Разложение Магнуса представляет собой разложение матричной экспоненты от оператора, зависящего от параметра, при условии, что этот оператор при разных значениях параметра не коммутирует сам с собой. Такие задачи возникают при решении уравнений типа Шредингера, в частности, при исследовании осцилляций нейтрино в среде. Рассматривались две модели: Солнца и сверхновой, заданных профильными функциями плотности. Внешними параметрами моделей выступали углы смешивания нейтрино, квадраты разности масс нейтрино, управляющий параметр алгоритма. На рис. 27 и 28 представлено сравнение работы данного алгоритма с результатами работы алгоритма других авторов.

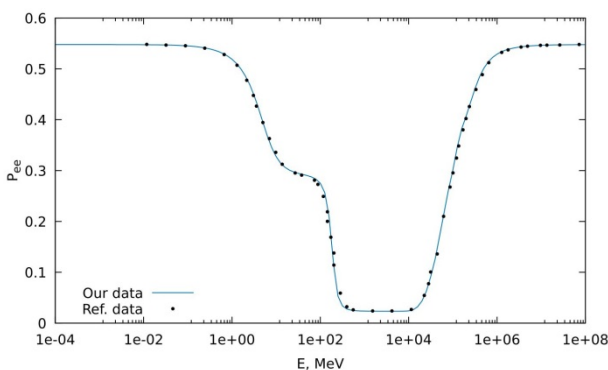


Рис. 27. Модель Солнца

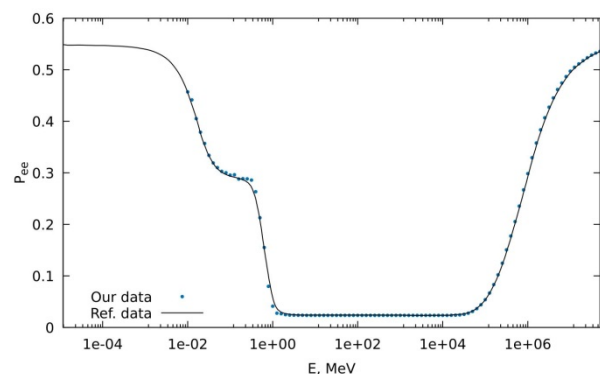


Рис. 28. Модель сверхновой

В качестве промежуточного результата можно сделать вывод о том, что изменение углов смешивания оказывает влияние на разных интервалах диапазона энергии нейтрино, можно выбрать оптимальное значение для «управляющего» параметра алгоритма, не приводящее к нестабильности результата в силу особенностей численных расчетов с использованием «плавающей» арифметики (автор: к.ф.-м.н. В.П. Ломов).



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

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

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

С помощью разработанного ранее программного обеспечения исследована динамика вращательного движения по круговой орбите спутника-гиростата в центральном ньютоновском поле сил. Рассмотрен общий случай произвольного расположения постоянного вектора гиросtatического момента системы с главными центральными моментами инерции гиростата, не равными друг другу. В символьном виде на компьютере построены линеаризованные уравнения возмущенного движения в окрестности относительного равновесия системы, и получены необходимые условия его устойчивости (*автор: к.ф.-м.н. А.В. Банщиков*).

Гиростат движется в центральном ньютоновском поле сил вокруг притягивающего центра так, что его центр масс перемещается по кеплеровой круговой орбите с постоянной орбитальной угловой скоростью. В соответствующем трехмерном евклидовом пространстве с использованием специальных агрегированных параметров предлагается относительные равновесия системы (состояния покоя в орбитальной системе координат) определять по координатам точек пересечения двух пар соответствующих гиперболических цилиндров со сферой единичного радиуса. Показано, что при любой величине гиросtatического момента и других параметрах системы имеется, по крайней мере, восемь различных относительных равновесий (*автор: к.ф.-м.н. С.В. Чайкин*).

Для двух различных пучков (конечных, счетных или даже континуальных) нелинейных динамических процессов типа «траектория, управление», индуцированных в сепарабельном гильбертовом пространстве некоторой заданной нестационарной гиперболической системой, но с разными полилинейными регуляторами, получены достаточные условия разрешимости задачи реализации оператор-функций общего (инвариантного) полилинейного регулятора, при наличии которого в структуре данной гиперболической системы объединение этих динамических пучков представляет фиксированное семейство ее допустимых решений. Исследование проведено на основе изучения свойства полуаддитивности нелинейного функционального оператора Релея–Ритца (*авторы: д.ф.-м.н. А.В. Лакеев, д.ф.-м.н. В.А. Русанов*).

На базе модификации функционального оператора Релея–Ритца для непрерывной нелинейной бесконечномерной управляемой бихевиористической системы (динамической системы Я. Виллемса) получены (в форме принципа максимума энтропии) необходимые и достаточные условия существования шести нестационарных операторов модели дифференциальной реализации этой системы в классе обыкновенных дифференциальных уравнений второго порядка (в том числе гиперболической) с фиксированной билинейной структурой в сепарабельном гильбертовом пространстве (*авторы: д.ф.-м.н. А.В. Лакеев, д.ф.-м.н. В.А. Русанов*).

Исследована задача вычисления предпочтительной системы дифференциальной реализации в семействе подобных моделей «объект–регулятор–наблюдатель», индуцированных группами преобразований над идентифицированной динамической





системой второго порядка. Получены теоремы существования трансформирующей матрицы (апостериорного базиса конфигурационного пространства) в группах преобразований  $GL_n(\mathbb{R})$  и  $SO_n$ , обеспечивающей минимум рассогласования матрицы позиционных сил от ее эталонно-нормативных (расчетных) параметров. На основе теории Морса построено нелинейное матричное характеристическое уравнение оптимального процесса  $SO_n$ -юстировки. Результаты статьи имеют приложения в дифференциальном прецизионном моделировании вынужденных колебаний, генерируя постановки в бесконечномерном случае (автор: д.ф.-м.н. В.А. Русанов).

На основе обобщений метода Рауса-Ляпунова и применения методов компьютерной алгебры проведен качественный анализ уравнений движения волчка Ковалевской в двойном постоянном поле сил. Задача решалась в исходном фазовом пространстве системы. В рамках проведенного исследования установлено, что в случае параллельных силовых полей уравнения движения тела имеют семейства перманентных вращений, в случае ортогональных – движения маятникового типа, при специальной ориентации силовых полей – семейства положений равновесия. Показано, что решения принадлежат либо одному из двух инвариантных многообразий коразмерности 2, либо их пересечению. Для найденных решений получены необходимые и достаточные условия устойчивости по Ляпунову (авторы: д.ф.-м.н. В.Д. Иртегов, к.т.н. Т.Н. Титоренко).

Рассматривалась задача о вращательном движении твердого тела с неподвижной точкой под действием сил, порожденных эффектом Барнетта-Лондона, а также потенциальных сил. Предложен алгоритм нахождения линейных инвариантных многообразий (ИМ) уравнений движения тела, опирающийся на методы компьютерной алгебры. При помощи данного алгоритма получены ИМ коразмерности 1, которые использовались при качественном анализе уравнений. Найденны перманентные вращения тела (и их семейства), а также ИМ, которым эти движения принадлежат. Для ряда решений получены достаточные условия устойчивости по Ляпунову или доказана их неустойчивость (авторы: д.ф.-м.н. В.Д. Иртегов, к.т.н. Т.Н. Титоренко).

Предложено несколько алгоритмов построения нелинейных комбинаций первых интегралов задачи для качественного анализа консервативных систем с помощью метода Рауса-Ляпунова. Среди них построение огибающей линейной связки интегралов, аналогичная задача для интеграла, найденного с помощью цепочки дифференциальных следствий уравнений движения, получение такой комбинации с помощью поднятия в исходное фазовое пространство первого интеграла уравнений движения на инвариантном многообразии и другие. На задачах о движении твердого тела, системы твердых тел, твердого тела в жидкости, расширении газового облака, уравнений Эйлера на алгебрах Ли показано, что предлагаемое расширение разнообразия первых интегралов позволяет получить новые результаты при качественном анализе систем с первыми интегралами (авторы: д.ф.-м.н. В.Д. Иртегов, к.т.н. Т.Н. Титоренко).

В задаче о вращении твердого тела вокруг неподвижной точки вторым методом Ляпунова с применением системы аналитических вычислений проведено исследование устойчивости некоторых стационарных движений нелинейной механической автономной консервативной системы, допускающей частный интеграл Гесса.

Установлена устойчивость состояния покоя в случае, когда центр масс расположен ниже начала координат и неустойчивость в ином случае.



Для перманентного вращения показано выполнение необходимых условий устойчивости в исключительных случаях, когда характеристическое уравнение, составленное по матрице правой части дифференциальных уравнений возмущенного движения, допускает четыре нулевых корня. Построением функции Ляпунова связкой Четаева из первых интегралов возмущенного движения установлена формальная устойчивость выделенного перманентного вращения (*автор: д.ф.-м.н. М.А. Новиков*).

Получены необходимые и достаточные условия внутренней устойчивости формаций, динамика которых определяется линейными дифференциальными уравнениями. При этом в качестве классов допустимых управлений для лидеров выбраны программные управления, а для объектов, имеющих ведущих – аффинные обратные связи, зависящие от состояния самого объекта и состояний его ведущих. Полученные условия легко проверяемы и состоят из требований стабилизируемости пары матриц для уравнений ведомых объектов, гурвицевости и совпадения матриц для лидеров в случае многолидерности, разрешимости некоторых линейных уравнений и ограничений типа равенств на вектора, задающие требуемое взаимное расположение между ведомым и ведущим. Кроме того, описан весь класс управлений, обеспечивающих выполнение свойства линейной внутренней устойчивости.

Опираясь на полученные условия, удалось показать, что внутренней устойчивостью могут обладать практически только однолидерные формации.

В классе формаций с одним лидером выделен подкласс (формации, граф которых является входящим деревом), в котором не возникает ограничений типа равенств, являющихся основным препятствием для внутренней устойчивости многолидерных формаций (*автор: д.ф.-м.н. А.В. Лакеев*).



#### IV. ИНФОРМАТИКА И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

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

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

Координатор программы: ак. И.В. Бычков

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

№ гос. регистрации АААА-А17-117032210078-4

Научный руководитель – ак. И.В. Бычков

Разработан нехорновский язык логического программирования, основанный на исчислении позитивно-образованных формул (ПОФ). Командный интерпретатор разработан как система управления конструктивным логическим выводом (ЛВ) в исчислении ПОФ. Общая схема работы интерпретатора представлена на рис. 29.

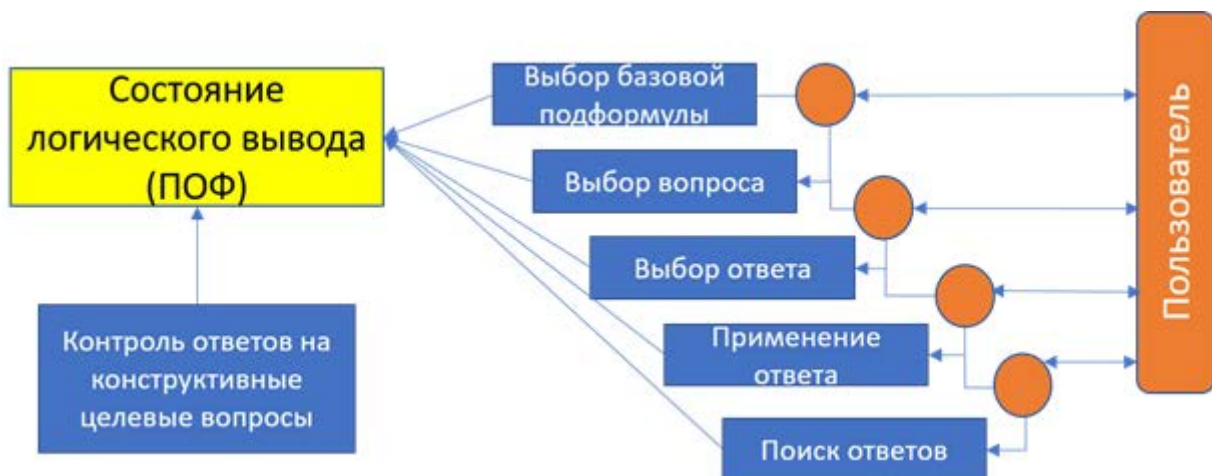


Рис. 29. Общая схема работы интерпретатора

Каждый шаг логического вывода разбит на несколько составляющих этапов: выбор базовой подформулы; выбор вопроса к данной базовой подформуле; выбор ответа на этот вопрос; применение данного ответа; поиск ответов на все вопросы ПОФ с учетом новой добавленной информации. Каждый из этих этапов можно регулировать командным интерпретатором. Для этого перед выполнением каждого этапа система выводит возможные варианты, и пользователь может выбрать конкретный вариант либо дать возможность выбора машине вывода.

Подсистема конструктивного логического вывода основана на принципе моделирования теории (логической формализации решаемой задачи), используя прямой ЛВ,



а не обратный, как в системе логического программирования Пролог. Для конструктивного вывода в формулах с дизъюнктивным ветвлением используются два типа целевых вопросов: конструктивные и неконструктивные. Ответ на конструктивный целевой вопрос означает отбраковку текущей ветви базовой подформулы, как одного из прогнозируемых вариантов развития моделируемой теории. Ответ на неконструктивный целевой вопрос означает, что одно из решений найдено, и оно находится в текущей ветви. Для конструктивного доказательства необходимо, чтобы все ветви были опровергнуты конструктивными целевыми вопросами и только одна – неконструктивными.

Примеры логических теорий, применяющихся для тестирования известных систем индуктивного логического программирования, были адаптированы под исчисление ПОФ. Данные примеры послужили основой для создания прототипа базы знаний, содержащей формулы нехорновского типа, получаемые путем добавления фиктивных ветвлений, которая была использована для тестирования разработанной системы (*авторы: А.В. Давыдов, А.А. Ларионов*).

**Методы и алгоритмы качественного исследования многокомпонентных дискретно-событийных систем.** Исследованы многокомпонентные дискретно-событийные системы (ДСС) как высокоуровневые модели сложных технических систем. В рамках теории супервизорного управления ДСС подобные системы допускают применение децентрализованного управления, реализуемого набором локальных супервизоров, каждый из которых наблюдает часть поведения системы и управляет подмножеством всех управляемых событий системы. Для автоматного представления систем и ограничений на их поведение для ряда широко применяемых способов построения абстракций конечных автоматов оригинальным методом логико-алгебраических уравнений получены условия сохранения свойств управляемости и ко-наблюдаемости языка спецификации как условий существования децентрализованного супервизора. Полученные результаты позволяют снизить вычислительную сложность алгоритмов теории супервизорного управления ДСС, поскольку управляемость и ко-наблюдаемость требуют проверки каждый раз при корректировке спецификации, а эффективность известных полиномиальных алгоритмов проверки ко-наблюдаемости существенным образом зависит от размерности автоматов, описывающих функционирование системы (*автор: к.ф.-м.н. Н.В. Нагул*).

**Информационно-коммуникационная технология обеспечения взаимодействия автономных распределенных компонент гетерогенной робототехнической группировки при выполнении динамических миссий.** Предложен общий подход к организации управления разнородной группой автономных роботов при выполнении длительных динамических миссий в условиях ограниченной коммуникации. Предложенный подход основывается на принципе групповых рандеву, когда планирование миссий осуществляется в два последовательных этапа: сначала на основании ограничений верхнего уровня строится (во времени и пространстве) последовательность запланированных групповых сборов, движение роботов между которыми регулируется уже планировщиками более низкого уровня с учетом решающихся роботами конкретных задач. Составление такого расписания групповых сборов осуществляется на основании запланированных действий роботов и прогнозируемых событий с учетом текущего состояния группы. Такой подход позволяет обеспечить движение группы сразу несколькими важными свойствами, такими как коммуникационная устойчивость, децентрализованность механизмов планирования,



возможность учета ограничений различной природы.

Важным аспектом эффективной работы группы в рамках предложенного двухуровневого подхода являются коммуникационные сессии, которые проводятся на каждом групповом сборе и являются связующим звеном между двумя уровнями управления, а также обеспечивают возможность оперативной корректировки групповой стратегии при возникновении такой необходимости. Предложена технология (схема и протоколы) передачи данных по коммуникационной сети роботов, которая путем последовательного обмена обновляемой базой знаний позволяет осуществлять эффективную (максимальная скорость и минимальные потери за счет передачи на преимущественно короткие расстояния) актуализацию всей информации внутри действующей группы в условиях ограниченной коммуникации и без необходимости установки связи между каждой парой роботов напрямую. Разработано сервисное приложение для обмена данными между агентами в моделирующем комплексе, протестированы различные форматы сообщений (авторы: М.Ю. Кензин, ак. И.В. Бычков, Д.А. Костылев).

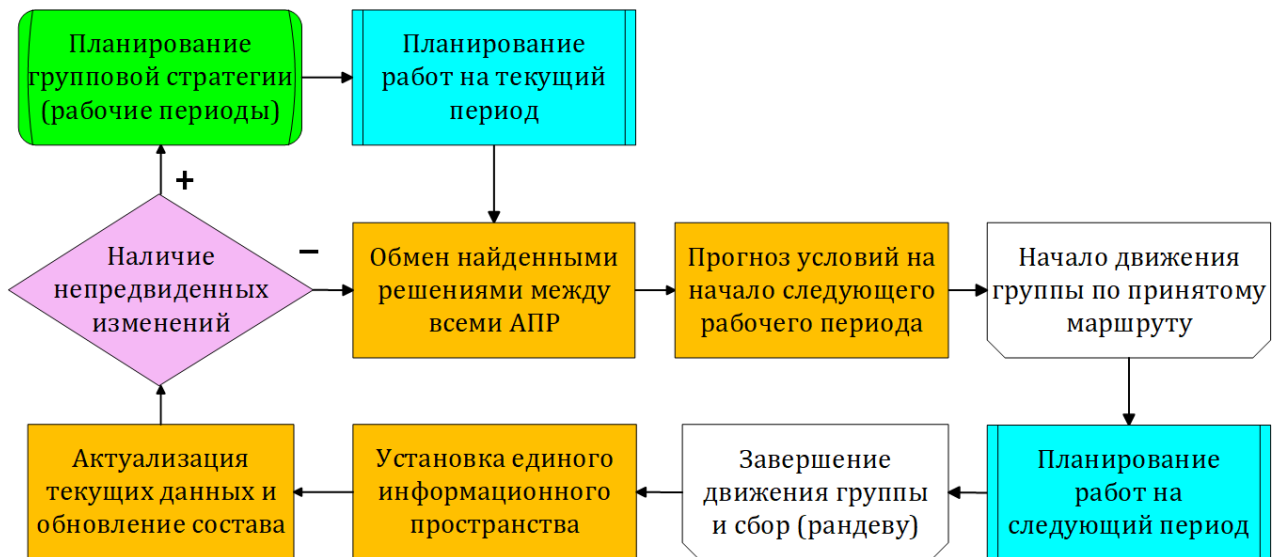


Рис. 30. Блок-схема режимов автономного функционирования группы при выполнении миссии на основе разработанного подхода (зеленый блок – планировщик верхнего уровня, голубые блоки – планировщик нижнего уровня, оранжевые блоки – коммуникационная активность)

**Управления формациями АПР с изменяемым лидером в условиях неизвестной среды.** Разработан подход к управлению формациями автономных подводных роботов (АПР) в условиях неизвестной внешней среды. В рамках данного подхода разработаны алгоритм формирования ситуационной модели внешней среды с использованием данных, получаемых от локатора секторного обзора, механизмы определения лидера формации посредством анализа построенной модели и численного решения некоторой квадратичной задачи оптимизации, а также цифровые алгоритмы управления АПР для различных режимов функционирования группы в условиях изменяющегося лидера. В отличие от известных решений разработанный подход не требует непрерывной коррекции траектории движения каждого АПР и не предъявляет особых требований к форме препятствий, в нем для вычисления управляющих команд АПР используют информацию лишь об ограниченной части окружающего пространства. Разработанные цифровые алгоритмы управления



формациями, в отличие от большинства известных в литературе, учитывают возможности АПР обеспечивать требуемую динамику группы и ограничения на ресурсы управления. Кроме того, стоит отметить, что они не требуют непрерывного измерения параметров движения АПР и значительных вычислительных ресурсов, что упрощает их реализацию на борту.

С использованием программно-аппаратного комплекса, разрабатываемого в ИДСТУ СО РАН на базе роботов Lego EV3, отработана групповая миссия, предполагающая сбор группы в указанной области пространства и дальнейшее ее движение с сохранением заданного строя. Каждый робот выполняет следующую последовательность элементарных действий: 1) определение его роли в заданной формации с вычислением начального положения в окрестности точки сбора группы; 2) перемещение в область сбора группы; 3) в зависимости от назначенной роли выполнение одного из двух действий: отработка команд от оператора (для робота-лидера); движение за установленным на лидере инфракрасным маяком с сохранением желаемого положения относительно него (для робота-ведомого). Результаты экспериментов по отработке описанной миссии представлены на рис. 31 (авторы: к.т.н. С.А. Ульянов, к.т.н. Н.Н. Максимкин, А.А. Толстихин, Д.А. Костылев).

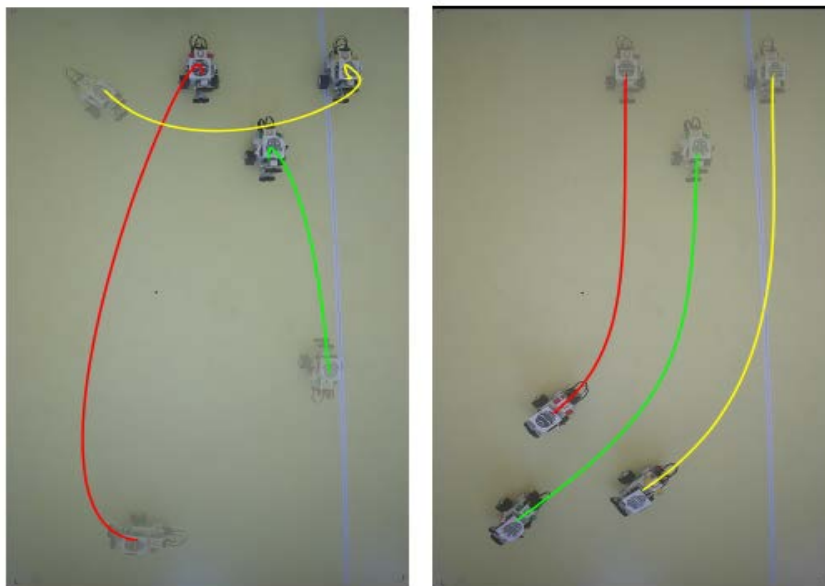


Рис. 31. Результаты экспериментов по отработке групповой миссии.  
Слева – траектории движения роботов при сборе группы;  
справа – при следовании вдоль траектории, определяемой командами оператора

**Развитие теории управления сложными мультиагентными системами.** Изучается система нелинейных дифференциальных уравнений параболического типа, рассматриваемая в качестве распределенной математической модели процесса обследования трехмерного пространства взаимодействующими роботами двух типов. Построены параметрические семейства точных решений, которые могут использоваться для формирования управления процессом обследования за счет создания нужных плотностей на границе области, являющейся базой для роботов (автор: к.ф.-м.н. А.А. Косов).

Разработаны новые методы обеспечения надежности выполнения масштабируемых приложений в гетерогенных вычислительных сетях.



Разработана новая технология создания сервис-ориентированной мультиагентной системы управления высокопроизводительными проблемно-ориентированными вычислениями с распределением ресурсов на уровне приложения пользователя в гетерогенной вычислительной сети.

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

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

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

**Сервисы и инструментальные средства поддержки декомпиляции и анализа программного кода, анализа и сопоставления данных, автоматизации создания кроссплатформенных проблемно-ориентированных систем.** Реализованы новые способы представления и редактирования данных в настраиваемых при помощи спецификаций приложений БД ARMax. Реализованы новые виды правил генерации объектов карты по содержащимся в БД координатам: поддержано создание точечных, линейных и площадных объектов с фиксированным количеством точек по координатам, содержащимся в полях основной записи. Поддержана также работа с географическими координатами объектов (широта, долгота в градусах). Для реализации версии системы ГеоАРМ для различных платформ поддержана работа с кроссплатформенной библиотекой компонентов доступа к данным FireDAC (*авторы: к.т.н. А.Е. Хмельнов, к.т.н. А.С. Гаченко, к.т.н. Е.С. Ферреферов*).

**Прототип декомпилятора программного кода файлов DCU.** Разработан прототип декомпилятора объектного кода DCU, который позволяет в автоматическом режиме получать семантически эквивалентный и близкий синтаксически исходный код на языке Delphi. Для восстановления высокоуровневых операторов языков программирования предложен метод, основанный на анализе дерева доминионов. Основная особенность данного метода заключается в том, что он позволяет выделять в уграфе области определенного вида: с одним узлом вхождения потока управления и одним узлом передачи управления. Это дает возможность сформировать библиотеку шаблонов графов, соответствующих высокоуровневым операторам Delphi, которые они порождают в процессе компиляции (*автор: к.т.н. А.А. Михайлов*).

**Методика преобразования онтологических описаний в структуры UML с последующей их интерпретацией в виде программного кода.** На основе технологий LOD, UML, Protege, MDA, LogTalk создана методика идентификации моделей информационных систем (ИС), где в качестве исходных данных (вычислительно-независимой модели, CIM-модели) выступает описание предметной области в виде набора диаграмм SysML, представляющих информационные объекты предметной области. Источниками могут также выступать результаты анализа документов, откуда приобретает информация об объектах предметной области, например, реквизитах организации из документов, где эти реквизиты были использованы, результаты семантического анализа таблиц в PDF-документах и таблиц



Excel.

В результате проведенных исследований построена новая методика логического анализа вычислительно-независимых моделей и преобразования их в платформо-независимые модели, представляемые в виде диаграмм классов UML. Методика успешно протестирована в задаче визуализации, анализа структуры и трансформации системы объектов конфигурации 1С (*автор: к.т.н. Е.А. Черкашин*).

**Методы автоматизированного формирования сценариев использования сервисов.**

Часто решение задачи может требовать многократного вызова сервисов, при этом пользователю приходится придерживаться определенной последовательности вызова сервисов, вводить одни и те же значения параметров для каждого сервиса и т.д. Для автоматизации работы пользователя требуется создание композиции Web-сервисов или частный случай вычислительной цепочки сервисов. Создание композиции сервисов – достаточно сложный процесс, требующий навыков программирования от пользователя.

В результате проведения исследований в рамках блока разработаны методы автоматизации построения вычислительных цепочек, которые впервые позволяют автоматизировать и формировать композиции сервисов и данных на основе анализа метаданных и статистических данных. Построение вычислительных цепочек на основе статистических данных о применении сервисов пользователями позволяет автоматизировать часто повторяющиеся действия пользователя (*авторы: к.т.н. Р.К. Федоров, к.т.н. А.К. Попова, к.т.н. Ю.В. Авраменко*).

**Методологическое и инструментальное обеспечение поддержки процессов трансформации неструктурированных данных из произвольных таблиц.** Разработано методологическое и инструментальное обеспечение трансформации иерархических (древовидных) структур табличных заголовков, характерных для статистических отчетов Росстата. Сформулированы подходы к решению следующих задач трансформации структур табличных заголовков: 1) очистки структуры и содержания заголовков; 2) аннотирование заголовков и восстановление измерений; 3) формирование целевого представления в структурированной форме. Ожидается, что в дальнейшем полученные результаты могут быть использованы в составе инструментального программного обеспечения автоматизации ввода информации из неструктурированных табличных документов в целевые базы данных.

Очистка структуры обеспечивает дедупликацию заголовков в исходной иерархии для того, чтобы в целевом структурном описании таблицы исключить повторы. Очистка естественно-языкового содержания заголовков позволяет приводить заголовки исходной иерархии, разделяющие общее семантическое значение, но различающиеся по написанию, к эталонной форме.

Для повышения качества табличных данных и обеспечения возможности установления взаимно-однозначных соответствий между пользовательскими данными и данными из классификаторов предложена методика поиска и исправления опечаток и ошибок в пользовательских данных проводится на основе комплексного подхода, включающего нечеткое и фонетическое сравнения строк. Для повышения качества очистки был использован комплексный подход, совмещающий нечеткое сравнение строк и фонетическое кодирование (*авторы: к.т.н. А.О. Шигаров, к.т.н. В.В. Парамонов, к.т.н. А.А. Михайлов*,





*В.В. Христюк).*

**Новое инструментальное программное обеспечение поддержки процессов трансформации неструктурированных данных из произвольных таблиц.** Спроектирована и реализована программная инструментальная библиотека поддержки разработки программного обеспечения трансформации данных из произвольных таблиц с иерархиями заголовков к плоским файловым базам данных с реляционной структурой, включая очистку и отслеживание изменений трансформации иерархий заголовков. Изучен и формализован процесс разработки программного обеспечения трансформации табличных данных со специфицируемой компоновкой, форматированием и содержанием, базирующийся на исполнении наборов правил анализа и интерпретации произвольных таблиц, выраженных на языке правил «Jess». Рассмотрены и реализованы основные операции анализа (ролевого и структурного) и интерпретации произвольных таблиц: очистки структуры и содержания иерархий заголовков, аннотирование заголовков и восстановления измерений, формирования целевого представления.

Реализованное средство обеспечивает исполнение таких правил в среде «Jess Rules». Получаемые в результате такой трансформации плоские файловые базы данных могут подвергаться дальнейшей материализованной интеграции данных для приведения к целевой схеме данных. В отличие от известных аналогов, специфицирующих отображения между исходной и целевой схемой, предлагаемое нами решение позволяет выражать продукционные правила анализа и интерпретации произвольных таблиц на языке «Jess». Экспериментально показано, что разработанная библиотека позволяет разрабатывать программное обеспечение для трансформации произвольных таблиц, ориентированных на целевые компоновочные формы иерархий заголовков. Разработан веб-ориентированный пользовательский интерфейс, обеспечивающий загрузку исходных электронных таблиц, вывод результатов трансформации их данных и журналирование этого процесса (*авторы: к.т.н. А.О. Шигаров, к.т.н. В.В. Парамонов, к.т.н. А.А. Михайлов, В.В. Христюк*).

**Алгоритм согласования знаний экспертов при решении мультидисциплинарных задач.** Предложен метод согласования мнений (знаний) экспертов при решении мультидисциплинарных задач на основе онтологической модели проблемной области, а также методов группового выбора. Новизной метода является обеспечение возможности формирования модели мультидисциплинарной задачи и ее решения, согласованные экспертами различных предметных областей. Модель задачи описывает понятия, закономерности предметной области и методы ее решения. Алгоритм является составной частью информационной технологии решения меж- и дисциплинарных задач обеспечения техногенной безопасности на основе самоорганизации (*авторы: д.т.н. А.Ф. Берман, д.т.н. О.А. Николайчук, к.т.н. А.Ю. Юрин, Г.С. Малтугова*).

**Исследовательский прототип инструментального средства создания агентных имитационных моделей.** Разработан исследовательский прототип, обеспечивающий создание агентных имитационных моделей с использованием декларативных спецификаций. Прототип был создан на основе авторской программной платформы для разработки систем, основанных на знаниях. В процессе создания инструментального средства базовая архитектура платформы была расширена служебным компонентом визуального



программирования  $K^{Опер}$  и прикладными компонентами для визуального управления процессом создания спецификации АИМ  $K^{агент}$ , проведения вычислительных экспериментов  $K^{эксп}$ , а также интерпретации спецификации АИМ  $K^{АИМ}$ .

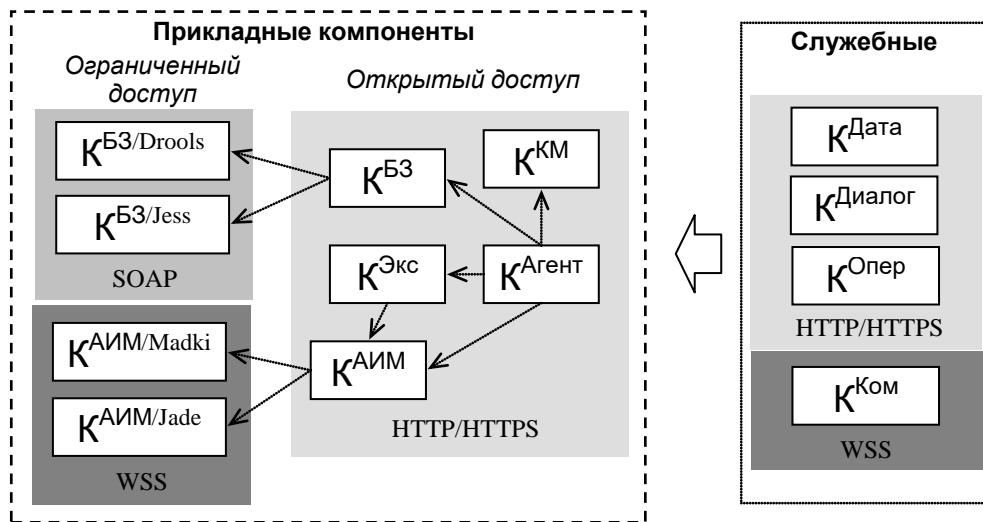


Рис. 32. Архитектура инструментального средства

Инструментальное средство реализует предложенные авторами методы описания как методологии проектирования агентных имитационных моделей (АИМ), так и проектирования конкретных АИМ. Результатом работы методов является комплексная спецификация АИМ, содержащая декларативное описание состава и архитектуры элементов АИМ, включая набор действий, выполняемых на шаге моделирования агентом и средой; концептуальную модель предметной области и базу знаний агентов (автор: к.т.н. А.И. Павлов).

### 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

Развит теоретический аппарат условий глобальной оптимальности (УГО) для общей задачи математической оптимизации (d.c. оптимизации), который является фундаментом для построения методов в сложных невыпуклых задачах. УГО обладают классическим алгоритмическим (конструктивным) свойством, позволяющим находить допустимый вектор, который оказывается лучше по значению целевой функции невыпуклой задачи, чем исследуемый вектор (автор: д.ф.-м.н. А.С. Стрекаловский).

Разработаны методы локального и глобального поисков в двухуровневой задаче с матричной игрой на нижнем уровне, основанные на решении задач d.c. оптимизации общего вида (авторы: к.ф.-м.н. А.В. Орлов, к.ф.-м.н. Т.В. Груздева).

Для решения задач составления расписаний учебных курсов в высших учебных заведениях, отличающихся большой размерностью и сложностью, а также уникальностью для каждого учебного заведения, разработан эффективный эвристический метод (эвристика



**Отчет Института динамики систем и теории управления  
имени В.М. Матросова СО РАН за 2019 г.**

локальных ветвлений), основанный на частичном фиксировании части переменных задачи и решении получившейся подзадачи меньшей размерности с помощью некоторого точного метода (например, решателем задач ЦП) (авторы: к.ф.-м.н. И.Л. Васильев, к.ф.-м.н. А.В. Ушаков).

Предложены новые алгоритмы решения задачи поиска малых активирующих множеств в отношении детерминированной линейной пороговой модели (DLTM), в которых использование быстрых приближенных алгоритмов решения максимизации влияния (Influence Maximization Problem, IMP) комбинируется с применением точных методов и в первую очередь алгоритмов решения проблемы булевой выполнимости. Более детально, была исследована взаимосвязь между скоростью активации сети и т.н. «феноменом центральности» (betweenness centrality) некоторых вершин: логично предположить, что активация будет проходить тем быстрее, чем большее число активаторов попадет в вершины с относительно высокой центральностью. Довольно неожиданное следствие проведенных вычислительных экспериментов состоит в том, что центральность не всегда определяющим образом влияет на скорость активации, для целого ряда случаев быстрой активации подавляющей части сети удается добиться вообще без использования вершин с максимальной центральностью. Вычислительные эксперименты проводились как на сетях, сгенерированных в соответствии с известными моделями случайных графов, так и на сетях реального мира (использовались фрагменты сети Twitter) (автор: С.Е. Кочемазов).

Были разработаны новые алгоритмы псевдобулевой оптимизации, предназначенные для построения декомпозиционных представлений трудных экземпляров задачи о булевой выполнимости (SAT). Были проведены масштабные вычислительные эксперименты на КНФ, кодирующих задачи криптоанализа ряда генераторов ключевого потока, занявших высокие места на конкурсе поточных шифров eSTREAM. Построенные алгоритмы показали высокую эффективность в сравнении с известными алгоритмами и пакетами псевдобулевой оптимизации (автор: к.т.н. О.С. Заикин).

Получены новые результаты в области применения вычислительных алгоритмов решения проблем SAT и MAXSAT к комбинаторным задачам, связанным с верификацией нейронных сетей и обращением некоторых криптографических функций. Конкретно, были предложены методы синтеза и проверки гипотез о некоторых системах с малоизученным поведением (таких как нейронные сети) с использованием алгоритмов решения проблем SAT и MAXSAT. Был развит подход к решению MAXSAT, использующий т.н. «двухрельсовую» (Dual Rails) схему кодирования, а также предложены новые алгоритмы решения задачи построения объединения минимальных невыполнимых множеств (MUS) (автор: к.т.н. А.С. Игнатьев).

Был изучен феномен повторного порождения конфликтных дизъюнктов в CDCL-выводе и его влияние на скорость решения задач обращения некоторых криптографических функций. На основании полученных результатов в дальнейшем была разработана новая эвристика, использование которой позволяет существенно повысить эффективность SAT-решателей, основанных на концепции CDCL (авторы: В.С. Кондратьев, к.т.н. О.С. Заикин, С.Е. Кочемазов, к.т.н. А.А. Семенов).

Был предложен алгоритм машинного обучения, предназначенный для определения полезности конфликтных дизъюнктов, генерируемых в CDCL-выводе. Алгоритм использует бинарный классификатор, который основан на методе опорных векторов. Алгоритм был



**Отчет Института динамики систем и теории управления  
имени В.М. Матросова СО РАН за 2019 г.**

реализован на базе CDCL-решателя Glucose. Полученный модифицированный решатель позволил быстрее (чем исходный решатель) решить трудные SAT-задачи из нескольких семейств, использованных в соревновании SAT Competition 2018 (автор: к.т.н. О.С. Заикин).

Разработаны вычислительные методы решения задач оптимального управления для многоэтапных процессов с нефиксированным временем этапа. Рассматривается управляемый процесс, состоящий из нескольких этапов, причем момент окончания предыдущего этапа является моментом начала следующего этапа. Каждый из этапов описывается своей системой дифференциальных уравнений. Предложен метод сильного улучшения второго порядка для задач оптимального управления с нефиксированными отрезками времени этапа. Техника вывода алгоритмов основана на теории В.Ф. Кротова. Специально исследован случай, когда исходное приближение удовлетворяет необходимым условиям оптимальности, но не доставляет функционалу сильный локальный минимум. Получены условия неулучшаемости управления (автор: д.ф.-м.н. В.А. Батулин).

Разработаны концептуальные нелинейные социо-эколого-экономические модели, осуществлена постановка задач управления, проведено их качественное исследование. Математическая модель учитывает взаимосвязь таких факторов, как выпуск конечного непродовственного потребления продуктов, скорость капиталовложений на развитие основных и восстановительных фондов, интенсивность восстановления ресурсов, объемы основных и восстановительных фондов, социально-экологические показатели, численность населения, антропогенная непромышленная нагрузка на ресурсы и др. Разработаны варианты зависимости параметров моделей (например, матриц удельных прямых затрат) от значений социально-экологических показателей. Для экологического блока учитывается тот факт, что при сильных нарушениях природной среды последняя может потерять способность к самовосстановлению. Задача оптимального управления состоит в максимизации функционала, который отражает полезность, а структурно состоит из двух составляющих: первое описывает мгновенную прибыль, второе характеризует величину штрафа за нарушения экологического равновесия. Для качественного исследования задачи применялась теория В.Ф. Кротова и, в частности, метод кратных максимумов В.И. Гурмана (авторы: д.ф.-м.н. В.А. Батулин, к.т.н. А.Б. Столбов).

Рассмотрена задача размещения на плоскости при следующих условиях: заданы производственные мощности для каждого предприятия, и цена обслуживания каждого клиента пропорциональна квадрату расстояния от него до предприятия. Показано, что такая задача не описывается как задача варьирования множества достижимости, но сводится к задаче проектирования в пространстве вероятностных мер. Для данной задачи разработан алгоритм локального спуска, алгоритм реализован на языке Julia и протестирован на ряде примеров (автор: Н.С. Малтугеева).

Разработана математическая модель работы микрологистической транспортной системы в форме многофазной системы массового обслуживания. При этом учитывается структура входящего транспортного потока, неравномерность поступления заявок, возможность группового обслуживания и приостановки обслуживания на второй и третьей фазах. На основе общей модели построены и программно реализованы имитационные модели железнодорожных сортировочных станций Иркутск-Сортировочный, Ниш (Сербия) и Кумагая (Япония). Проведен обширный вычислительный эксперимент (автор: к.т.н. М.Л. Жарков).



## **Отчет Института динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН за 2019 г.**

Для задач о размещении обслуживающих логистических центров различной мощности и при наличии пространственных ограничений предложены две математические модели в форме задач о построении оптимального покрытия и оптимальной упаковки кругов разных радиусов. 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 вычислительный эксперимент, включающий решение тестовых и модельных задач (*автор: к.ф.-м.н. А.А. Лемперт*).

Проведен анализ материалов по вертикальному распределению растворенного метана в водной толще Байкала, который показал, что одной из причин изменений концентрации метана может быть повышение уровня озера Байкал, обусловленное строительством Иркутской ГЭС. Разработана математическая модель процесса тепло- и массопереноса, позволяющая оценить перемещения нижней границы устойчивости газовых гидратов (BSR), связанного с колебаниями уровня озера. Модель позволила оценить размах перемещения BSR, связанного с колебаниями уровня озера Байкал и вариациями геотермического потока тепла. Получены оценки времени протекания переходного процесса при изменении уровня озера. Вычислительные эксперименты на разных глубинах показали, что при насыщенности гидратами пор донных отложений (SatH) менее 5% положение границы BSR в озере Байкал реагирует как на внутригодовые колебания уровня, так и на длительные изменения уровня, вызванные строительством Иркутской ГЭС (*автор: В.В. Козлов*).

В рамках развиваемой платформы создания систем, основанных на знаниях, разработана архитектура программного компонента для поддержки сценарного моделирования. Проведен анализ современного состояния в области сценарного подхода (сценарное моделирование, сценарный анализ, сценарное планирование и т.п.). Для тестирования компонента выбрана категория сценария «моделирование», предполагающая следующие типы изменений: 1) вариации значений экзогенных переменных; 2) вариации параметров, определяющих влияние переменных друг на друга; 3) вариации переменных в самой модели, включая как значения, так и фактическую структуру модели. Проведен анализ применимости компонента для задачи многовариантного сценарного анализа социо-эколого-экономических проблем регионального уровня на основе моделей типа «Регион» (*автор: к.т.н. А.Б. Столбов*).

### **Проект № IV.38.1.4. Информационно-телекоммуникационная платформа цифрового мониторинга озера Байкал на основе сквозных технологий**

№ гос. регистрации: АААА-А19-119111990037-0

Научный руководитель – д.т.н. И.В. Бычков

#### **Структура информационно аналитической платформы цифрового мониторинга.**

Для организации комплексного цифрового мониторинга экологических систем озера Байкал сервисы тематического экологического мониторинга предлагается интегрировать с помощью логических конструкций, обеспечивающих решение задач обработки пространственно-временных данных, управления потоком выполнения и т.д. Разнообразие коллекций разрабатываемых сервисов тематического экологического мониторинга позволит передавать данные между ними, согласовывать форматы данных, запускать асинхронные вычислительные процессы.



**Отчет Института динамики систем и теории управления  
имени В.М. Матросова СО РАН за 2019 г.**

ИАП должна с заданной степенью надежности сохранять любые виды исходных данных экологического мониторинга: временные ряды с результатами измерений различных датчиков, материалы экспедиций, космические снимки, векторные карты и т.д. (рис. 33). Все эти данные, характеризующиеся пространственной и временной привязкой, могут иметь ряд дополнительных атрибутов, специфичных для конкретного вида информации (авторы: д.т.н. Ружников, к.т.н. А.К. Попова, к.т.н. Р.К. Фёдоров).

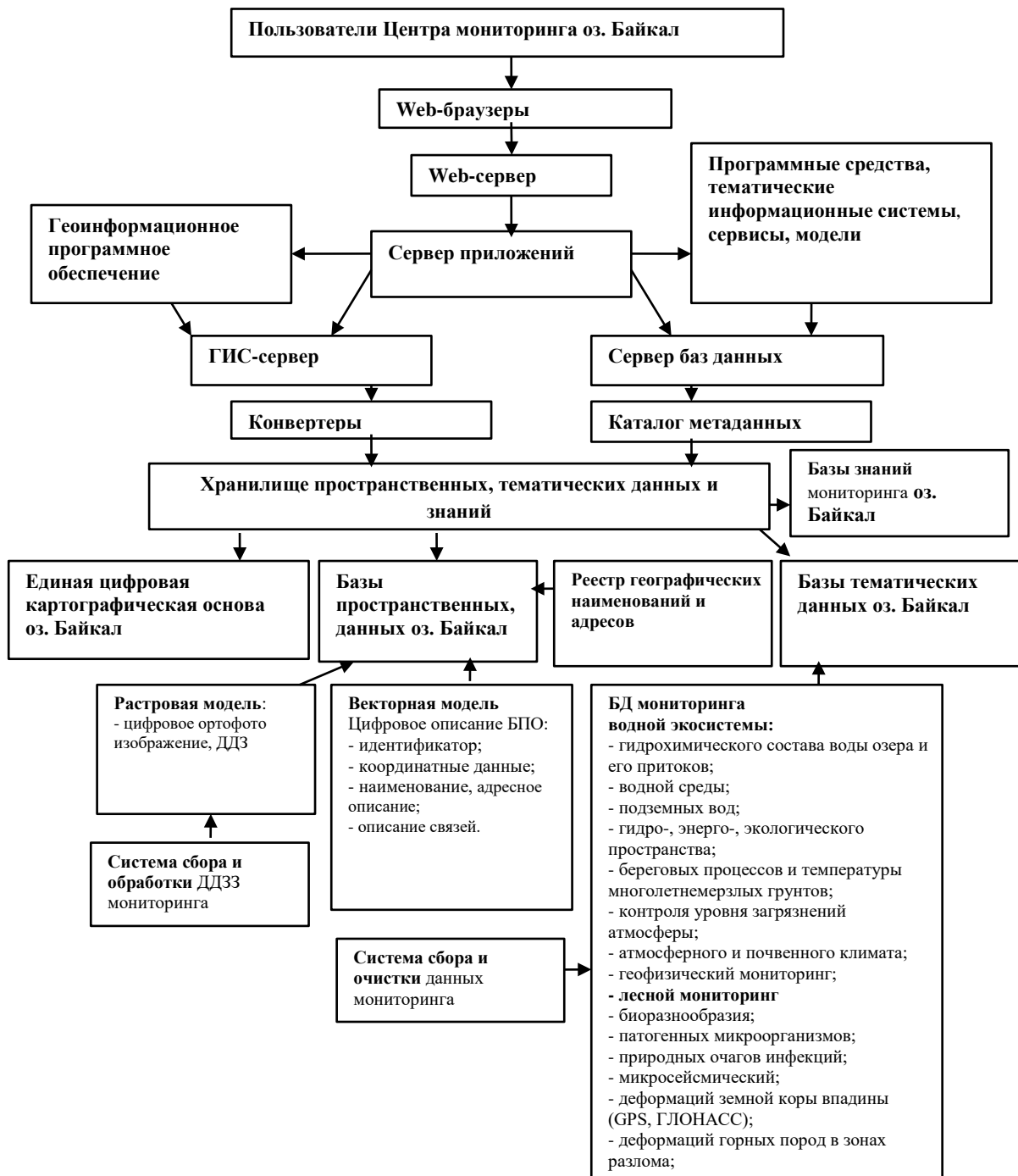


Рис. 33. Структура ИАП



**Концепция доступа к высокопроизводительным вычислительным ресурсам и ресурсам хранения данных Центров коллективного пользования для решения задач цифрового мониторинга оз. Байкал.** В качестве программно-аппаратной платформы, обеспечивающей непрерывную работу, предлагается использовать зарекомендовавшую схему построения центров обработки данных (рис. 34), в основе которой лежат основополагающие принципы:

1. Полное резервирование инженерной инфраструктуры и аппаратного комплекса.
2. Эффективное использование оборудования за счет организации пулов вычислительных ресурсов.
3. Виртуализация ресурсов и приложений.
4. Системы резервного копирования и восстановления.

Создание Центра обработки данных на начальном этапе включает:

- реконструкцию инженерной инфраструктуры – систем бесперебойного питания и охлаждения;
- модернизацию сетевой инфраструктуры;
- развертывание серверов и систем хранения и обработки данных на базе оборудования ведущих в отрасли вендоров.

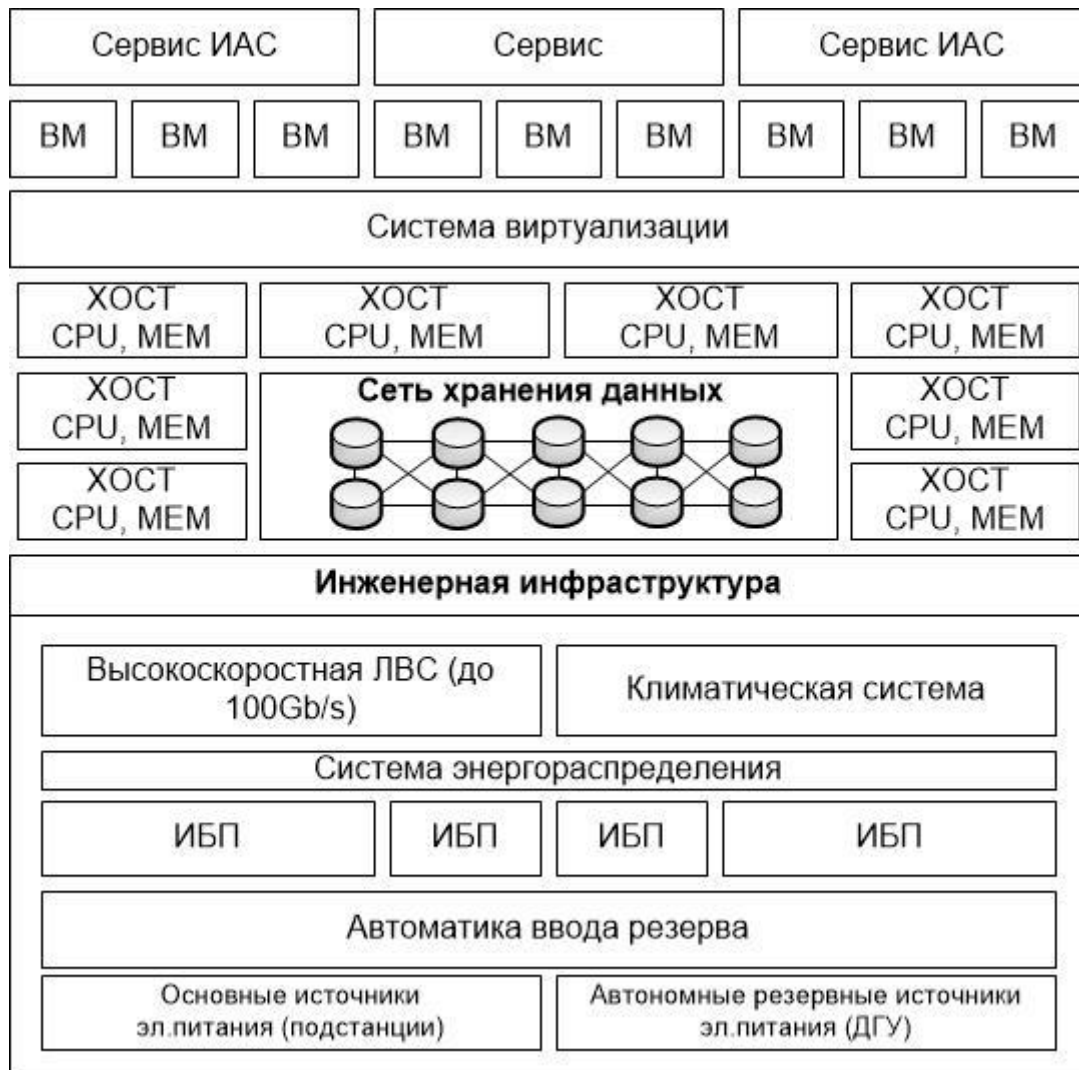


Рис. 34. Инфраструктура ЦОД

В качестве стартовой площадки для развертывания ЦОД предлагается использовать существующие и успешно функционирующие центры коллективного пользования ИИВС



ИрНОК и ИСКЦ, что обеспечит повышение доступности высокопроизводительных вычислительных ресурсов для обработки данных цифрового мониторинга, в том числе, с применением средств суперкомпьютерного моделирования (к.т.н. Т.И. Маджара, д.т.н. Г.М. Ружников).

**Эффективные методы и технологии сбора, обработки и анализа больших объёмов разноформатных пространственно-временных данных, основанных на интеллектуализации, машинном обучении и использовании конструктивных средств спецификации.** В рамках разрабатываемой платформы цифрового мониторинга создан каталог цифровых спутниковых снимков (рис. 35), обеспечивающий сбор и эффективное хранение разноформатных данных большого объема. Каталог наполнен данными дистанционного зондирования Земли из Космоса за период 2018-2019 год по Иркутской области и югу озера Байкала.

Сервисы получения  
данных ДЗЗ

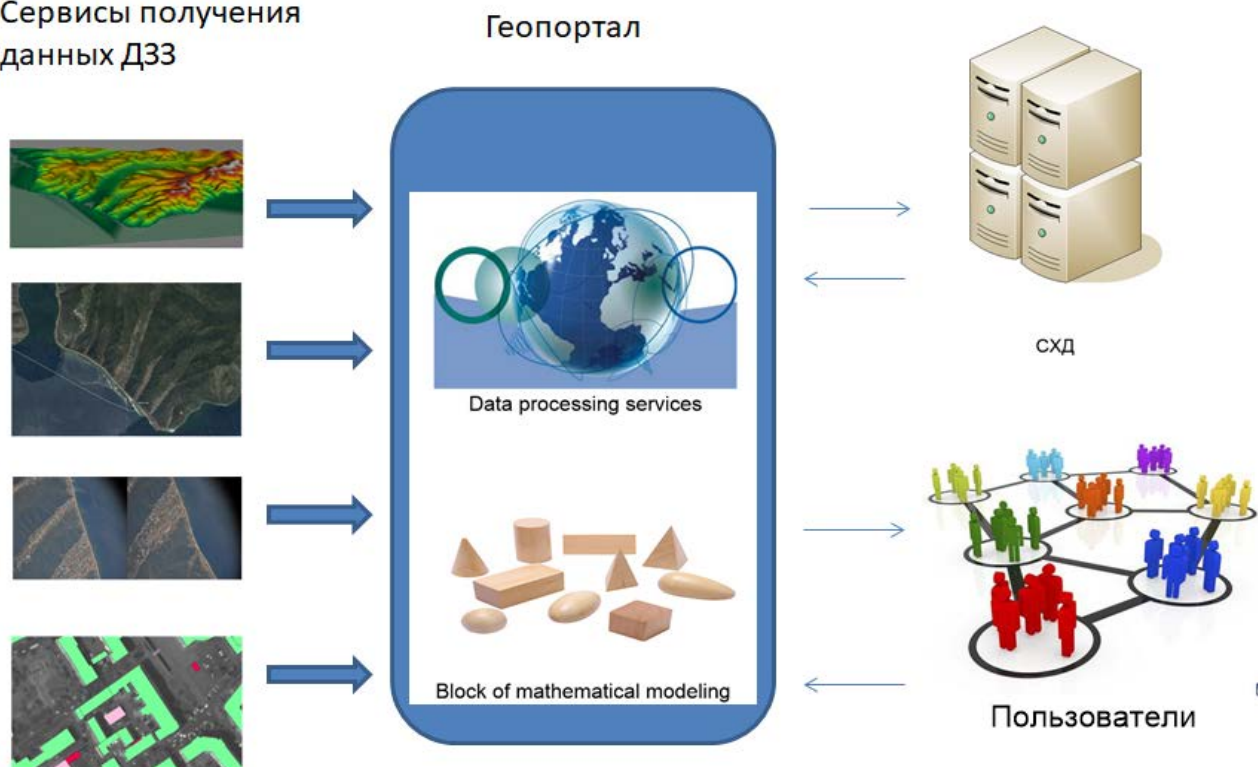


Рис. 35. Архитектура каталога данных ДЗЗ

Каталог включает в себя данные группировки российских космических аппаратов (КА). В каталоге собрано порядка 200 космических снимков на территорию Иркутской области в разном разрешении и временном интервале. Исходные данные получены с геоportала Роскосмоса на основании соглашения между Министерства науки и высшего образования РФ и государственной корпорации Роскосмос. Данные съемки получены с двух космических аппаратов «Канопус-В» и «Ресурс-П».

Существующий объем хранимых данных ДЗЗ 509 Гб. Для оптимизации хранилища данных разработан и используется специальный формат хранения данных – MRG. Данный формат предназначен для хранения больших объемов целочисленных растровых данных. Он поддерживает быструю выборку фрагментов растра с различными уровнями детализации за счет представления вместе с наиболее детальными данными, растров более низкого разрешения. Предложенная структура данных позволяет не только не увеличить расход дисковой памяти на хранение дополнительных растров более низкого разрешения, но, и наоборот, в целом сократить ее использование. Для упаковки данных разработан оригинальный алгоритм сжатия разностных целочисленных последовательностей,





позволяющий, как увеличить коэффициент сжатия, так и сократить время, необходимое для упаковки данных (по сравнению с популярной библиотекой ZLib). Для чтения информации из файлов MRG реализована динамическая библиотека, позволяющая использовать представленные в них данные сторонних программ. Программное обеспечение для чтения форматов MRG способно эффективно работать при использовании ограниченного объема памяти (от 16 Мб) (авторы: к.т.н. А.Е. Хмельнов, к.т.н. А.С. Гаченко).

**Сервисы предобработки и обработки больших объемов данных ДЗЗ.** Разработана технология обработки больших данных ДЗЗ (рис. 36) в виде совокупности WPS сервисов. Разработанная технология состоит из следующих этапов:

- 1) получение снимков, на этом этапе пользователь производит выбор подходящего снимка, на котором имеется ледник;
- 2) формирование обучающей выборки, на этом этапе пользователь указывает границы ледников. Данный этап является опциональным;
- 3) создание классификатора, на текущий момент применяются пока только нейронные сети. Данный этап является опциональным;
- 4) классификация снимков, пользователь может использовать готовые классификаторы или создать свои с помощью предыдущих этапов;
- 5) включение результатов классификации в каталог, который позволяет быстро найти нужные объекты и сохранить в одном из форматов.



Рис. 36. Основные этапы технологии обработки данных ДЗЗ

Для формирования обучающей выборки в рамках геопортала создана таблица (рис. 37), в которой пользователь указывает границы объектов на различных снимках.

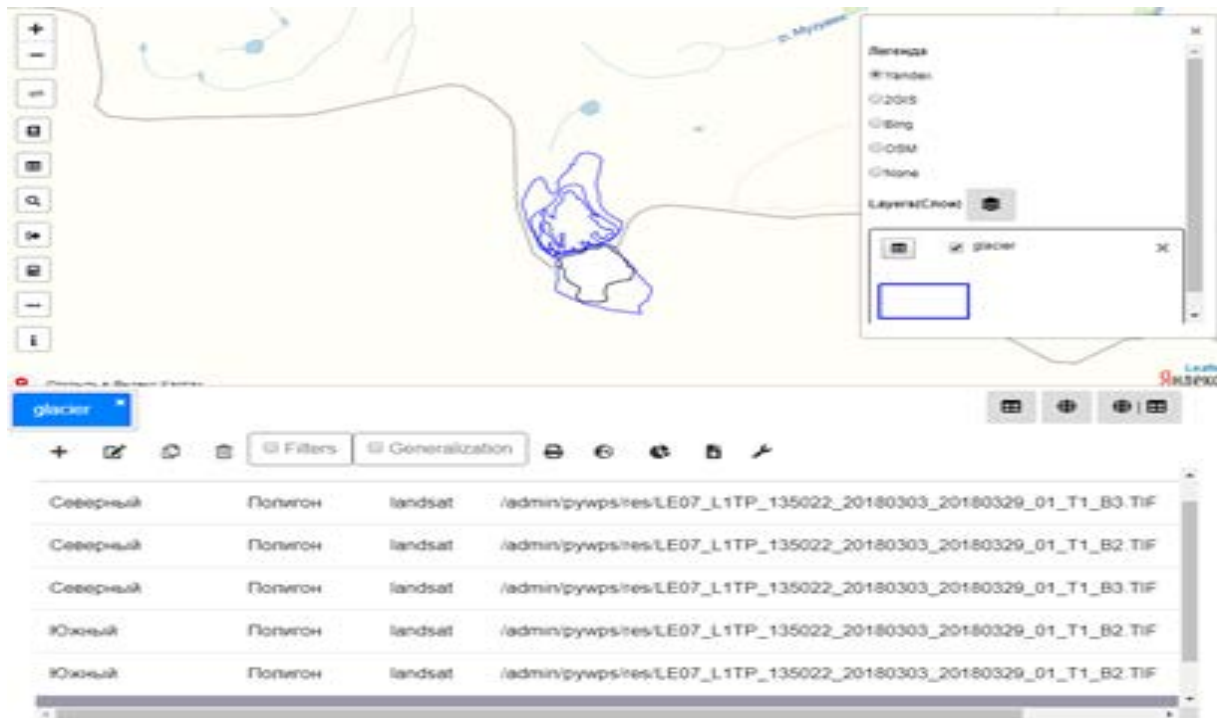


Рис. 37. Таблица обучающей выборки

Таблица состоит из следующих атрибутов:

- 1) name – название ледника;
- 2) boundaries – границы объекта в виде полигонального объекта;
- 3) date – дата снимка;
- 4) imagename – путь к файлу снимка в директории системы хранения данных геопортала;
- 5) imprecisedate – неточная дата снимка.

В каждой записи таблицы пользователь определяет границы одного объекта на конкретном снимке. Вся область снимка делится на два класса, область, покрытая полигонами из таблицы для этого снимка, считается объектом. Вся оставшаяся область изображения – противоположным классом. Соответственно в процессе составления обучающей выборки необходимо полностью покрыть объекты полигонами.

Космоснимки, полученные со спутника Landsat, представлены в виде набора файлов в формате GEOTIFF, в каждом из которых находится отдельный канал (монохромное изображение). Для отображения на карте геопортала необходимо совокупность файлов преобразовать в RGB представление. Для этого используется сервис Bands\_to\_RGB, который принимает на вход три монохромных изображения, соответствующих каналам модели RGB и строит из них цветное. В основе сервиса используется модуль `gdal_merge_simple` ([https://github.com/gina-alaska/dans-gdal-scripts#gdal\\_merge\\_simple](https://github.com/gina-alaska/dans-gdal-scripts#gdal_merge_simple)).

Для создания классификатора на основе обучающей выборки разработан набор сервисов, на вход которых подается таблица и на выходе получаем файл классификатора. В таблице можно отфильтровать записи по всем атрибутам, в том числе указать область обработки. Например, задать диапазон дат или определенное название объекта. Для каждого изображения в обучающей выборке формируется набор записей. Затем используется сервис Rasterize, который принимает на вход векторный файл в формате SHAPE, определяющий положения прецедентов, исходное изображение в формате GEOTIFF и прямоугольную область интереса. На рис. 38 представлен пример запуска сервиса Rasterize.

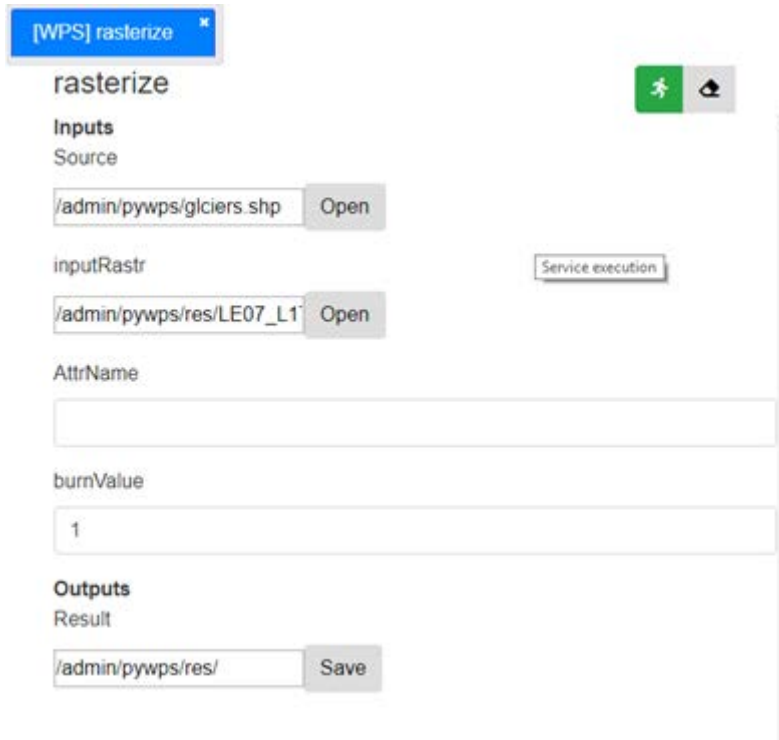


Рис. 38. Запуск сервиса Rasterize

Результатом работы сервиса является растровое изображение – бинарная маска (рис. 39), содержащая положения прецедентов по заданной области интереса. В основе сервиса используется инструмент `gdal_rasterize` ([https://gdal.org/programs/gdal\\_rasterize.html](https://gdal.org/programs/gdal_rasterize.html)). Сервис позволяет задать размер выходного изображения в пикселях.



Рис. 39. Маска ледника, полученная на основе таблицы

После сервиса Rasterize используется сервис Learning, который непосредственно производит обучение нейронной сети. На вход сервису подается растровое изображение модели RGB и бинарная маска, с указанием положений ледников. На выходе формируется файл модели. В основе сервиса используется проект Segmentation models ([https://github.com/qubvel/segmentation\\_models](https://github.com/qubvel/segmentation_models)). Данный проект позволяет использовать одну из предобученных нейросетей, распространенных архитектур Unet, FPN, Linknet или PSPNet. Принцип работы сервиса следующий. Из изображения и маски методом скользящего окна формируется обучающая выборка. После чего вызывается метод обучения модели. Затем



полученная модель возвращается пользователю в качестве результата. Так как процесс обучения достаточно долгий, то данный сервис вызывается в асинхронном режиме. Пользователь может следить за статусом его выполнения.

Классификация осуществляется с помощью сервиса Segmentation. На вход сервису подается растровое изображение модели RGB. На выходе получается бинарная маска с отмеченными положениями объектов. В основе сервиса используется проект Segmentation models ([https://github.com/qubvel/segmentation\\_models](https://github.com/qubvel/segmentation_models)). Сервис получает на вход изображение, после чего пробегается по нему скользящим окном, в результате чего изображение делится на строки и столбцы. Из каждой строки формируется набор данных и передается на вход нейронной сети. Затем результат работы записывается на соответствующие позиции копии исходного изображения и так далее, пока не будет обработано все изображение целиком (авторы: к.т.н. Р.К. Фёдоров, к.т.н. Ю.В. Авраменко, к.т.н. А.К. Попова)

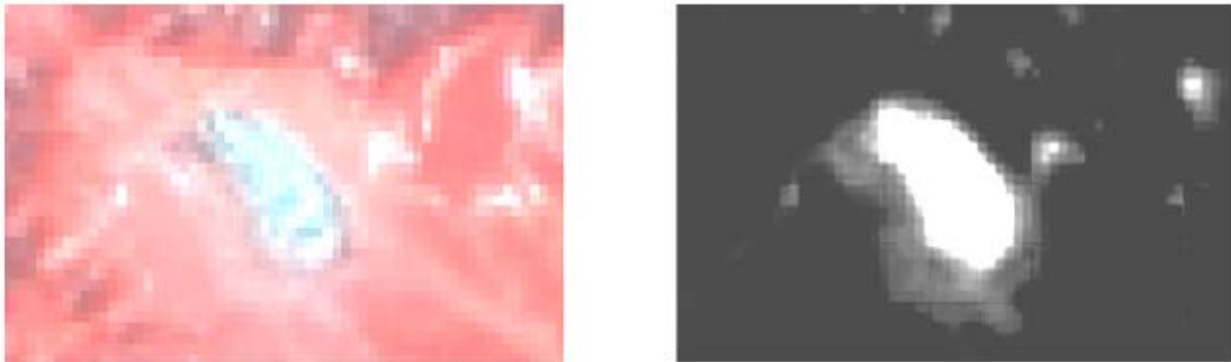


Рис. 40. Снимок Landsat и результат классификации

**Сервисы обработки неструктурированных данных.** Предложена концепция микросервисной архитектуры веб-ориентированной системы очистки не стандартизированной структуры и не гармонизированного содержания табличных данных, базирующаяся на современном архитектурном стиле взаимодействия компонентов распределённого приложения в сети — REST (Representational State Transfer). Предлагаемая архитектура предназначена для реализации следующих операций:

- Передача исходных табличных данных в формате CSV (Comma Separated Values), декларативных программ очистки структуры и содержания таблиц на языке правил общего назначения DRL (Drools Rule Language), спецификацию типов данных в формате YAML (YAML Ain't Markup Language).
- Конфигурирование и выполнения процессов очистки табличных данных на основе исполнения DRL-программ в системе «Drools Expert».
- Формирование выходных табличных данных и сопровождающих их метаданных в формате JSON (JavaScript Object Notation).
- Кэширование сессионных данных и предоставление программного доступа к ним.

Предлагаемая архитектура определяет следующий рабочий процесс очистки «грязных» табличных данных. Исходные данные загружаются и отображаются в Java объекты. Структуры данных, представляющие ячейки, вхождения, метки и категории, реализованы как Java-классы в соответствии с соглашениями спецификации JavaBeans. Они добавляются как факты в рабочую память системы исполнения правил. Опционально одна или несколько категорий, описанных с помощью языка YAML, могут загружаться в систему, также формируя соответствующие факты в рабочей памяти системы исполнения правил. При этом синтаксический разбор YAML описаний выполняется в свободной системе SnakeYAML. При этом каждый факт является экземпляром одного из этих классов. Правила



анализа и интерпретации таблиц выражаются на языке DRL. В качестве системы исполнения правил используется свободное программное обеспечение «Drools Expert». Факты, загруженные в рабочую память, сопоставляются скомпилированным правилам. В результате создаются новые факты, описывающие семантику таблицы: вхождения, метки, категории и отношения между ними. Из них генерируется каноническая таблица. В результате очистки табличных данных формируются JSON объекты, представляющие таблицу, ее ячейки, вхождения и метки в канонической форме (рис. 40).

```
{ "$schema": "http://json-schema.org/draft-07/schema#",  
  "$id": "http://td.icc.ru/cell.schema.json",  
  "title": "Cell",  
  "description": "A cell from CTable",  
  "type": "CCell",  
  "properties": {  
    "id": { "type": "Integer"},  
    "cl": { "description": "a left column position", "type": "Integer"},  
    "cr": { "description": "a right column position", "type": "Integer"},  
    "rt": { "description": "a top row position", "type": "Integer"},  
    "rb": { "description": "a bottom row position", "type": "Integer"},  
    "height": { "description": "the height of cell", "type": "Integer"},  
    "width": { "description": "the width of cell", "type": "Integer"},  
    "text": { "description": "a text ( a processed text )", "type": "String"},  
    "indent": { "description": "", "type": "Integer"},  
    "typeTag": { "description": "a data type tag provided by a spreadsheet cell  
(e.g. NUMERIC, STRING, DATE, FORMULA)",  
      "type": "TypeTag", "$ref": "http://td.icc.ru/type-tag.schema.json"},  
    "entry": { "type": "CEntry", "$ref": "http://td.icc.ru/entry.schema.json" }  
  }
```

Рис. 40. Фрагмент JSON-схемы ответа микросервиса очистки табличных данных.

Очистка данных позволяет повысить качество информации, представленной в табличных документах. Java-класс, получающий на вход объекты таблицы, представленные в виде JSON-формата. Очистка включает в себя несколько стадий. На первой стадии проводится идентификация типа данных. Наличие семантики и отношений между элементами таблицы, представленными в виде объектов, дает возможность проводить анализ по диапазону данных и меток, образующих столбцы и строки. При определении типа данных рассматривается их представление (символы, формат). Также в расчет берутся данные, представленные в соседних столбцах и (или) строках. По результатам их совокупного анализа дается заключение о принадлежности информации к определенному типу данных. Идентификация основана на применении механизма регулярных выражений. Также для анализа в расчет берется информация о типе данных ячейки в электронной таблице, если таковая присутствует и совпадает с представлением данных. В случае, если из меток или категорий есть возможность извлечь информацию о единицах измерения – она используется для нормализации единиц измерения в соответствии с целевыми единицами. Также для данных, идентифицированных как числовые, разработаны подходы поиска вычисляемых значений. Предлагается использовать комплексный подход, включающий как анализ содержания, так и структуры табличного документа. Для этого проводится анализ на наличие в метках и категориях ключевых слов (“итого”, “всего”, “среднее”, “нарастающий итог” и т.п.), обозначающих их возможное вхождение вычисляемого значения. Проводится анализ окружающих ячейку вхождений с целью выявления зависимостей. Анализ строится на возможных гипотезах относительно агрегации данных.



Для данных, которые идентифицируются как «строки» и которые могут быть соотнесены с каким-либо значением словаря (город, регион, марка и т.п.), будет проведена их реконсиляция. Принадлежность данных к словарю обуславливается пользовательской спецификацией данных перед загрузкой. Для таких данных реконсиляция обеспечивает устранение опечаток и установление взаимно-однозначных связей с классификаторами. Для устранения опечаток применяются методы нечеткого сравнения строк и фонетического кодирования.

Очищенные данные могут быть сохранены в виде электронной таблицы или переданы на последующую обработку как JSON-объекты.

Для тестирования предлагаемой архитектуры спроектировано веб-ориентированное приложение, предоставляющее пользовательский интерфейс доступа к микросервисам очистки табличных данных, обеспечивающий визуализацию и интерактивную работу с получаемыми выходными JSON данными (авторы: к.т.н. А.О. Шигаров, к.т.н. В.В. Парамонов, к.т.н. А.А. Михайлов, В.В. Христюк).

**Сервисы управления жизненным циклом научных данных.** Предложена концепция модели курирования больших объемов исследовательских данных, накапливаемых в результате цифрового мониторинга озера Байкал. Модель предполагает активное и непрерывное управление ими на протяжении всего их жизненного цикла, для того, чтобы обеспечить и увеличить их ценность как в настоящем, так и в будущем.

Предлагаемая модель жизненного цикла данных цифрового мониторинга охватывает процессы планирования, сбора и обработки, моделирования и анализа, хранения, каталогизации и архивирования, публикации, открытого доступа и повторного использования.



Рис. 41. Модель жизненного цикла научных данных цифрового мониторинга озера Байкал

Реализация этой модели предполагает разработку детального плана (включая стратегию и политики) управления данными в соответствии с современными стандартами и рекомендациями центров цифрового курирования. Сбор и обработка включает решение в рамках проекта вопросов автоматизации проектирования и исполнения рабочих процессов конвейерной обработки данных, упаковки получаемых исследовательских данных в современные обменные форматы (NetCDF, HDF5, CERN ROOT и др.). Для краткосрочного хранения и долгосрочного архивирования планируется создание инфраструктуры репозитория данных, каталогов метаданных и резервного копирования. Для поддержки моделирования и анализа данных предполагается внедрить современную платформу аналитики научных данных (Data Science Platform). Эта платформа обеспечит исследование



***Отчет Института динамики систем и теории управления  
имени В.М. Матросова СО РАН за 2019 г.***

озера Байкал необходимыми инструментами моделирования (в т. ч. методами Монте-Карло) и интеллектуального анализа (в т.ч. методами обнаружения знаний и поиска скрытых закономерностей) с интенсивным использованием междисциплинарных данных. Для публикации наборов исследовательских данных планируется создание и наполнение портала открытых данных озера Байкал. Такой портал позволит распространять и повторно использовать результаты цифрового мониторинга, в т.ч. в других научных проектах и образовательных курсах (авторы: к.т.н. Шигаров, к.т.н. Е.С. Фереферов, к.т.н. А.Е. Хмельнов).