

На правах рукописи

Артемьева Ирина Леонидовна

**МНОГОУРОВНЕВЫЕ МОДЕЛИ СЛОЖНО-
СТРУКТУРИРОВАННЫХ ПРЕДМЕТНЫХ ОБЛАСТЕЙ И ИХ
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРИ РАЗРАБОТКЕ
СИСТЕМ, ОСНОВАННЫХ НА ЗНАНИЯХ**

05.13.17 – теоретические основы информатики

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Москва
2008

Работа выполнена в Институте автоматики и процессов управления
Дальневосточного отделения РАН.

Научный консультант доктор физико-математических наук,
профессор Клещев Александр Сергеевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Стефанюк Вадим Львович

доктор технических наук, профессор
Загоруйко Николай Григорьевич

доктор физико-математических наук,
профессор Калиниченко Леонид Андреевич

Ведущая организация Учреждение Российской академии наук
Институт проблем управления РАН (ИПУ
РАН)

Защита состоится “18” марта 2009 г. в __ часов на заседании диссертационного совета Д 002.073.01 при Учреждении Российской академии наук Институте проблем информатики РАН (ИПИ РАН) по адресу: 119333, г. Москва, ул. Вавилова, д.44, корп.2.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИПИ РАН.

Отзывы в одном экземпляре, с заверенной подписью, просим направлять по адресу: 119333, Москва, ул. Вавилова, 44, корп. 2, в диссертационный совет.

Автореферат разослан “_” 200_ г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 002.073.01

доктор технических наук

С.Н. Гринченко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Одним из классов программных систем являются системы, основанные на знаниях (СОЗ), отличительная особенность которых состоит в том, что знания, необходимые для выполнения профессиональной деятельности, отделены в этих системах от программ для решения прикладных задач. Система, база знаний которой пуста, называется оболочкой СОЗ. Разработка СОЗ предполагает создание ее оболочки. Сопровождение СОЗ предполагает сопровождение ее базы знаний без изменения программ для решения задач. Использование СОЗ дает преимущества в трудно-формализуемых предметных областях при решении задач диагностики, проектирования, планирования и управления, определения классов объектов по описаниям их свойств и т.д. При разработке СОЗ должны быть получены ответы на следующие вопросы: как представить знания предметной области, как их использовать при решении задач, как сопровождать базу знаний. Чем сложнее предметная область, тем сложнее разработка СОЗ и сопровождение ее базы знаний.

Большой вклад в разработку методов создания систем, основанных на знаниях, внесли Г.С. Поспелов, Д.А. Поспелов, Э.В. Попов, В.Ф. Хорошевский, В.К. Финн, В.П. Гладун, В.В. Голенков, В.Н. Вагин, Г.С. Осипов, Т.А. Гаврилова, А.П. Еремеев, А.С. Клещев, В.Л. Стефанюк, Н.Г. Загоруйко, Г.В. Рыбина, А.С. Нариньяни, N. Guarino, van Heijst, D.B. Lenat, J. Sowa, M.A Uschold, B.Wielinga, и многие другие.

К настоящему времени разработаны модели представления знаний в виде систем фреймов, семантических сетей, систем продукции. Системы фреймов и семантические сети позволяют описать структуру объектов предметной области и связи между ними. Системы продукции (правил) используются для представления знаний предметной области в виде утверждений "если-то". На основе моделей представления знаний разработаны различные языки представления знаний, которые являются входными языками универсальных оболочек, используемых при создании систем, основанных на знаниях. Универсальная оболочка фиксирует способ использования знаний при решении задач. Существуют также системы, в которых структура объектов предметной области задается семантической сетью или системой фреймов, а правила решения задач – множеством продукции. Сопровождение базы знаний для систем, созданных с использованием универсальных оболочек, выполняет инженер знаний. Однако наличие посредника (инженера знаний) затрудняет создание и изменение базы знаний, поэтому возникает вопрос: как обеспечить редактирование знаний экспертом без участия посредника?

Ответ на данный вопрос дают специализированные оболочки, в которых при представлении знаний используется специфичная для предметной области концептуальная схема, определяемая онтологией той области, для которой создается оболочка. Онтология задает систему понятий и связи между ними, т.е. терминологию, понятную эксперту предметной области. Существуют специализированные оболочки, разработка которых основана на метаонтологии предметной области, в терминах которой определяются онтологии нескольких разделов данной области. Информационным компонентом специализированной оболочки является база знаний, а программными компонентами - редактор знаний, основанный на онтологии (или метаонтологии), система логического вывода (решатель класса прикладных задач), система ввода исходных данных задач, а также система вывода и объяснения результатов решения. При создании специализированной оболочки обычно фиксируется класс прикладных задач. Решатель задач реализует метод решения задач этого класса.

Явное представление онтологии предметной области в информационных компонентах СОЗ делает понятными и повторно используемыми знания, хранящиеся в базе знаний СОЗ. В настоящее время существуют методы создания онтологий, разработки редакторов знаний, управляемых онтологиями, и специализированных оболочек. Для формального представления онтологий предлагается использовать языки логики первого порядка и компьютерные языки. Многие из компьютерных языков для представления онтологий имеют средства для представления понятий (часто называемых классами), их таксономии, определения аксиом. Онтология вместе с набором экземпляров классов составляет базу знаний.

Однако остался ряд не решенных проблем. Существуют сложно-структурированные предметные области, имеющие сложную концептуальную схему, свойства которой не учитывают существующие языки для представления онтологий и методы создания онтологий. В сложно-структурированных предметных областях, особенно связанных с наукой, могут изменяться не только знания, но онтологии, и, как следствие, множество классов прикладных задач. Однако методы создания специализированных оболочек, которые допускали бы изменение множества классов задач, решаемых системой, основанной на знаниях, из литературы не известны.

В связи с вышесказанным актуальными являются исследования, направленные на решение проблемы создания расширяемых специализированных оболочек систем, основанных на знаниях, для сложно-структурированных предметных областей, которые позволяли бы создание и изменение базы знаний и онтологии предметной области, а также поддерживали механизмы расширения множества классов прикладных задач.

Целью работы является разработка теоретических основ и методов создания расширяемых специализированных оболочек систем, основанных на знаниях, для сложно-структурных предметных областей.

Для достижения поставленной в диссертационной работе цели необходимо решить следующие задачи.

1. Исследовать существенные свойства сложно-структурных предметных областей и в соответствии с ними определить устройство их онтологий.

2. Разработать класс математических соотношений (декларативных моделей), которые могут использоваться при моделировании онтологий и знаний сложно-структурных предметных областей, а также язык для представления этих соотношений.

3. Разработать методы анализа сложно-структурных предметных областей.

4. Разработать многоуровневую модель реальной сложно-структурной предметной области, состоящей из нескольких разделов.

5. Разработать концепцию и методы реализации расширяемых специализированных оболочек систем, основанных на знаниях, для сложно-структурных предметных областей.

6. На основе концепции и методов реализации разработать специализированную оболочку для реальной сложно-структурной предметной области.

7. Разработать технологию создания и сопровождения расширяемой системы, основанной на знаниях, с использованием специализированной оболочки, а также провести ее экспериментальное исследование.

Методы исследования. Проводимые в работе теоретические и практические исследования базируются на методах системного анализа, искусственного интеллекта, математической логики, теории множеств, теории алгоритмов и исчислений, технологий программирования.

Научная новизна. Основной результат диссертационной работы состоит в теоретической разработке и практическом решении проблемы создания расширяемых специализированных оболочек для сложно-структурных предметных областей. При этом впервые получены следующие результаты:

- предложен класс математических соотношений (декларативных моделей), которые могут использоваться при моделировании онтологий и знаний сложно-структурных предметных областей;

- разработан класс логических языков для представления декларативных моделей сложно-структурных предметных областей, все языки которого имеют общее ядро, каждый язык использует свой набор расширений, что

позволяет при представлении модели сложно-структурированной области определять язык, обладающий требуемым для данной области набором математических символов;

- разработаны методы «снизу вверх» и «сверху вниз» анализа сложно-структурированных предметных областей; метод анализа "снизу вверх" предназначен для обобщения одноуровневых онтологий разделов сложно-структурированной предметной области до многоуровневых и получения онтологии верхнего уровня, определяющей схему анализа "сверху вниз" для новых разделов данной области, при котором онтологии новых разделов представляются как конкретизации онтологии верхнего уровня;

- разработана четырехуровневая модель сложно-структурированной предметной области "Химия", охватывающая физическую и органическую химию, а также раздел рентгено-флуоресцентного анализа;

- разработана общая архитектура расширяемых специализированных оболочек систем, основанных на знаниях, для сложно-структурированных предметных областей; определены механизмы их расширения; разработаны методы реализации специализированных оболочек.

Практическая ценность работы заключается:

- в разработке моделей онтологий физической и органической химии и рентгено-флуоресцентного анализа, а также четырехуровневой модели химии, охватывающей указанные разделы;

- в разработке расширяемой специализированной оболочки для физической химии, предназначенной для создания систем, основанных на знаниях, позволяющей интегрировать онтологии и знания разных разделов физической химии, а также автоматически формировать системы для решения вычислительных задач указанного раздела химии;

- в разработке расширяемой специализированной оболочки для химии, предназначенной для создания систем, основанных на знаниях, для данной области, позволяющей интегрировать онтологии, знания и решатели прикладных задач для разных разделов химии; в использовании этой оболочки для создания системы, основанной на знаниях, интегрирующей онтологии, знания и решатели прикладных задач разделов физической и органической химии, а также рентгено-флуоресцентного анализа;

- в разработке технологии создания и сопровождения системы, основанной на знаниях, с использованием расширяемой специализированной оболочки;

- в использовании теоретических результатов диссертационной работы в научной работе сотрудников отдела интеллектуальных систем Института автоматики и процессов управления Дальневосточного отделения РАН и

кафедры программного обеспечения ЭВМ Дальневосточного государственного университета при разработке моделей онтологий разных предметных областей;

- в использовании теоретических результатов диссертационной работы при чтении курсов лекций по дисциплинам "Системы искусственного интеллекта", "Диалоговое редактирование баз знаний и экспертные системы", "Компьютерная обработка знаний" для студентов института математики и компьютерных наук Дальневосточного государственного университета (г. Владивосток) и института технологии и бизнеса (г. Находка); в использовании теоретических результатов диссертационной работы и методов создания специализированных оболочек в учебном процессе и при выполнении курсовых и дипломных работ студентами кафедры программного обеспечения ЭВМ Дальневосточного государственного университета.

Обоснование и достоверность полученных результатов. Обоснование и достоверность научных положений, выводов и практических результатов подтверждена практическим использованием предложенных в диссертационной работе моделей и методов при выполнении анализа сложно-структурных предметных областей и создании расширяемых специализированных оболочек систем, основанных на знаниях.

Апробация работы. Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на следующих международных и отечественных конференциях и семинарах: Pacific Int.Conf "Mathematical Modelling and Cryptography" (Владивосток, 1995), 4-ая Международная конференция "Non-Standard Logics and Logical Aspects of Computer Science", (Иркутск, 1995), II Междун. научно-техн. конф. "Интерактивные системы: проблемы человеко-компьютерного взаимодействия" (Ульяновск, 1997), Дальневост. матем. шк.-сем. им. акад. Е.В.Золотова, (Владивосток, 1997, 2001-2004, 2007), 4 World Congress on Expert systems (Mexico, 1998), Третий Сибирский конгресс по прикладной и индустриальной математике (Новосибирск, 1998), Slovenian-Russian Workshop on Software (Владивосток, 1998), The Pacific Asian Conference on Intelligent systems (Seul, Korea, 2001), 3-й Всерос. Internet-конф. «Компьютерное и математическое моделирование в естественных и технических науках» (2001), 8-ой, 9-ой и 10-й национ. конф. по искусственному интеллекту с международным участием (Коломна, 2002, Тверь, 2004, Обнинск, 2006, Дубна, 2008), Международной конференции "Knowledge-Dialog-Solution" (Ялта, 1997, Varna, Bulgaria, 2003, 2005-2008), Международной конференции "Интеллектуальные и многопроцессорные системы" (Кацивели, 2000, 2004-2007), Международной конференции "Системный анализ и информационные технологии" (Переславль-Залесский, 2005, Обнинск, 2007), научной сессии МИФИ (Москва, 2006-2008), II Международной конференции по когнитивной

науке (Санкт-Петербург, 2006), Международной конференции «Знания-Онтологии-Теория» (Новосибирск, 2007), совместном семинаре института систем информатики и ВЦ СО РАН (Новосибирск, 2003), семинаре института математики СО РАН (Новосибирск, 2003), семинаре Российской ассоциации по искусственному интеллекту "Проблемы искусственного интеллекта" (Москва, 2007), совместных научных семинарах отдела интеллектуальных систем ИАПУ ДВО РАН и факультета компьютерных наук ДВГУ.

Публикация результатов работы. Основные результаты диссертации опубликованы в 48 печатных работ, в том числе 13 - в журналах, входящих в Перечень журналов ВАК.

Под руководством автора и по тематике исследований защищены три кандидатские диссертации по специальности 05.13.11.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, семи глав, заключения, списка литературы и 10 приложений. Основное содержание работы изложено на 276 страницах. Список литературы включает 251 наименование.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, дана общая характеристика научной проблемы, сформулирована цель и поставлены задачи, показана научная новизна, практическая ценность результатов работы.

В первой главе диссертации исследованы существенные свойства сложно-структурированных предметных областей и определено устройство их онтологий. В ней также рассматриваются существующие определения понятия "онтология", языки представления онтологий, методы анализа предметных областей, существующие оболочки систем, основанных на знаниях и программные системы, созданные на основе онтологий.

Перечислим существенные свойства предметных областей.

Набор типов данных и связанных с ними математических операций, функций и отношений, используемых при построении моделей предметных областей. В ПО может быть выделено множество объектов ПО, информация о которых используется в профессиональной деятельности в этой ПО. При решении задач происходит переход от объектов ПО к представлению информации об объектах (или к информационным объектам), т.е. к представлению информации об объекте в виде отображения конечного множества терминов $\{t_1, \dots, t_m\}$ во множество значений. В математических моделях значения принадлежат некоторой моносортной или многосортной алгебраической системе, в программах - некоторому типу данных. Каждая

алгебраическая система и тип данных характеризуется конечным или бесконечным множеством значений, конечной совокупностью функций и операций (функций от двух аргументов), а также конечной совокупностью нефункциональных отношений. В разных предметных областях используется свой набор математических символов. Алгебраическая система и тип данных являются моделями величин, которым принадлежат значения информационных объектов. Величины могут быть стандартными или нестандартными. Примерами стандартных величин являются размерные, скалярные и структурные величины, величины множеств, отображений, примерами элементов нестандартной величины для химии являются структурные формулы соединений, спектры. Нестандартные величины свои для каждой предметной области.

Онтология¹ действительности, которая определяет понятия, используемые при описании действительности, термины для их обозначения, объемы (экстенсионалы) понятий, обозначенных терминами, и онтологические соглашения, задающие ограничения на множества значений терминов. Онтология действительности определяет структуру представления информации о ситуациях действительности. Понятия могут быть основными и вспомогательными. Для основного понятия онтология определяет термин и множество значений (сорт), для вспомогательного – значение или способ его вычисления с использованием значений других понятий.

Знания, которые представляют собой множество утверждений о свойствах ситуаций действительности. Если знания предметной области могут быть представлены в виде отображения конечного множества терминов на множество значений (принадлежащих различным типам данных), то будем говорить, что знания структурированы. Термины, используемые при таком представлении знаний, могут быть объектными, функциональными или предикатными именами. Существуют предметные области, в которых только часть знаний имеет структуру. Если знания предметной области или их часть структурированы, то в предметной области существует *онтология знаний*, которая определяет понятия, используемые при представлении знаний, термины для их обозначения, объемы понятий, обозначенных терминами, и

¹ В работе используется определение онтологии, данное Грубером: онтология есть явная спецификация концептуализации. Состав онтологии определяет стандарт онтологического исследования IDEF5: онтология это словарь предметной области, наполненный множеством точных определений, или аксиом, ограничивающих смысл терминов в этом словаре и позволяющих согласованно интерпретировать данные. Такое определение понятия "онтология" совпадает с определением понятия "концептуальная модель".

онтологические соглашения, задающие ограничения на множества значений терминов. Для предметных областей, знания которых не структурированы, онтология знаний пуста, а при записи утверждений используются термины онтологии действительности.

Если знания предметной области структурированы, то множество онтологических соглашений кроме ограничений целостности действительности и знаний содержит еще одну группу соглашений, задающих *связи знаний и действительности предметной области*.

Назовем предметную область сложно-структуройированной, если она обладает следующими свойствами: в ней существуют разделы, которые описываются в разных, но похожих системах понятий, разделы, в свою очередь, имеют подразделы, которые описываются в разных, но похожих системах понятий, любой подраздел в свою очередь, может иметь подразделы, обладающие указанным свойством, и т.д. Раздел (и подраздел) сложно-структуройированной ПО является также предметной областью, в которой происходит своя профессиональная деятельность, которая характеризуется своим множеством задач. Среди множества задач разных разделов могут существовать похожие задачи. При решении задач профессиональной деятельности в сложно-структуройированной ПО могут использоваться понятия онтологий ее разных разделов, а также знания разных разделов. При решении задач некоторого раздела сложно-структуройированной предметной области в качестве подзадач могут использоваться задачи других разделов.

Теперь введем понятие *уровней общности*. Множество представлений информации о действительности предметной области в виде отображения множества терминов на множество значений, принадлежащих разным типам данных, имеет уровень 0.

Уровень 1 специфицирует конкретное множество представлений информации о действительности. Этот уровень содержит знания о действительности, представленные с использованием терминов онтологии. Заметим, что на уровне 1 терминам онтологии действительности не сопоставлены значения. Сопоставляя терминам онтологии действительности конкретные значения, получим представление информации о конкретной ситуации, которое будет принадлежать уровню 0.

Уровень 2 содержит онтологию предметной области, но не содержит знания. Задавая разные знания (разные базы знаний) с использованием одной и той же онтологии, будем получать спецификации разных множеств представлений информации о действительности. Таким образом, уровень 2 специфицирует множество баз знаний, которые могут быть заданы с использованием одной и той же онтологии. *Онтология уровня 2* для предметных

областей с неструктуризованными знаниями совпадает с онтологией действительности предметной области. Если все знания или их часть структурированы, то онтология уровня 2 содержит онтологию действительности, онтологию знаний и связи между двумя онтологиями. Для сложно-структурной предметной области каждый раздел имеет свою онтологию уровня 2, обладающую указанным свойством. Таким образом, следующим свойством сложно-структурной предметной области является *множество онтологий уровня 2*.

Онтология, в терминах которой может быть специфицировано множество онтологий уровня 2, имеет уровень 3. Ее термины определяют множества терминов онтологии уровня 2, задавая свойства элементов этих множеств. Задание свойства множества терминов онтологии уровня 2 состоит либо в определении объема каждого понятия, обозначенного термином, либо в определении способа вычисления этого объема в зависимости от значений параметров, связанных с множеством определяемых терминов. В первом случае онтология уровня 3 содержит термины-имена множеств терминов онтологии уровня 2, а также для каждого множества утверждения, определяющие объем понятия всех терминов этого множества. Во втором случае онтология определяет функции, аргументами которых являются параметры, от которых зависит объем понятий, обозначаемых терминами, и имена этих параметров.

Если онтологические соглашения уровня 2 могут быть представлены в виде множества отображения конечного множества терминов на множество значений, то онтология уровня 3 будет содержать термины, при помощи которых можно так представить каждую из онтологий уровня 2. Задание онтологических соглашений уровня 2 в этом случае состоит в определении значений терминов онтологии уровня 3. Если онтология не структурирована, то онтологические соглашения формулируются в виде утверждений с использованием терминов, определенных в онтологии уровня 2.

Если каждый раздел сложно-структурной области является подразделом другого раздела, то свойством сложно-структурной предметной области является *множество онтологий уровня 3*. В частном случае это множество содержит одну онтологию.

Таким образом, для сложно-структурной предметной области онтология уровня $i+1$ специфицирует множества онтологий уровня i . Онтологию верхнего уровня будем называть онтологией сложно-структурной предметной области (рис. 1). Она содержит термины, при помощи которых определяются онтологии следующего уровня (онтологии разделов). Переход к онтологии некоторого раздела от онтологии предметной

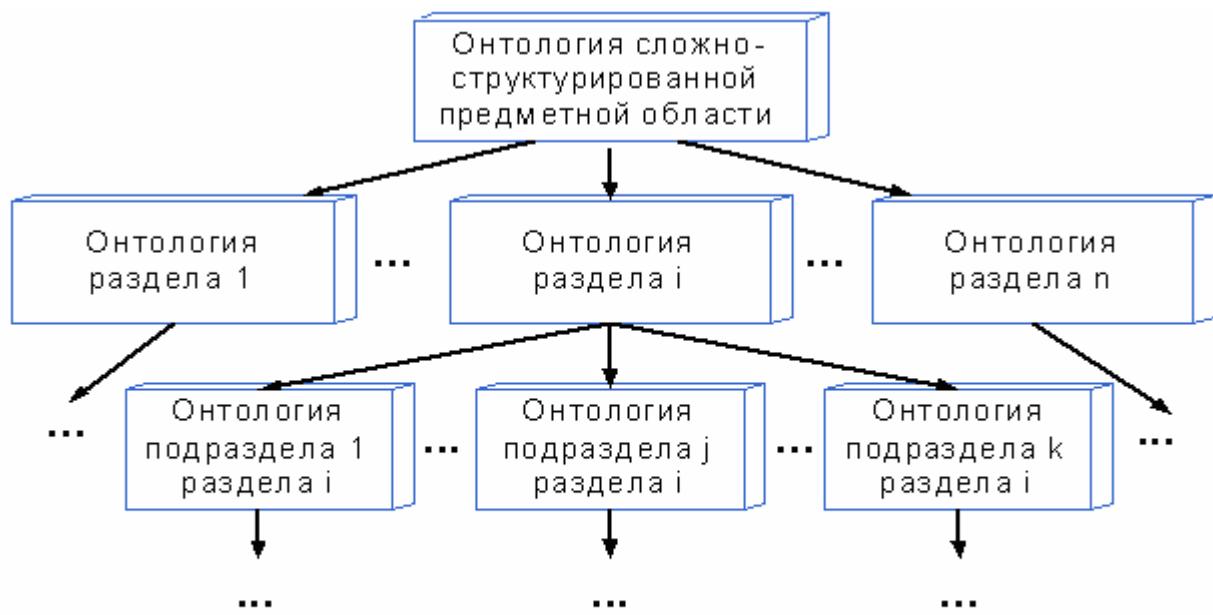


Рис. 1. Структура онтологии сложно - структурированной предметной области

области состоит в задании терминов онтологии этого раздела, а также онтологических соглашений.

Во второй главе диссертации определен класс математических соотношений (декларативных моделей), которые могут использоваться при моделировании сложно-структурированных предметных областей, а также язык для представления этих соотношений.

Модуль онтологии каждого уровня представляется *необогащенной системой логических соотношений* O^m ($m \geq 2$), которая есть тройка $\langle \Phi^m, P^m, C^m \rangle$, где Φ^m – множество определений понятий уровня m и связей между ними, P^m – множество параметров уровня m , C^m – множество определений конструкторов сортов уровня m . Каждое из множеств P^m и C^m может быть пустым, но $P^m \cup C^m \neq \emptyset$. Если $m=2$, то $P^2 \neq \emptyset$, а $C^2 = \emptyset$. Элементы множества P^m являются подмножеством множества названий (имен) основных понятий уровня m , определенных в Φ^m .

Определим вид предложений из множества Φ^m :

1) сорт n : M - определение основного понятия, где n - имя понятия, M – определение объема (экстенсионала) понятия (множества возможных значений для n). Если объем понятия с именем n задан множеством отображений ($M_1 \times M_2 \times \dots \times M_n \rightarrow M_0$), где M_1, \dots, M_n, M_0 - множества, причем $M_0 \neq \{\text{true}, \text{false}\}$, будем называть n функциональным именем. Если объем понятия с именем n задан множеством отображений ($M_1 \times M_2 \times \dots \times M_n \rightarrow \{\text{true}, \text{false}\}$), будем называть n предикатным именем. В остальных случаях будем называть n объектным именем.

2) $(v_1: M_1) (v_2: M_2(v_1)) \dots (v_q: M_q(v_1, v_2, \dots, v_{q-1}))^2$ ($n: M(v_1, v_2, \dots, v_q)$) сорт n : $M_0(v_1, v_2, \dots, v_q)$ - определение основных понятий, имена которых скрыты параметрами v_1, v_2, \dots, v_q . Здесь v_1, v_2, \dots, v_q – переменные, M_1 - множество значений переменной v_1 , $M_2(v_1)$ – множество значений переменной v_2 , зависящее от значений переменной $v_1, \dots, M_q(v_1, v_2, \dots, v_{q-1})$ - множество значений переменной v_q , зависящее от значений переменных $v_1, v_2, \dots, v_{q-1}; M(v_1, v_2, \dots, v_q)$ – определение множества имен основных понятий с использованием параметров-переменных v_1, v_2, \dots, v_q ; n – переменная, $M_0(v_1, v_2, \dots, v_q)$ – определение способа вычисления объемов основных понятий (множеств возможных значений имен n из $M(v_1, v_2, \dots, v_q)$) с использованием значений переменных v_1, v_2, \dots, v_q . Параметры могут скрывать объектные, функциональные и предикатные имена.

3) $n \equiv t$ - определение вспомогательного понятия, где n – имя понятия, t – значение понятия либо способ вычисления значения по значениям других понятий. Будем также различать объектные, функциональные и предикатные имена вспомогательных понятий. При задании значений понятия, имеющего функциональное или предикатное имя, используются λ -термы, определяющие функцию или предикат.

4) $(v_1: M_1) (v_2: M_2(v_1)) \dots (v_q: M_q(v_1, v_2, \dots, v_{q-1})) (n: M(v_1, v_2, \dots, v_q)), n \equiv t(v_1, v_2, \dots, v_q)$ - определение множества вспомогательных понятий, имена которых скрыты параметрами v_1, v_2, \dots, v_q . Здесь v_1, v_2, \dots, v_q – переменные, M_1 - множество значений переменной v_1 , $M_2(v_1)$ – множество значений переменной v_2 , зависящее от значений переменной $v_1, \dots, M_q(v_1, v_2, \dots, v_{q-1})$ - множество значений переменной v_q , зависящее от значений переменных $v_1, v_2, \dots, v_{q-1}; M(v_1, v_2, \dots, v_q)$ – определение множества имен вспомогательных понятий с использованием параметров-переменных v_1, v_2, \dots, v_q ; n – переменная, $t(v_1, v_2, \dots, v_q)$ – определение способа вычисления значения вспомогательных понятий (значений имен n из $M(v_1, v_2, \dots, v_q)$) с использованием переменных v_1, v_2, \dots, v_q . Параметры могут скрывать объектные, функциональные и предикатные имена вспомогательных понятий.

5) $(v_1: M_1) (v_2: M_2(v_1)) \dots (v_q: M_q(v_1, v_2, \dots, v_{q-1})) f(v_1, v_2, \dots, v_q)$ либо f – задание ограничений на множество значений понятий и связей между значениями понятий (предложения данного типа используются при задании неструктурированной части онтологии и знаний). Здесь v_1, v_2, \dots, v_q – переменные, M_1 - множество значений переменной v_1 , $M_2(v_1)$ – множество значений переменной v_2 , зависящее от значений переменной $v_1, \dots, M_q(v_1, v_2, \dots,$

² В предложениях вида (2), (4) и (5) последовательность $(v_1: M_1) (v_2: M_2(v_1)) \dots (v_q: M_q(v_1, v_2, \dots, v_{q-1}))$ будем называть префиксом

v_{q-1}) - множество значений переменной v_q , зависящее от значений переменных v_1, v_2, \dots, v_{q-1} ; $f(v_1, v_2, \dots, v_q)$ – формула, содержащая переменные v_1, v_2, \dots, v_q , f – формула, не содержащая переменных.

Элементы множества параметров P^m являются подмножеством множества имен основных понятий уровня m , определенных в предложениях вида (1) или (2), входящих в Φ^m . Все элементы P^m задают термины для описания онтологии уровня $m-1$. Если множество $P^m \neq \emptyset$, будем называть O^m необогащенной системой логических соотношений уровня m с параметрами. В противном случае O^m является необогащенной системой логических соотношений уровня m без параметров.

Элементы множества $C^m = \{c^m_1, c^m_2, \dots, c^m_z\}$ являются конструкторами сортов, определяющими способ построения сортов терминов онтологий уровней, меньших m . Каждое c^m_i сопоставляется имени i -го конструктора λ - терм:

$t \equiv (\lambda(v^1_1: M^1_1) (v^1_2: M^1_2) \dots (v^1_{q1}: M^1_{q1}) (\lambda(v^2_1: M^2_1(v_1, \dots, v_{q1})) (v^2_2: M^2_2(v_1, \dots, v_{q1})) \dots (v^2_{q2}: M^2_{q2}(v_1, \dots, v_{q1})) \dots (\lambda(v^s_1: M^s_1(v_1, \dots, v_{qs-1})) (v^s_2: M^s_2(v_1, \dots, v_{qs-1})) \dots (v^s_{qs}: M^s_{qs}(v_1, \dots, v_{qs-1})) M(v^1_1, \dots, v^s_{qs}))) \dots)$, где

- t – имя конструктора;

- $(\lambda(v^1_1: M^1_1) (v^1_2: M^1_2) \dots (v^1_{q1}: M^1_{q1}) (\lambda(v^2_1: M^2_1(v_1, \dots, v_{q1})) (v^2_2: M^2_2(v_1, \dots, v_{q1})) \dots (v^2_{q2}: M^2_{q2}(v_1, \dots, v_{q1})) \dots (\lambda(v^s_1: M^s_1(v_1, \dots, v_{qs-1})) (v^s_2: M^s_2(v_1, \dots, v_{qs-1})) \dots (v^s_{qs}: M^s_{qs}(v_1, \dots, v_{qs-1})) M(v^1_1, \dots, v^s_{qs}))) \dots)$ есть λ -терм;

- s – порядок конструктора, $1 \leq s \leq m-1$;

- $v^1_1, v^1_2, \dots, v^s_{qs}$ – параметры конструктора; параметры $v^{i+1}_1, v^{i+1}_2, \dots, v^{i+1}_{q_{i+1}}$ будем называть параметрами $(s-i)$ -го порядка;

- $M^1_1, M^1_2, \dots, M^1_{q1}, \dots, M^s_{qs}$ – множества значений параметров конструктора, причем определение хотя бы одного из множеств $M^1_1, M^1_2, \dots, M^1_{q1}$ зависит от параметров уровня m ;

- $M(v^1_1, \dots, v^s_{qs})$ – определение множества, зависящего от параметров v^1_1, \dots, v^s_{qs} .

Множество предложений $T^m = \Phi^m \cup C^m$ будем называть множеством логических соотношений системы O^m .

Назовем моделью для T^m такую допустимую функцию интерпретации, что для всех предложений f , задающих связи между понятиями, выполнено $J_{\alpha, \emptyset}(f) = \text{true}$, и для всех предложений вида $(v_1: M_1) (v_2: M_2) \dots (v_q: M_q) f(v_1, v_2, \dots, v_q)$ выполнено $J_{\alpha, \theta}((v_1: M_1) (v_2: M_2) \dots (v_q: M_q) f(v_1, v_2, \dots, v_q)) = \text{true}$ при всех $\theta = \{v_1/c_1, \dots, v_q/c_q\}$, где $c_1 \in J_{\alpha, \theta_1}(M_1)^3$, $c_2 \in J_{\alpha, \theta_2}(M_2(v_1)), \dots, c_q \in J_{\alpha, \theta_q}(M_q(v_1, v_2, \dots, v_{q-1}))$,

³ Здесь и далее $J_{\alpha, \theta}(t)$ обозначает значение, полученное в результате подстановки в терм t значений, задаваемых функцией интерпретации α и подстановкой θ .

θ_1 - пустая подстановка, $\theta_2 = \{v_1/c_1\}, \dots, \theta_q = \{v_1/c_1, \dots, v_{q-1}/c_{q-1}\}$. Необогащенную систему логических соотношений O^m назовем *семантически корректной*, если существует хотя бы одна модель для T^m .

Переход от модели онтологии уровня m к модели онтологии (при $m \geq 3$) или модели знаний (при $m=2$) производится заданием обогащения системы O^m . Задание онтологии уровня $m-1$ в терминах онтологии уровня m предполагает определение: понятий онтологии уровня $m-1$, имена которых скрыты параметрами онтологии уровня m ; понятий онтологии уровня $m-1$ с использованием конструкторов сорта; онтологических соглашений онтологии уровня $m-1$; конструкторов сорта уровня $m-1$; параметров уровня $m-1$. Поэтому *обогащение необогащенной системы логических соотношений* O^m есть пятерка вида $k^m = \langle \alpha^m_P, EN^m, ER^m, EC^m, EP^m \rangle$, где α^m_P – интерпретация параметров уровня m , EN^m – множество определений понятий уровня $m-1$, ER^m – множество связей между понятиями уровня $m-1$, EC^m – множество определений конструкторов уровня $m-1$, EP^m – множество параметров уровня $m-1$. Множества EN^m, ER^m, EP^m, EC^m могут быть пустыми, но $EN^m \cup ER^m \cup EP^m \cup EC^m \neq \emptyset$. При $m=2$ $EN^m \cup EC^m = \emptyset$.

При $m \geq 3$ α^m_P определяет термины онтологии $(m-1)$ -го уровня, ограничения на множества их значений и связи между значениями терминов: множество терминов онтологии образуют значения объектных параметров, ограничения на множества их значений и связи между значениями терминов задает интерпретация функциональных и предикатных параметров. При $m=2$ α^2_P сопоставляет объектным параметрам объекты или множества объектов определяемого раздела предметной области, функциональным и предикатным параметрам – функциональные и нефункциональные отношения между объектами.

Элементы множества EN^m определяют термины онтологии раздела, задавая множества их значений с помощью одного из конструкторов первого порядка, принадлежащего множеству C^m . Каждое определение понятия уровня $m-1$ (элемент множества EN^m) сопоставляет названию понятия множество, являющееся результатом применения конструктора сорта первого порядка $t \equiv (\lambda(v_1: M_1) (v_2: M_2) \dots (v_q: M_q) M(v_1, \dots, v_q))$, определенного на уровне m : $p \equiv t(c_1, c_2, \dots, c_{q1})$, где p – название понятия, $t(c_1, c_2, \dots, c_{q1})$ – применение конструктора первого порядка, определенного на уровне m , причем $c_1 \in J_{\alpha, \theta_1}(M_1)$, $c_2 \in J_{\alpha, \theta_2}(M_2)$, ..., $c_q \in J_{\alpha, \theta_q}(M_q)$, где $\alpha = \alpha^m_P$, θ_1 - пустая подстановка, $\theta_2 = \{v_1/c_1\}, \dots, \theta_q = \{v_1/c_1, \dots, v_{q-1}/c_{q-1}\}$. При заданной функции интерпретации α

Функция интерпретации α сопоставляет имени его значение. Подстановка θ сопоставляет переменным их значения.

применение конструктора первого порядка t к набору значений c_1, c_2, \dots, c_q параметров v_1, v_2, \dots, v_q дает множество $J_{\alpha, \theta}(M(v_1, \dots, v_q))$, где $\theta = \{v_1/c_1, v_2/c_2, \dots, v_q/c_q\}$.

При записи утверждений, задающих связи между понятиями уровня $m-1$ (элементов множества ER^m), используются названия основных и вспомогательных понятий, определенных в EN^m и Φ^m и не принадлежащих множеству P^m . Элементы множества ER^m задают онтологические соглашения раздела. Если онтологии всех разделов могут быть представлены множеством значений параметров, то ER^m пусто.

Каждое определение конструктора сорта (элемент множества EC^m) сопоставляет имени конструктора λ -терм, являющийся результатом применения конструктора сорта $t \equiv (\lambda(v^1_1: M^1_1) (v^1_2: M^1_2) \dots (v^1_{q1}: M^1_{q1}) (\lambda(v^2_1: M^2_1(v_1, \dots, v_{q1})) (v^2_2: M^2_2(v_1, \dots, v_{q1})) \dots (v^2_{q2}: M^2_{q2}(v_1, \dots, v_{q1})) \dots (\lambda(v^s_1: M^s_1(v_1, \dots, v_{qs-1})) (v^s_2: M^s_2(v_1, \dots, v_{qs-1})) \dots (v^s_{qs}: M^s_{qs}(v_1, \dots, v_{qs-1})) M(v^1_1, \dots, v^s_{qs})) \dots)$, определенного на уровне m : $t1 \equiv t(c_1, c_2, \dots, c_{q1})$, где $t1$ – имя конструктора; $c_1 \in J_{\alpha, \theta_1}(M^1_1)$, $c_2 \in J_{\alpha, \theta_2}(M^1_2)$, ..., $c_{q1} \in J_{\alpha, \theta_{q1}}(M^1_{q1})$, где $\alpha = \alpha^m_P$, θ_1 – пустая подстановка, $\theta_2 = \{v_1/c_1\}, \dots, \theta_{q1} = \{v_1/c_1, \dots, v_{q1-1}/c_{q1-1}\}$; $t(c_1, c_2, \dots, c_{q1})$ – применение конструктора m -го уровня t , причем порядок конструктора s удовлетворяет условию: $1 \leq s \leq m-1$. При заданной функции интерпретации α применение конструктора s -го порядка t к набору значений c_1, c_2, \dots, c_{q1} параметров v_1, v_2, \dots, v_{q1} дает конструктор $(s-1)$ -го порядка $t(c_1, c_2, \dots, c_{q1})$, значение которого есть λ -терм вида $(\lambda(v^2_1: J_{\alpha, \theta}(M^2_1)) (v^2_2: J_{\alpha, \theta}(M^2_2)) \dots (v^2_{q2}: J_{\alpha, \theta}(M^2_{q2})) \dots (\lambda(v^s_1: J_{\alpha, \theta}(M^s_1)) (v^s_2: J_{\alpha, \theta}(M^s_2)) \dots (v^s_{qs}: J_{\alpha, \theta}(M^s_{qs})) J_{\alpha, \theta}(M(v^1_1, \dots, v^s_{qs}))) \dots$, где $\theta = \{v_1/c_1, v_2/c_2, \dots, v_{q1}/c_{q1}\}$.

Множество EP^m является подмножеством множества названий основных понятий, определенных в EN^m и Φ^m и не принадлежащих множеству P^m . Элементы множества EP^m будем называть терминами для описания онтологии уровня $m-2$.

Определим операцию $O^m \bullet k^m$ применения обогащения $k^m = <\alpha^m_P, EN^m, ER^m, EC^m, EP^m>$ к необогащенной системе логических соотношений $O^m = <\Phi^m, P^m, C^m>$. Результатом данной операции является необогащенная система логических соотношений $(m-1)$ -го уровня $O^{m-1} = <\Phi^{m-1}, P^{m-1}, C^{m-1}>$, обладающая следующими свойствами: $\Phi^{m-1} = \Phi^m \cup EN^m \cup \alpha^m_P \cup ER^m; P^{m-1} = EP^m; C^{m-1} = EC^m \cup C^m$. Операция $O^m \bullet k^m$ определяет способ построения системы O^{m-1} , используя обогащение k^m .

Обогащенная система логических соотношений (ОСЛС) S есть результат применения обогащения k^2 к необогащенной системе логических соотношений O^2 , $S = O^2 \bullet k^2$, причем $S = O^1 = <\Phi^1, \emptyset, \emptyset>$, т.е. обогащенная система

логических соотношений S не имеет параметров и конструкторов. При моделировании сложно-структурной предметной области каждая обогащенная система логических соотношений S является модулем модели знаний. Заметим, что любой модуль модели онтологии, определяемый в терминах некоторого модуля O_1 модели онтологии уровня 2, является элементом множества $\{O_2 \bullet k_2 \mid k_2 \in En(O_2)\}$. Множество параметров уровня 2 является множеством терминов онтологии знаний. Множество неизвестных образует множество терминов, используемых при описании ситуаций действительности, т.е. входят в онтологию действительности.

Будем называть множеством неизвестных X системы S множество названий основных понятий, не содержащих параметров всех уровней.

Решением ОСЛС S будем называть такую интерпретацию неизвестных α_X , что существует модель α для Φ^1 такая, что сужение⁴ α на P^m совпадает с α_P^m , сужение α на P^{m-1} совпадает с α_P^{m-1}, \dots , сужение α на P^1 совпадает с α_P^1 , а сужение α на X совпадает с α_X . Дадим содержательный комментарий к введенному понятию: множество значений неизвестных ОСЛС является моделью некоторой ситуации; если ситуация принадлежит действительности предметной области, то ее модель является решением n -уровневой системы логических соотношений. Очевидно, что если ОСЛС есть модель модуля знаний, то множество ее решений не может быть пусто.

Модель сложно-структурированной предметной области представляется n -уровневой системой логических соотношений Ξ , которая есть последовательность $O^n, \{<O^n, O^{n-1}>\}, \dots, \{<O^n, O^{n-1}, \dots, O^2>\}, \{<O^n, O^{n-1}, \dots, O^2, S>\}$, где

- O^n – необогащенная система логических соотношений уровня n ;
- $\{<O^n, O^{n-1}>\}$ – множество необогащенных систем логических соотношений уровня $n-1$, причем каждая из этих систем получена из O^n в результате применения некоторого допустимого для O^n обогащения k^n ;
- $\{<O^n, O^{n-1}, \dots, O^i>\}$ – множество необогащенных систем логических соотношений уровня i , причем каждая из этих систем получена из одной из систем множества $\{<O^n, O^{n-1}, \dots, O^{i+1}>\}$ в результате применения некоторого допустимого обогащения;
- $\{<O^n, O^{n-1}, \dots, O^2, S>\} = \{<O^n, O^{n-1}, \dots, O^2, O^1>\}$ – множество обогащенных систем логических соотношений, причем каждая из этих систем получена из

⁴ Интерпретация α является функцией, сопоставляющей именам их значения. Сужение понимается в традиционном для функций смысле: если $\alpha: X \rightarrow Y$ и $M \subseteq X$, то сужение функции α на M есть $\alpha|_M: M \rightarrow Y$.

одной из систем множества $\{<O^n, O^{n-1}, \dots, O^2>\}$ в результате применения некоторого допустимого обогащения.

Последовательность $O^n, \{<O^n, O^{n-1}>\}, \dots, \{<O^n, O^{n-1}, \dots, O^2>\}$ назовем $(n-1)$ уровневой необогащенной системой логических соотношений. Она представляет $(n-1)$ -уровневую модель онтологии сложно-структурированной области.

Решением n-уровневой системы логических соотношений Ξ , являющейся последовательностью $O^n, \{<O^n, O^{n-1}>\}, \dots, \{<O^n, O^{n-1}, \dots, O^2>\}, \{<O^n, O^{n-1}, \dots, O^2, S>\}$, назовем множество решений всех обогащенных систем логических соотношений из множества $\{<O^n, O^{n-1}, \dots, O^2, S>\}$. Множество всех решений системы Ξ будем обозначать $A(\Xi)$. Множество $A(\Xi)$ есть модель действительности предметной области. Очевидно, что если n-уровневая система логических соотношений является моделью сложно-структурированной области, то множество ее решений (модель действительности) не может быть пусто.

Теорема 1. (об исключении параметров обогащенной системы логических соотношений). Для любой обогащенной системы логических соотношений S с параметрами, заданного параметра – имени множества p существует эквивалентная ей обогащенная система логических соотношений S' , не содержащая этого заданного параметра (системы S и S' эквивалентны, если множества их решений совпадают).

Следствие. Для любой обогащенной системы логических соотношений с параметрами существует эквивалентная ей обогащенная система логических соотношений без параметров.

Теорема 2. (об исключении параметров необогащенных систем логических соотношений уровня 2). Если $O = <\Phi_1 \cup \Phi_2, P_1 \cup P_2, C>$ – необогащенная система логических соотношений уровня 2, имеющая параметры, где Φ_1 есть множество предложений, не содержащих параметров из множества P_2 , то для необогащенной системы логических соотношений уровня 2 $O_1 = <\Phi_1, P_1, C>$ существует всюду определенное однозначное отображение h множества $En(O)$ в $En(O_1)$, такое, что для всех $k \in En(O)$ обогащенная система $O \bullet k$ является эквивалентной обогащенной системе $O_1 \bullet h(k)$. Будем называть систему O_1 квазиэквивалентной системе O .

Теорема 3. (об исключении параметров необогащенных систем логических соотношений уровня m). Если $O = <\Phi_1 \cup \Phi_2, P_1 \cup P_2, C>$ – необогащенная система логических соотношений уровня m, имеющая параметры, где Φ_1 есть множество предложений, не содержащих параметров из множества P_2 , то для необогащенной системы логических соотношений уровня

m с параметрами $O_1 = \langle \Phi_1, P_1, C \rangle$ существует всюду определенное однозначное отображение h множества $En(O)$ в $En(O_1)$, такое, что для всех $k \in En(O)$ необогащенная система (уровня $m-1$) $O_1 \bullet h(k)$ является квазиэквивалентной НСЛС уровня $m-1$ $O \bullet k$.

Сформулируем *критерий адекватности* модели и предметной области: будем говорить, что модель предметной области адекватна этой предметной области, если множество моделей всех ситуаций, образующих действительность этой предметной области, совпадает с множеством решений n -уровневой системы логических соотношений, являющейся моделью этой предметной области. Критерий адекватности формулирует необходимые и достаточные условия, при выполнении которых модель будет адекватна предметной области. Из данного критерия следует, что если модель адекватна предметной области, то модель каждой ситуации, принадлежащей действительности данной области, будет являться решением n -уровневой системы логических соотношений, являющейся моделью этой предметной области, а модель ситуации, не принадлежащей действительности предметной области, не будет принадлежать множеству решений

Поскольку множество ситуаций действительности предметной области бесконечно, то практически полезными являются следующие критерии:

- *критерий неадекватности* модели и предметной области: модель предметной области, представленная n -уровневой системой логических соотношений, является неадекватной моделью предметной области, если известна такая ситуация, имевшая место в действительности, что ее модель не является решением этой системы логических соотношений;

- *критерия неправильности* модели: n -уровневая система логических соотношений не является моделью предметной области, если существует ее решение, которое не является моделью ситуации, имевшей место в действительности предметной области.

Критерий неадекватности позволяет убедиться, что не нарушено необходимое условие адекватности модели и предметной области, а критерий неправильности - что не нарушено достаточное условие адекватности модели и предметной области.

Для представления моделей сложно-структурированных предметных областей в работе определен класс многосортных языков прикладной логики (ЯПЛ). Все языки данного класса имеют общее ядро. Для расширения набора математических символов для конкретных приложений используется набор расширений, состоящих из стандартного расширения (общего для всех предметных областей) и набора специализированных расширений (своего для каждой предметной области). Все расширения имеют названия. Каждый

конкретный язык прикладной логики включает ядро, стандартное расширение и некоторые специализированные расширения, т.е. характеризуется некоторой совокупностью названий расширений. Стандартное расширение ЯПЛ вводит синтаксические конструкции, присутствующие в некоторых специальных языках математической логики, арифметические и теоретико-множественные константы, операции и отношения, а также ограниченные кванторы вида:

1. йота-оператор $(\iota(v:t) f(v))$, где v – переменная, t – терм, значением которого является множество, $f(v)$ - формула; йота-оператор позволяет выделить из множества, заданного термом t , единственный элемент, удовлетворяющий условию, определяемому формулой $f(v)$;
2. ламбда-терм, определяющий функцию с m аргументами, $(\lambda(v_1:t_1), (v_2:t_2), \dots, (v_m:t_m) t(v_1, v_2, \dots, v_m))$, где v_1, v_2, \dots, v_m – переменные, t_1, t_2, \dots, t_m – термы, $t(v_1, v_2, \dots, v_m)$ – терм, зависящий от переменных v_1, v_2, \dots, v_m ;
3. ламбда-терм, определяющий предикат, $(\lambda(v_1:t_1), (v_2:t_2), \dots, (v_m:t_m) f(v_1, v_2, \dots, v_m))$ где v_1, \dots, v_m – переменные, t_1, \dots, t_m – термы, $f(v_1, \dots, v_m)$ – формула, зависящая от переменных v_1, \dots, v_m .

В работе определены специализированные расширения «Интервалы» (содержащее термы, позволяющие задавать интервалы) и «Математические кванторы» (содержащее ограниченные кванторы, позволяющие определять термы в виде квантов суммирования, произведения, объединения и пересечения, а в формулах использовать ограниченные кванторы всеобщности и существования).

Язык содержит три типа предложений, используемых для определения основных и вспомогательных понятий онтологии, а также ограничений на множества значений понятий. Для всех используемых в предложениях объектных, функциональных и предикатных символов должен быть определен сорт. Сорта используемых в предложениях свободных переменных определяются префиксом предложения. Если в предложение не входят свободные переменные, то префикс пуст. Сорта связанных переменных определяются ограниченными кванторами вида: $(A(v_1: t_1) \dots (v_m: t_m) t)$ или $(A(v_1: t_1) \dots (v_m: t_m) f)$, где A обозначение операции (уникальное для каждого типа квантора), $(v_1: t_1) \dots (v_m: t_m)$ – множество описаний связанных переменных, t – терм, а f - формула.

Модуль модели онтологии или знаний представляется прикладной логической теорией (ПЛТ). Каждая ПЛТ имеет имя; параметрами имени являются имена используемых расширений. Любая ПЛТ $T(E_1, E_2, \dots, E_k)$, где E_1, E_2, \dots, E_k - имена расширений языка, использованных для записи теории, есть

пара $\langle TS, SS \rangle$, где TS - конечное множество (возможно, пустое) названий других теорий, SS - конечное множество (возможно, пустое) предложений.

Язык относится к классу языков с декларативной семантикой, т.е. его семантика должна позволять выполнить проверку онтологических соглашений, определенных для онтологии уровня $i-1$ онтологией уровня i , проверку ограничений целостности знаний, заданных онтологией уровня 2, проверку ограничений целостности ситуаций, заданных онтологией уровня 2, а также проверку соответствия модели ситуации моделям онтологии и знаний. Поэтому семантика языка определяет формальную процедуру замены терминов и переменных их значениями и условия, при которых такая процедура применима. При этом предполагается, что на множестве имён задана функция α , значение которой для каждого имени есть интерпретация этого имени. Интерпретация α является допустимой для ПЛТ, если для всех предложений, задающих ограничения на интерпретацию имён с телом f выполнено: $J_{\alpha\theta}(f) = \text{true}$ при всех допустимых подстановках θ . Прикладная логическая теория называется семантически корректной, если существует допустимая функция интерпретации. Очевидно, что модули модели онтологии и знаний должны быть представлены семантически корректными логическими теориями.

В третьей главе диссертации описаны методы анализа сложно-структурированных предметных областей.

При выполнении *анализа "снизу вверх"* для сложно-структурированной предметной области предполагается, что онтологии уровня 2 для нескольких разделов уже построены с использованием какого-либо из существующих методов онтологического анализа. Задачей анализа "снизу вверх" является поиск "регулярностей" в этих онтологиях.

Этап 1. Построение онтологии уровня 3 и ее модели. Выполнение данного этапа включает следующие шаги:

1.1. Разбиение множества онтологических соглашений на группы таким образом, чтобы в одну группу попали соглашения с похожим смыслом, формулировка общего смысла для соглашений каждой группы, определение терминов, позволяющих этот смысл представить. Этот шаг повторяется для всех групп утверждений.

1.2. Разбиение множества терминов онтологии предыдущего уровня на группы таким образом, чтобы в одну группу попали термины с похожим смыслом или похожей схемой определения, определение терминов – названий множеств терминов каждой группы.

1.3. Определение величин, необходимых для представления значений терминов, введенных на шагах 1.1 и 1.2.

1.4. Определение объемов понятий, обозначенных терминами, как подмножества величин.

1.5. Формулировка ограничений на множество значений введенных терминов. Определение конструкторов множеств терминов.

1.6. Формулировка общего смысла соглашений каждой группы с помощью терминов, введенных на шагах 1.1 и 1.2.

1.5. Построение модели онтологии.

1.8. Поиск ошибок в онтологии.

Этап 2. Построение онтологии уровня i и ее модели (повторяются шаги 1.1- 1.8. для онтологии уровня i). Если существует несколько похожих онтологий уровня i, то этап 2 повторяется для построения онтологии уровня i+1.

Теперь определим *метод анализа "сверху вниз"*. Пусть построена онтология уровня m. Эта онтология задает схему анализа раздела предметной области при построении онтологии уровня m-1. Определим этапы анализа методом "сверху вниз".

Этап 1. Построение онтологий уровня m-1 и их моделей.

1.1. Вначале должны быть определены понятия рассматриваемой области, которые могут быть значениями параметров онтологии уровня m. Для каждого такого понятия необходимо проверить, что его объем совпадает с объемом понятия, определяемого онтологией уровня m.

1.2. После того, как значения параметров онтологии уровня m определены, проверяется, все ли множество онтологических соглашений уровня m-1 определяет онтология уровня m при заданных значениях параметров. Для этого к множеству онтологических соглашений уровня m применяется теорема об исключении параметров, в результате которой будет построено множество онтологических соглашений уровня m-1. Если онтология уровня m определяет не все онтологические соглашения уровня m-1, то формулируются недостающие соглашения в терминах онтологии уровня m-1. Они задают дополнительные ограничения на значения терминов онтологии уровня m-1.

1.3. Далее задаются термины - элементы множеств, определение которых зависит от параметра. При определении таких терминов также необходимо убедиться, что объемы понятий, обозначенных такими терминами, совпадают с объемами понятий, заданными при определении в онтологии уровня m множеств, зависящих от параметра.

1.4. Определяется подмножество терминов, которые играют роль параметров уровня m-1. Эти термины используются в дальнейшем на первом шаге анализа "сверху вниз" при построении онтологии уровня m-2.

1.5. Создание модели онтологии с использованием уже существующей модели онтологии уровня m, представленной в классе многоуровневых систем

логических соотношений, состоит в задании обогащения для необогащенной системы логических соотношений – модели онтологии уровня m .

Если оказалось что модель онтологии высокого уровня не позволяет определить все термины и онтологические соглашения определяемой онтологии, то производится ее усложнение. Для этого выполняется анализ "снизу вверх", в результате которого добавляются новые термины и онтологические соглашения в онтологию верхнего уровня.

Этап 2. Построение онтологий, номер уровня которых меньше $m-1$, и их моделей. Построенная онтология уровня $m-1$ определяет схему анализа подразделов данного раздела предметной области. Выполняются шаги 1.1 – 1.5 для каждого подраздела.

Этап 3. Построение модели знаний. Схему анализа для каждого модуля знаний задает модуль онтологии уровня 2. Вначале определяются значения параметров онтологии уровня 2, т.е. определяются структурированные знания в соответствии со структурой, задаваемой определениями параметров онтологии уровня 2. Далее формулируются знания, для которых онтология уровня 2 не определяет структуру. При необходимости выполняется анализ методом "снизу вверх".

При построении модели сложно-структурированной предметной области могут повторно использоваться уже построенные модули. В этом случае модель строится как произведение систем логических соотношений.

Четвертая глава диссертации посвящена разработке многоуровневой онтологии реальной сложно-структурированной предметной области, состоящей из нескольких разделов. В качестве такой области в работе используется химия. Примерами ее разделов являются физическая, органическая и аналитическая химия.

С использованием метода анализа "снизу вверх" была построена модель онтологии уровня 4 для данной области, охватывающая физическую и органическую химию в объеме университетских курсов. Метод "сверху вниз" был применен для раздела рентгено-флуоресцентного анализа (подраздела аналитической химии).

Для представления моделей использована четырехуровневая система логических соотношений, принадлежащая классу, определенному в главе 2. Модель записана средствами языка прикладной логики, определенного в гл. 2.

Моделью онтологии четвертого уровня является НСЛС четвертого уровня $O^4 = \langle \Phi^4, \text{Параметры онтологии уровня 4}, \text{Определения конструкторов сортов уровня 4} \rangle$. Приведем подмножество предложений прикладной логической теории Φ^4 .

1. Множества значений $\equiv R \cup I \cup N \cup L \cup (\{\} (R \cup I \cup N \cup L) \setminus \emptyset)$

2. Кортежи значений $\equiv (\cup (n: I[1, \infty)) \text{Множества значений } \hat{\wedge} n)$
 3. Сорт Типы сущностей : $\{ \}N \setminus \emptyset$
 4. (Тип: Типы сущностей) сорт Тип: $\{ \}(R \cup I \cup N \cup L) \cup \text{Кортежи значений}$
 5. (Тип1: Типы сущностей) (Тип2: Типы сущностей) $\setminus \{ \text{Тип1} \})$
 $j(\text{Тип1}) \cap j(\text{Тип2}) = \emptyset$
 6. Кортежи типов сущностей $\equiv (\cup (n: I[1, \infty)) (\text{Типы сущностей } \hat{\wedge} n))$
 7. Сущности $\equiv (\cup (\text{Тип: Типы сущностей}) j(\text{Тип}))$
 8. Тип сущности $\equiv (\lambda(\text{Сущность: Сущности}) (i (\text{Тип: Типы сущностей})$
 $\text{Сущность} \in j(\text{Тип}))$
 9. Сорт Типы компонентов сущности: $(\text{Типы сущностей} \rightarrow \{ \}) \text{Типы сущностей})$
 10. (Тип: Типы сущностей) Тип \notin Типы компонентов сущности(Тип)
 11. Сорт Число шагов процесса: $I[0, \infty)$
 12. Сорт Типы сущностей процесса: $\{ \} \text{Типы сущностей} \setminus \emptyset$
 13. сорт Подмножества компонентов сущности: $((\text{Тип1} \rightarrow \text{Типы сущностей},$
 $\text{Тип2} \rightarrow \text{Типы компонент сущности}(\text{Тип1})) \rightarrow \{ \}N)$
 14. (Тип1: Типы сущностей) (Тип2: Типы компонент сущности(Тип1)) (элемент:
 $\text{Подмножества компонент сущности}(\text{Тип1}, \text{Тип2})$) сорт элемент: $(j(\text{Тип1}) \rightarrow$
 $\{ \} \{(v: \text{Сущности}) \text{ Тип сущности}(v) = \text{Тип2}\} \setminus \emptyset)$
 15. (Тип1: Типы сущностей) (Тип2: Типы компонент сущности(Тип1))
 $(\text{сущность: } j(\text{Тип1})) \text{ Подмножества компонент сущности}(\text{Тип1}, \text{Тип2}) \neq \emptyset \Rightarrow$
 $\text{Компоненты сущности}(\text{Тип1}, \text{Тип2})(\text{сущность}) = (\cup (\text{Элемент:}$
 $\text{Подмножества компонент сущности}(\text{Тип1}, \text{Тип2})) \text{ элемент(сущность)})$
 16. (Тип: Типы сущностей) (Номер шага: $I[1, \text{Число шагов процесса}] - 1$)
 $\text{Сущности процесса}(\text{Тип})(\text{Номер шага}) \neq \text{Сущности процесса}(\text{Тип})(\text{Номер шага} + 1)$
 17. (Тип: Типы сущностей) (Номер шага: $I[1, \text{Число шагов процесса}] - 1$)
 $\text{Сущности процесса}(\text{Тип})(\text{Номер шага}) \neq \text{Сущности процесса}(\text{Тип})(\text{Номер шага} + 1)$
- Параметрами четвертого уровня являются Типы сущностей, Типы компонент сущности, Типы сущностей процесса.

Теперь приведем примеры определений конструкторы сортов четвертого уровня.

1. Собственные свойства сущностей $\equiv (\lambda(\text{Тип сущности: Типы сущностей})$
 $(\lambda(\text{Область возможных значений: } \{ \}(\text{Множества значений} \cup \{ \}) \text{Кортежи значений})) (j(\text{Тип сущности}) \rightarrow \text{Область возможных значений}))$
2. Компоненты сущности $\equiv (\lambda(\text{Тип1: Типы сущностей}) (\text{Тип2: Типы компонент сущности}(\text{Тип1})) (j(\text{Тип1}) \rightarrow \{ \} \{(v: \text{Сущности}) \text{ Тип сущности}(v) = \text{Тип2}\} \setminus \emptyset))$

3. Свойства компонентов указанного типа $\equiv (\lambda(\text{Тип1: Типы сущностей}) \text{ (Тип2: Типы компонент сущности(Тип1)) } (\lambda(\text{Область возможных значений: } \{ \}(\text{Множества значений} \cup \{ \} \text{Кортежи значений})) \text{ (Сущность типа 1} \rightarrow j(\text{Тип1}), \text{ Сущность типа 2} \rightarrow \text{Компоненты сущности(Тип1, Тип2)}(\text{Сущность типа 1})) \rightarrow \text{Область возможных значений}))$
4. Свойства подмножества компонентов указанного типа $\equiv (\lambda(\text{Тип1: Типы сущностей}) \text{ (Тип2: Типы компонентов сущности(Тип1)) } (\text{Название подмножества: Подмножества компонентов сущности(Тип1, Тип2)}) (\lambda(\text{Область возможных значений: } \{ \}(\text{Множества значений} \cup \{ \} \text{Кортежи значений})) \text{ (Сущность типа 1} \rightarrow j(\text{Тип1}), \text{ Сущность типа 2} \rightarrow \text{Компоненты сущности(Тип1, Тип2)}(\text{Сущность типа 1})) \rightarrow \text{Область возможных значений}))$
5. Совместные свойства сущностей $\equiv (\lambda(\text{Кортеж типов: } \{ \} \text{Кортежи типов сущностей}) (\lambda(\text{Область возможных значений: } \{ \}(\text{Множества значений} \cup \{ \} \text{Кортежи значений})) (\times (i:I[1,length(\text{Кортеж типов})]) \{(\text{Сущность: Сущности}) \text{ Тип сущности(Сущность) = } \pi(i, \text{Кортеж типов})\}) \rightarrow \text{Область возможных значений}))$
6. Общие свойства сущности и компонента $\equiv (\lambda(\text{Тип1: Типы сущностей}) \text{ (Тип2: Типы компонентов сущности(Тип1)) } (\lambda(\text{Область возможных значений: } \{ \}(\text{Множества значений} \cup \{ \} \text{Кортежи значений})) (j(\text{Тип сущности}) \cup (\text{Сущность 1} \rightarrow j(\text{Тип1}), \text{ Сущность 2} \rightarrow \text{Компоненты сущности(Тип1, Тип2)}(\text{Сущность 1})) \rightarrow \text{Область возможных значений}))$
7. Собственные свойства системы $\equiv (\lambda(\text{Область возможных значений: } \{ \}(\text{Множества значений} \cup \{ \} \text{Кортежи значений})) (I[1, \text{Число шагов процесса}] \rightarrow \text{Область возможных значений}))$
8. Сущности процесса $\equiv (\lambda(\text{Тип: Типы сущностей процесса}) (I[1, \text{Число шагов процесса}] \rightarrow \{ \} \{(v: \text{Сущности}) \text{ Тип сущности}(v) = \text{Тип}\})$
9. Свойства сущностей процесса $\equiv (\lambda(\text{Тип: Типы сущностей процесса}) (\lambda(\text{Область возможных значений: } \{ \}(\text{Множества значений} \cup \{ \} \text{Кортежи значений})) (\text{Номер шага} \rightarrow I[1, \text{Число шагов процесса}], \text{ Сущность} \rightarrow \text{Сущности процесса(Тип)(Номер шага)}) \rightarrow \text{Область возможных значений}))$
10. Состав сущностей процесса $\equiv (\lambda(\text{Тип1: Типы сущностей процесса}) \text{ (Тип2: Типы компонентов сущностей(Тип1)) } (\text{Номер шага} \rightarrow I[1, \text{Число шагов процесса}], \text{ Сущность} \rightarrow \text{Сущности процесса(Тип1)(Номер шага)}) \rightarrow \{ \} \{(v: \text{Сущности}) \text{ Тип сущности}(v) = \text{Тип2}\} \setminus \emptyset)$
11. Свойства компонента сущности процесса $\equiv (\lambda(\text{Тип1: Типы сущностей процесса}) \text{ (Тип2: Типы компонентов сущности(Тип1)) } (\lambda(\text{Область возможных значений: } \{ \}(\text{Множества значений} \cup \{ \} \text{Кортежи значений}))$

(Номер шага → I[1, Число шагов процесса], Сущность → Сущности процесса(Тип1)(Номер шага), Компонента компоненты → Состав сущностей процесса(Тип1, Тип2)(Номер шага, Сущность)) → Область возможных значений)

Модули модели онтологии уровня 3 строятся посредством заданием обогащения модели онтологии уровня 4. В качестве примера приведем обогащение k^4 , которое позволяет получить модель онтологии уровня 3 для рентгено-флуоресцентного анализа. $K^4 = \langle \text{Значения параметров четвертого уровня}, \emptyset, \text{Множества ограничений}, \text{Определения конструкторов сортов третьего уровня}, \emptyset \rangle$.

Определим значения параметров четвертого уровня.

1. Типы сущностей $\equiv \{\text{Оболочки, Энергетические уровни, Радиационные переходы орбитальных электронов, Химические элементы, Радиоактивные изотопы, Энергии излучения}\}$
2. Типы компонентов сущности $\equiv (\lambda(\text{Тип: } \{\text{Оболочки, Энергетические уровни, Радиационные переходы орбитальных электронов, Химические элементы, Радиоактивные изотопы, Энергии излучения}\}) (\text{Тип} = \text{Химические элементы} \Rightarrow \{\text{Энергетические уровни, Радиационные переходы орбитальных электронов}\}), (\text{Тип} \neq \text{Химические элементы} \Rightarrow \emptyset\})$
3. Типы сущностей процесса $\equiv \{\text{Химические элементы, Энергии излучения}\}$

Определим множество ограничений

1. Оболочки $\subset \{\} \setminus \emptyset$
2. Энергетические уровни $\subset \{\} \setminus \emptyset$
3. Радиационные переходы орбитальных электронов $\subset \{\} \setminus \emptyset$
4. Химические элементы $\subset \{\} \setminus \emptyset$
5. Радиоактивные изотопы $\subset \{\} (\times \text{Химические элементы}, I(0, \infty)) \setminus \emptyset$
6. Энергии излучения $\subset \{\} R[0, \infty) \setminus \emptyset$

Определение конструкторов сортов третьего уровня выполняется с использованием конструкторов сортов четвертого уровня.

1. Собственные свойства оболочек \equiv Собственные свойства сущностей(Оболочки)
2. Собственные свойства уровней \equiv Собственные свойства сущностей(Энергетические уровни)
3. Собственные свойства переходов \equiv Собственные свойства сущностей(Радиационные переходы орбитальных электронов)
4. Собственные свойства элементов \equiv Собственные свойства сущностей(Химические элементы)

5. Свойства уровней элемента ≡ Свойства компонентов указанного типа(Химические элементы, Энергетические уровни)
6. Свойства переходов элемента ≡ Свойства компонентов указанного типа(Химические элементы, Радиационные переходы орбитальных электронов)
7. Собственные свойства изотопов ≡ Собственные свойства сущности(Радиоактивные изотопы)
8. Свойства элементов пробы ≡ Свойства компонентов процесса(Химические элементы)
9. Свойства энергий ≡ Свойства компонентов процесса(Энергии излучения)

Модули модели онтологии второго уровня получаются заданием обогащения для модулей модели онтологии третьего уровня. Модули модели знаний строятся заданием обогащений для модели онтологии второго уровня. В разработке онтологий второго уровня принимали участие эксперты соответствующих разделов предметной области.

Модель онтологии второго уровня для физической химии состоит из 8 связанных друг с другом модулей (рис. 2): "Свойства элементов", "Свойства



Рис. 2. Структура модульной онтологии уровня 2 для физической химии веществ", "Свойства реакций", "Основы термодинамики", "Термодинамика. Химические свойства", "Термодинамика. Физические свойства", "Термодинамика. Связь физических и химических свойств", "Химическая кинетика". Начало стрелки на рис. 2 и 3 задает модуль, при определении которого используются термины модуля (или модулей), в который входит стрелка. Модули 1-3 модели онтологии физической химии определяют

термины, используемые при описании свойств элементов, веществ и реакций. В модуле 4 определяются термины, используемые при описании общих свойств термодинамических систем и их компонентов. Состояния термодинамической системы могут изменяться в ходе физико-химического процесса. Состояния процесса задаются в дискретные моменты наблюдения. В модуле 5 определены термины, используемые при описании фазовых превращений веществ в ходе процесса, без учета химических превращений. В модуле 6 определены термины, используемые при описании химических превращений веществ в ходе процесса без учета фазовых превращений. И, наконец, в модуле 7 определены термины, используемые при описании физико-химических процессов. В модуле 8 определены термины, описывающие динамику прохождения процессов.

Онтология второго уровня и ее модель для органической химии состоит из 26 связанных друг с другом модулей (рис. 3). На рисунке не представлены

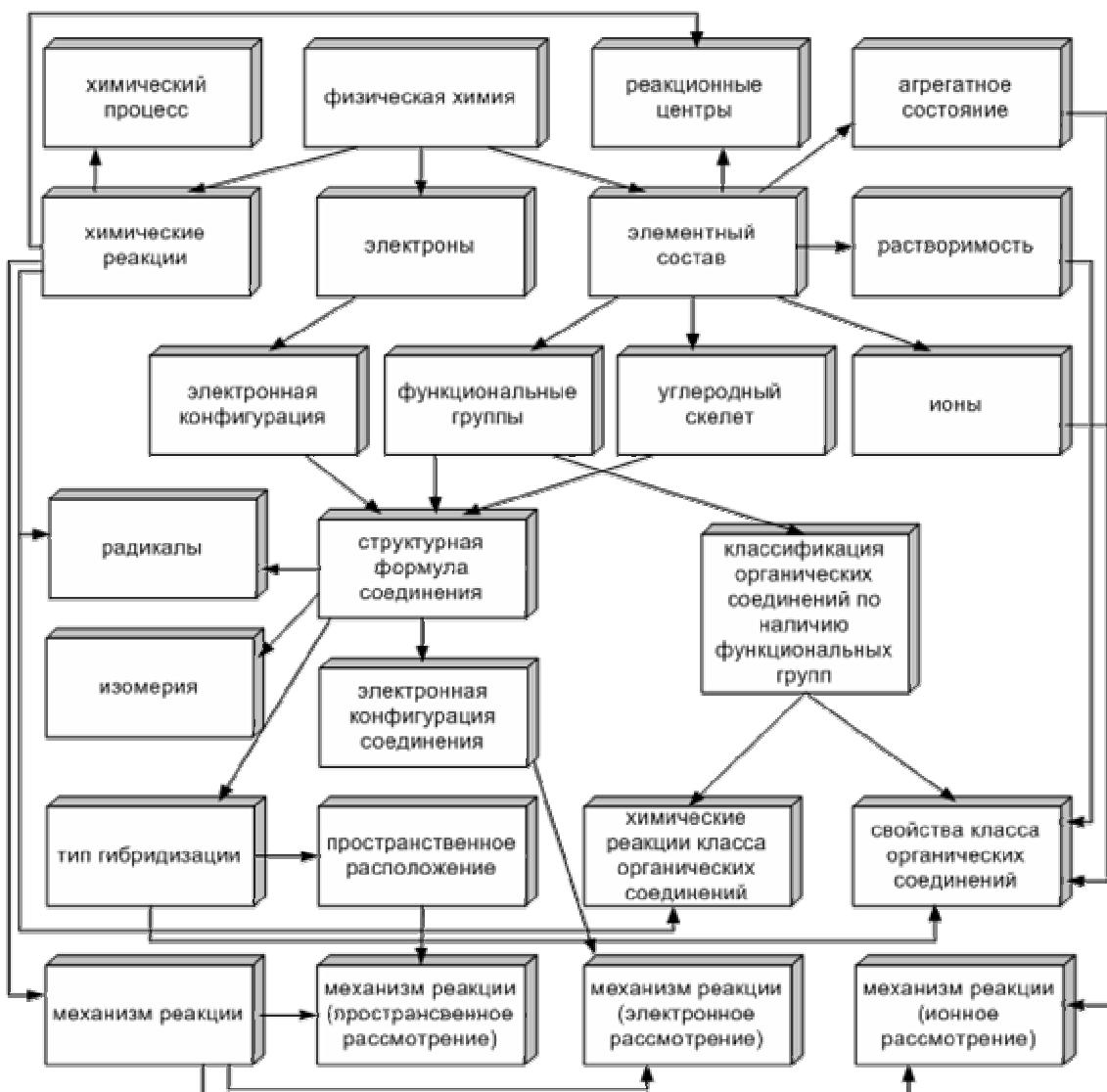


Рис. 3. Структура модульной онтологии уровня 2 для органической химии

вспомогательные модули "Константы онтологии" и "Номенклатура". Три модуля «Электроны», «Элементный состав» и «Химические реакции» используют терминологию онтологии физической химии и определяют термины для задания электронного строения химических элементов, элементного состава органических соединений и свойств химических реакций, соответственно. Модули «Агрегатное состояние», «Растворимость», «Углеродный скелет», «Функциональные группы», «Ионы» и «Реакционные центры» используют терминологию модуля «Элементный состав». Модуль «Реакционные центры» также использует терминологию модуля «Химические реакции». Перечисленные модули описывают терминологию, используемую при задании агрегатного состояния органических соединений, их растворимости в различных растворителях, представления их углеродного скелета, различных функциональных групп, ионов и реакционных центров соединений в химических реакциях. Модуль «Электронная конфигурация» использует терминологию модуля «Электроны» и описывает термины для задания электронной конфигурации химических элементов. Модуль «Структурная формула соединения» использует терминологию модулей «Электронная конфигурация», «Функциональные группы» и «Углеродный скелет» и определяет термины для описания структурных формул органических соединений. Его терминологию используют модули «Номенклатура», «Тип гибридизации», «Изомерия», «Электронная конфигурация соединения», «Радикалы» и «Связь». Модуль «Связь» также использует терминологию модуля «Ионы», а модуль «Радикалы» - модуля «Химические реакции». Модуль «Пространственное расположение» использует терминологию модуля «Тип гибридизации» и определяет терминологию для задания положения молекулы соединения в пространстве. Модуль «Классификация органических соединений по наличию функциональных групп» использует терминологию модуля «Функциональные группы» и описывает термины для задания классов органических соединений. Модули «Радикалы» и «Реакционные центры» используют также терминологию модуля «Химические реакции». Модуль «Химический процесс» определяет терминологию для задания свойств химических процессов. Модуль «Химические реакции класса органических соединений» использует терминологию модуля «Классификация органических соединений по наличию функциональных групп» и описывает термины для задания свойств химических реакций для классов органических соединений. Последний модуль «Свойства класса органических соединений» использует терминологию модулей «Классификация органических соединений по наличию функциональных групп», «Тип гибридизации», «Агрегатное состояние» и «Растворимость» и описывает свойства классов соединений.

Онтология второго уровня и ее модель для рентгено-флуоресцентного анализа состоит из 5 связанных друг с другом модулей: "Строение атомов", "Радиационные переходы", "Свойства изотопов", "Радиационные переходы химических элементов", "Рентгено-флуоресцентный анализ".

В пятой главе разработаны требования к специализированным оболочкам систем, основанных на знаниях, для сложно-структурных предметных областей, приведена общая архитектура специализированных оболочек, разработаны методы их реализации.

Пользователями специализированной оболочки СОЗ для сложно-структурной предметной области являются сопровождающий программист, инженер знаний, эксперт и специалист предметной области. Сопровождающий программист обеспечивает развитие программных компонентов, инженер знаний и эксперт – развитие информационных компонентов, а специалист предметной области использует готовые программные и информационные компоненты при решении своих прикладных задач.

Информационными компонентами оболочки являются многоуровневая модульная онтология и модульная база знаний сложно-структурной предметной области, а программными – редакторы информационных компонентов, специализированные решатели задач разных классов и подсистема сопровождения.

Разработка редактора многоуровневых онтологий и знаний основывается на онтологии уровня п. Редакторы многоуровневых онтологий и знаний (рис. 4) должны позволять создание и редактирование модульных онтологий и знаний, а также обеспечивать возможность повторного использования модулей при создании онтологий и знаний новых разделов и подразделов области, причем процесс создания и редактирования модуля онтологии уровня $i-1$ должен управляться онтологией уровня i , а процесс создания и редактирования модуля знаний – онтологией уровня 2. При создании онтологии и знаний редактор реализует операцию применения обогащения НСЛС, а его шаги определяются компонентами обогащения, описанными в главе 2.

Редактор онтологии должен обеспечивать возможность выбора того из существующих модулей онтологии уровня i , который управляет процессом редактирования создаваемого модуля. Аналогично при редактировании модуля знаний должна обеспечиваться возможность выбора «управляющего» модуля онтологии уровня 2.

Редакторы онтологии и знаний должны обеспечивать возможность задания структурированной и неструктурной части онтологии, а также структурированной и неструктурной части знаний, т.е. программным

компонентом этих редакторов должен быть специализированный редактор утверждений, позволяющий вводить онтологические соглашения и законы предметной области.

Редактор знаний должен обеспечивать возможность ввода/вывода значений нестандартных величин при редактировании знаний. Для значений нестандартных величин в предметной области может существовать способ их графического представления. Например, для химии графически может быть задана краткая структурная формула или структурная формула химического соединения. Поэтому редактор знаний должен обеспечивать возможность использования принятого в предметной области графического способа представления значений нестандартных величин при создании и редактировании знаний. Величина, которой принадлежит значение некоторого свойства, задается онтологией уровня 2. Поэтому редактор знаний должен обеспечивать автоматический выбор (управляемый онтологией уровня 2) средств для графического представления значений нестандартных величин при редактировании знаний.

Редактор онтологии интерпретирует онтологию уровня 1 при создании модуля онтологии уровня 1-1. Редактор знаний интерпретирует онтологию уровня 2 при создании модуля знаний. Одна и та же онтология может интерпретироваться разными способами в разных редакторах знаний. Редакторы знаний могут отличаться не только способом интерпретации знаний, но и интерфейсом. Очевидно, что более удобный интерфейс и более понятный эксперту способ интерпретации можно обеспечить для редактора, предназначенного для интерпретации одной онтологии, а не класса онтологий. Поэтому специализированная оболочка должна позволять использование редакторов, поддерживающих разные способы интерпретации модуля онтологии уровня 2 и предоставлять возможность эксперту выбора требуемого ему редактора знаний.

Таким образом, в состав редакторов информационных компонент должны входить (рис. 4): специализированный редактор многоуровневой модульной онтологии, специализированные редакторы знаний, управляемые онтологиями уровня 2, системы ввода/вывода значений нестандартных величин, редактор утверждений, позволяющий задавать законы и онтологические соглашения предметной области.

Каждый раздел (и подраздел) сложно-структурированной ПО характеризуется своим множеством классов прикладных задач, причем разные множества могут содержать как общие классы задач, так и специфичные для раздела (подраздела). Решатель задач может быть предназначен для решения классов задач одного раздела (в этом случае он использует онтологию и знания

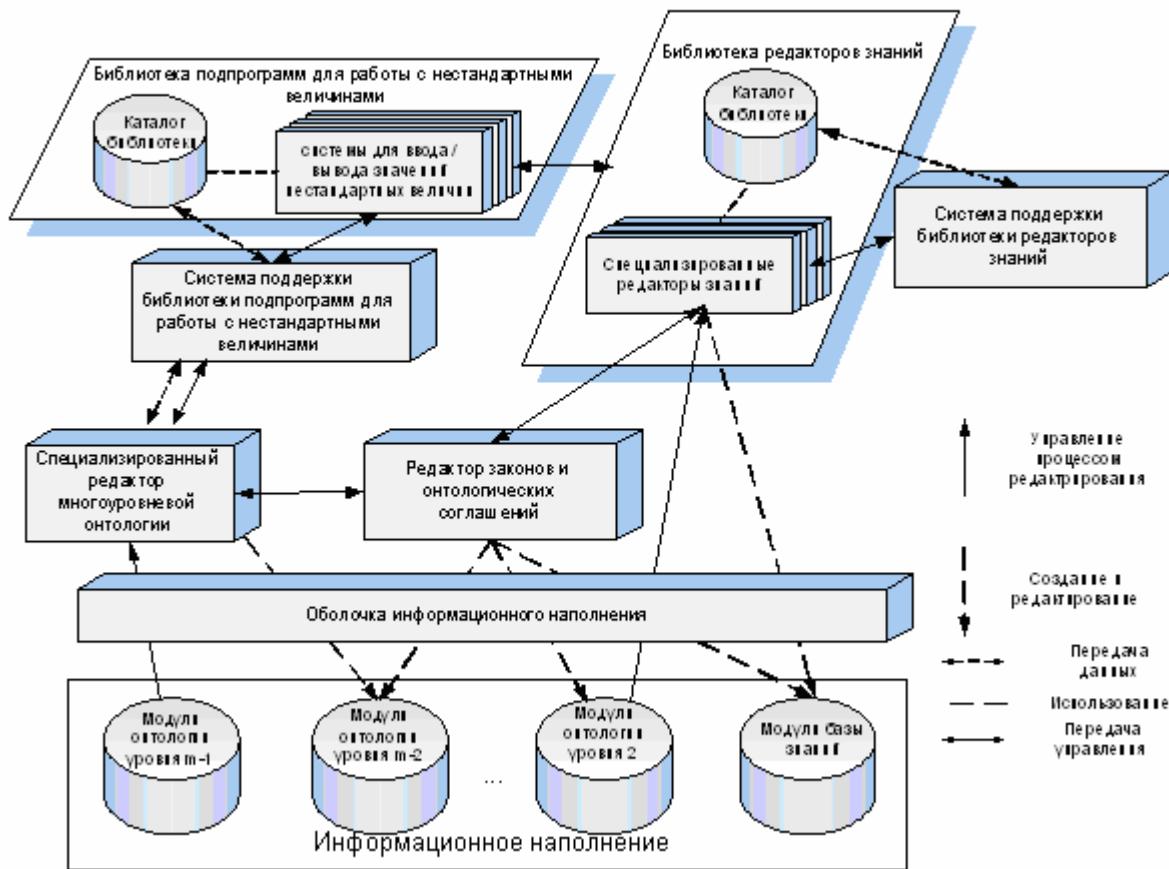


Рис. 4. Состав редакторов информационных компонентов

этого раздела), либо разных разделов (в этом случае он может использовать разные онтологии и знания). В первом случае используемая решателем онтология определяется классом задач. Во втором случае требуется дополнительное указание, какие онтологии и знания должны использоваться в процессе решения. Специализированная оболочка СОЗ для сложно-структурированной предметной области должна обеспечивать возможность решения задач разных классов, причем пользователь должен иметь возможность указания модуля онтологии и модуля знаний, которые надо использовать при решении задач.

При решении задач одного класса могут использоваться разные системы, имеющие различные характеристики сложности. Эти характеристики зависят от свойств исходных данных и условий задачи. Решатели задач одного класса могут также отличаться интерфейсом, использовать разные методы решения этого класса задач. Например, при вычислении значения некоторого свойства физико-химического процесса могут использоваться разные законы предметной области.

Таким образом, специализированная оболочка СОЗ должна содержать расширяемые библиотеки решателей задач разных классов, системы автоматического построения методов решения задач по их спецификации (рис.

5). Метод решения задач может быть представлен либо в виде алгоритма, либо в

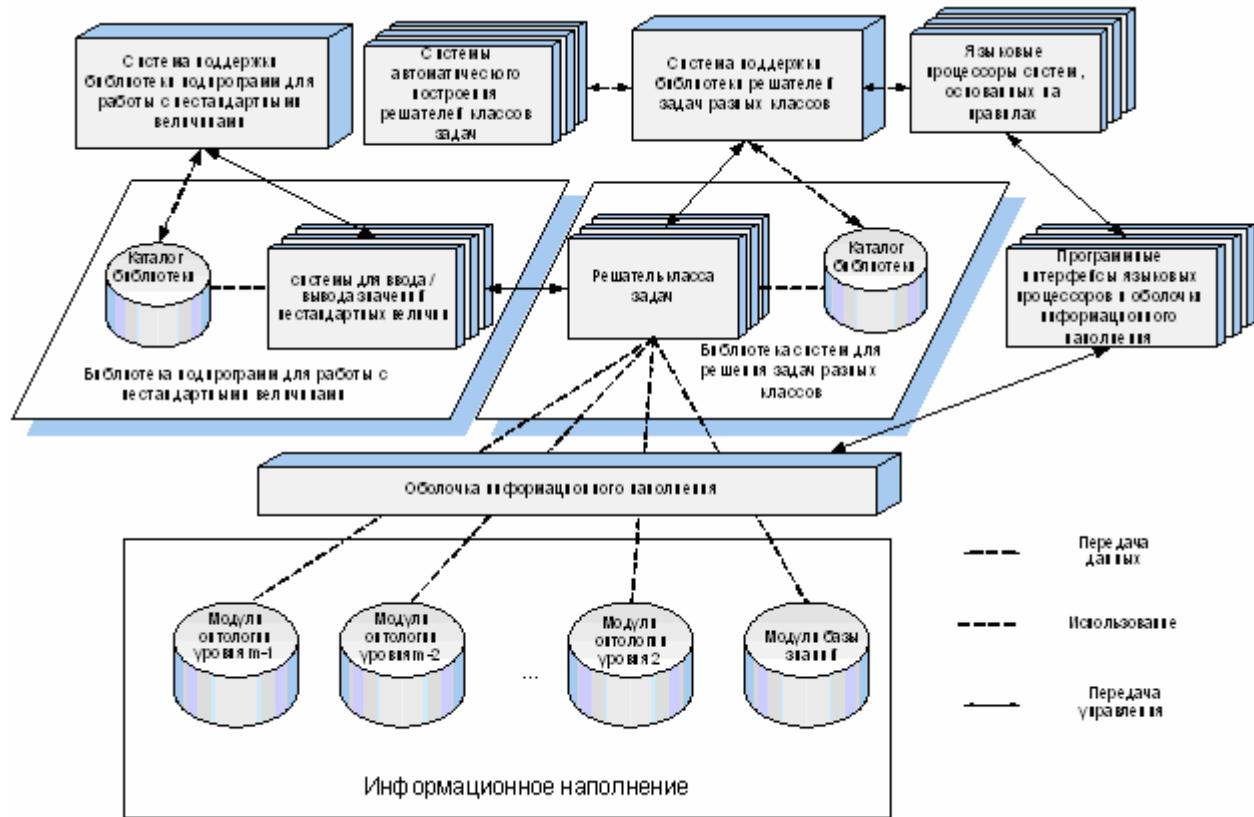
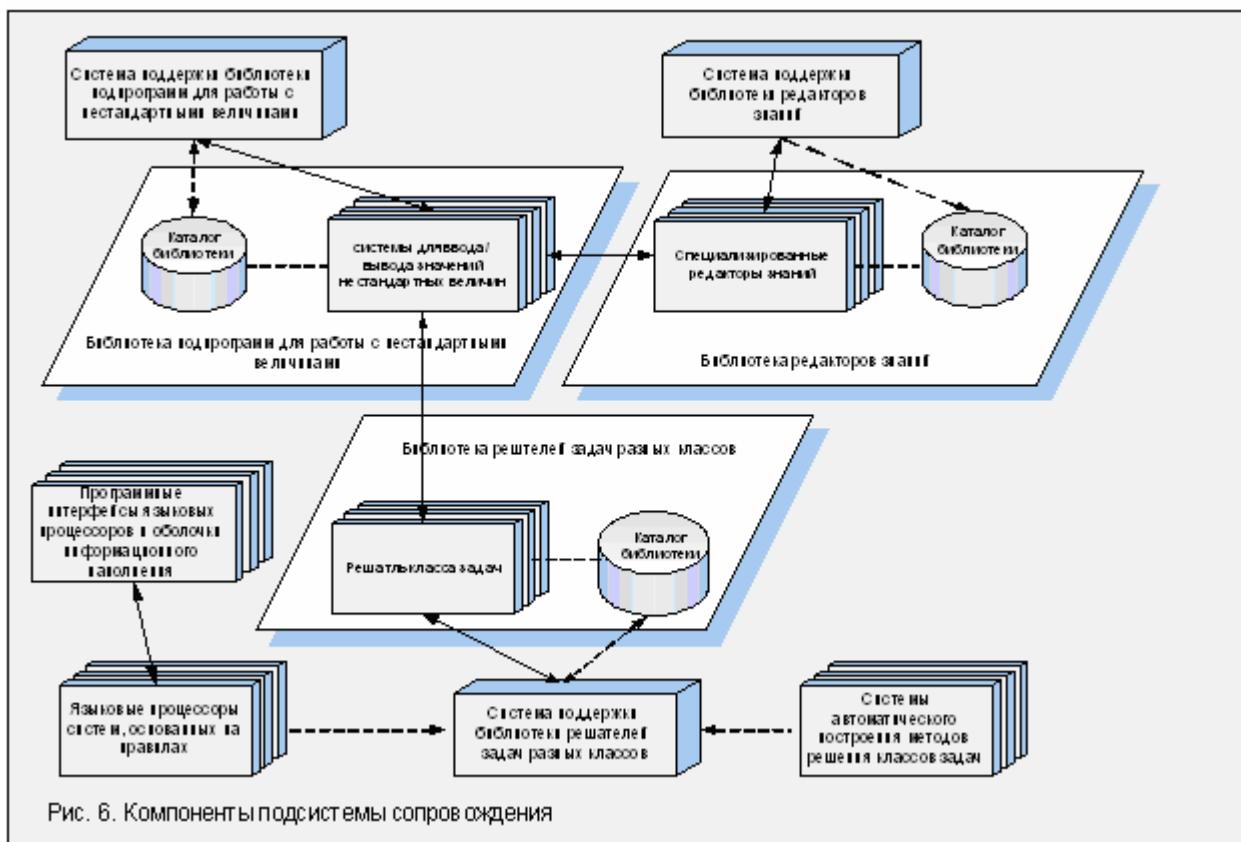


Рис. 5. Системы для решения задач и средства для их разработки

виде множества правил системы продукции. В первом случае для создания решателя задач используется процессор алгоритмического языка, во втором случае – процессор языка, основанного на правилах, который является одним из программных компонент специализированной оболочки.

Если предметная область развивается, то изменяется и ее онтология, и знания. Следствием изменения онтологии является изменение множества классов решаемых задач. Таким образом, развитие сложно-структурированной предметной области предполагает появление как новых информационных, так и новых программных компонентов СОЗ. Изменение информационных компонентов поддерживается редакторами этих компонент. Развитие программных компонентов предполагает наличие подсистемы поддержки этого процесса.

Подсистема сопровождения специализированной оболочки СОЗ (рис. 6) должна обеспечить возможность добавления новых подсистем для ввода/вывода значений нестандартных величин, в частности поддерживающих графический способ их представления, новых классов задач и подсистем для их решения, а также позволять включение в состав программных компонентов подсистем для автоматического формирования решателей классов задач. Таким образом, программными компонентами системы сопровождения являются: подсистема поддержки библиотеки подпрограмм для работы с нестандартными величинами,



подсистема поддержки библиотеки редакторов знаний, подсистема поддержки библиотеки решателей задач, подсистема поддержки библиотеки решателей задач. При разработке методов решения задач в виде множества правил используется языковой процессор языка, основанного на правилах. В состав системы сопровождения также входит подсистема вызова программных компонентов.

Шестая глава диссертации содержит описание специализированных оболочек для предметной области "Химия", созданных с использованием методов главы 5. В работе разработаны специализированные оболочки систем, основанных на знаниях, для физической и органической химии, для раздела рентгено-флуоресцентного анализа, а также специализированная оболочка, интегрирующая онтологии, знания и программные системы указанных разделов химии.

Специализированная оболочка интеллектуальных систем для физической химии позволяет интегрировать онтологии и знания разных разделов данной области. Она содержит систему автоматического формирования решателей вычислительных задач физической химии и редакторы информационных компонент. Онтологические соглашения и законы предметной области представлены на одном из языков прикладной логики, введенных в главе 2 (рис. 7).

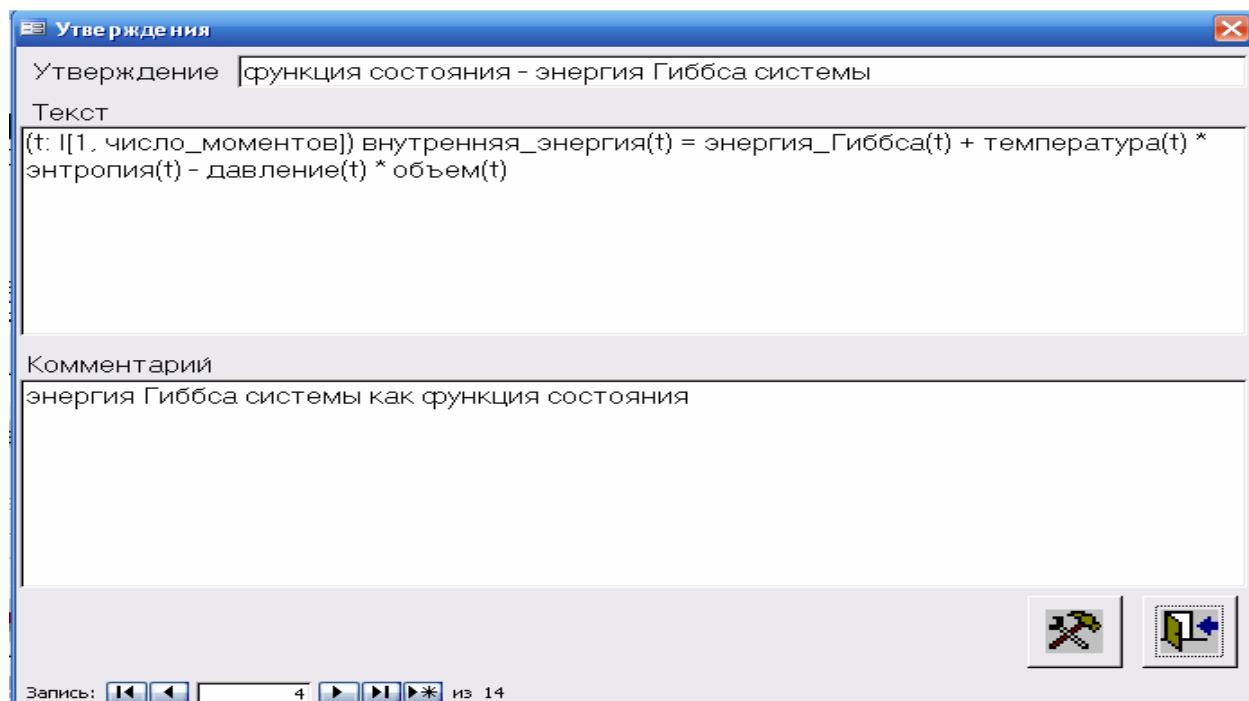


Рис. 7. Интерфейс редактора онтологических соглашений и законов предметной области

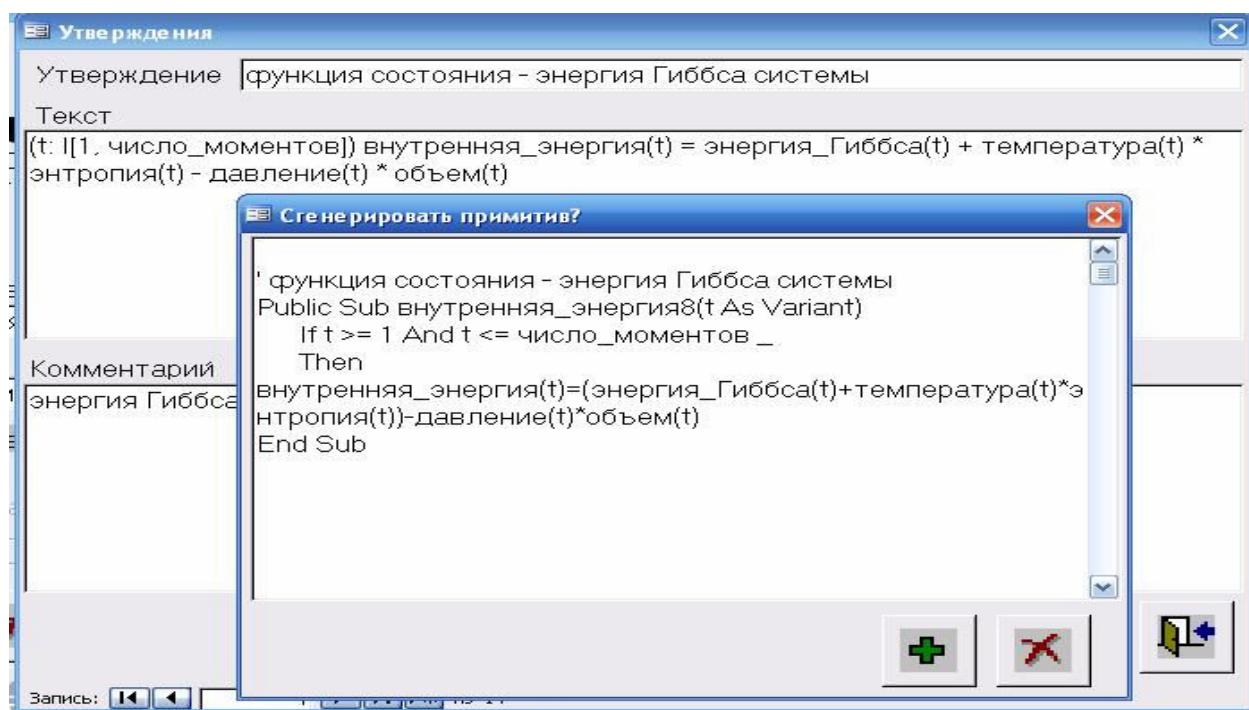


Рис. 8. Генерация примитива по утверждению, формулирующему закон физической химии

Для каждого онтологического соглашения и закона предметной физической химии система автоматически сопоставляет множество примитивов (для каждого примитива генерируется подпрограмма на алгоритмическом

языке), вычисляющих значения входящих в него терминов (рис. 8). Примитивы используются при формировании метода решения задач.

Специализированная оболочка для органической химии содержит решатели разных классов задач определения путей синтеза соединений. Специализированная оболочка для раздела рентгено-флуоресцентного анализа позволяет строить теоретический спектр по описанию свойств пробы и конфигурации спектрометра, а также решать задачу определения состава пробы по спектру.

Информационными компонентами специализированной оболочки СОЗ, интегрирующей онтологии, знания и программные системы в области "Химия", являются онтологии уровня 3 (метаонтологии разделов) и 2 (онтологии разделов), а также знания разных разделов химии, разработанные с использованием терминов онтологии уровня 4, описанной в главе 4. Специализированная оболочка содержит редакторы метаонтологий, онтологий и знаний разделов химии.

В состав программных компонентов входит специализированный редактор онтологических соглашений и законов предметной области, для представления которых используется некоторый ЯПЛ. Для ввода/вывода кратких структурных формул органических соединений используется специализированный редактор, помещенный в соответствующую библиотеку – компонент оболочки для органической химии (рис. 9). Графический редактор при задании структурной

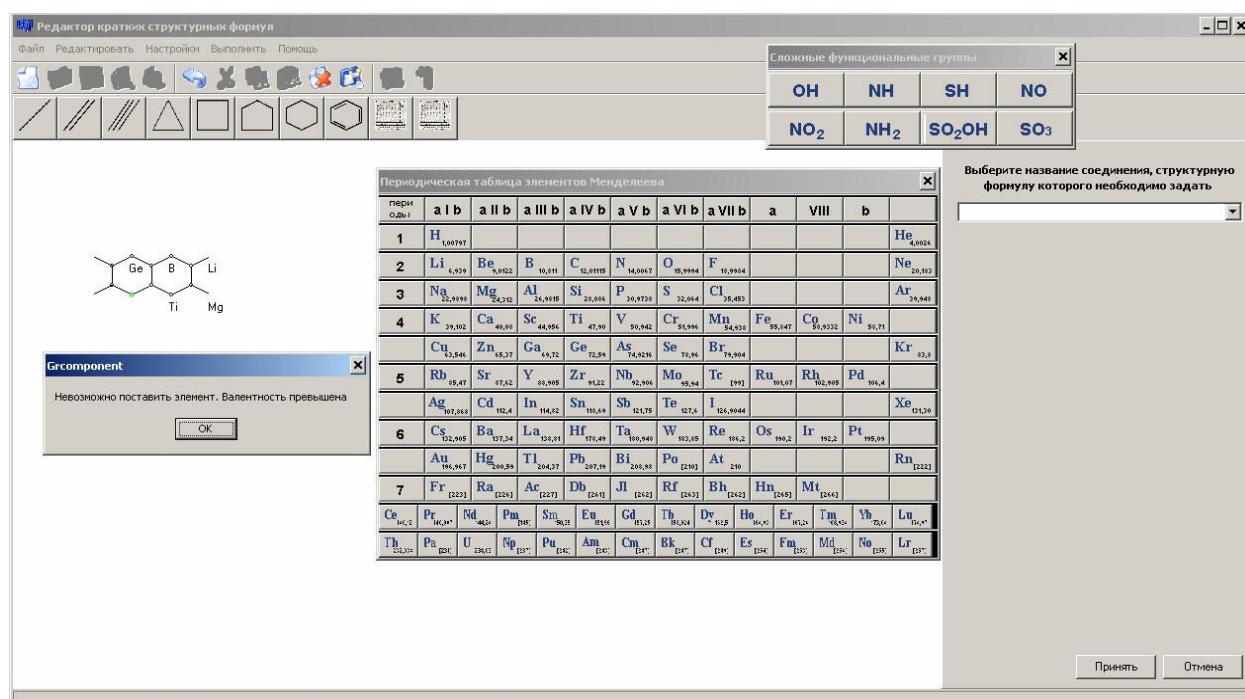


Рис. 9. Интерфейс редактора кратких структурных формул

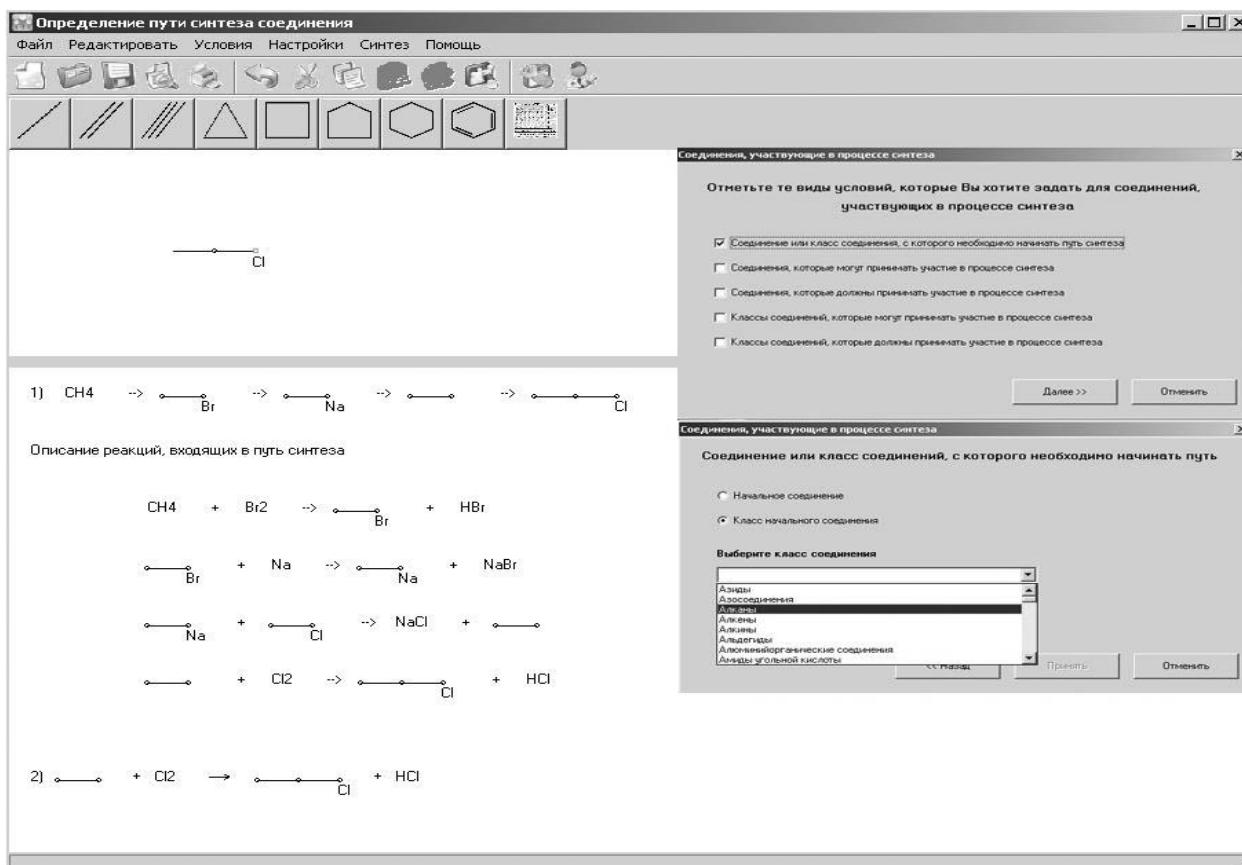


Рис. 10. Интерфейс решателя задач поиска путей синтеза органических соединений

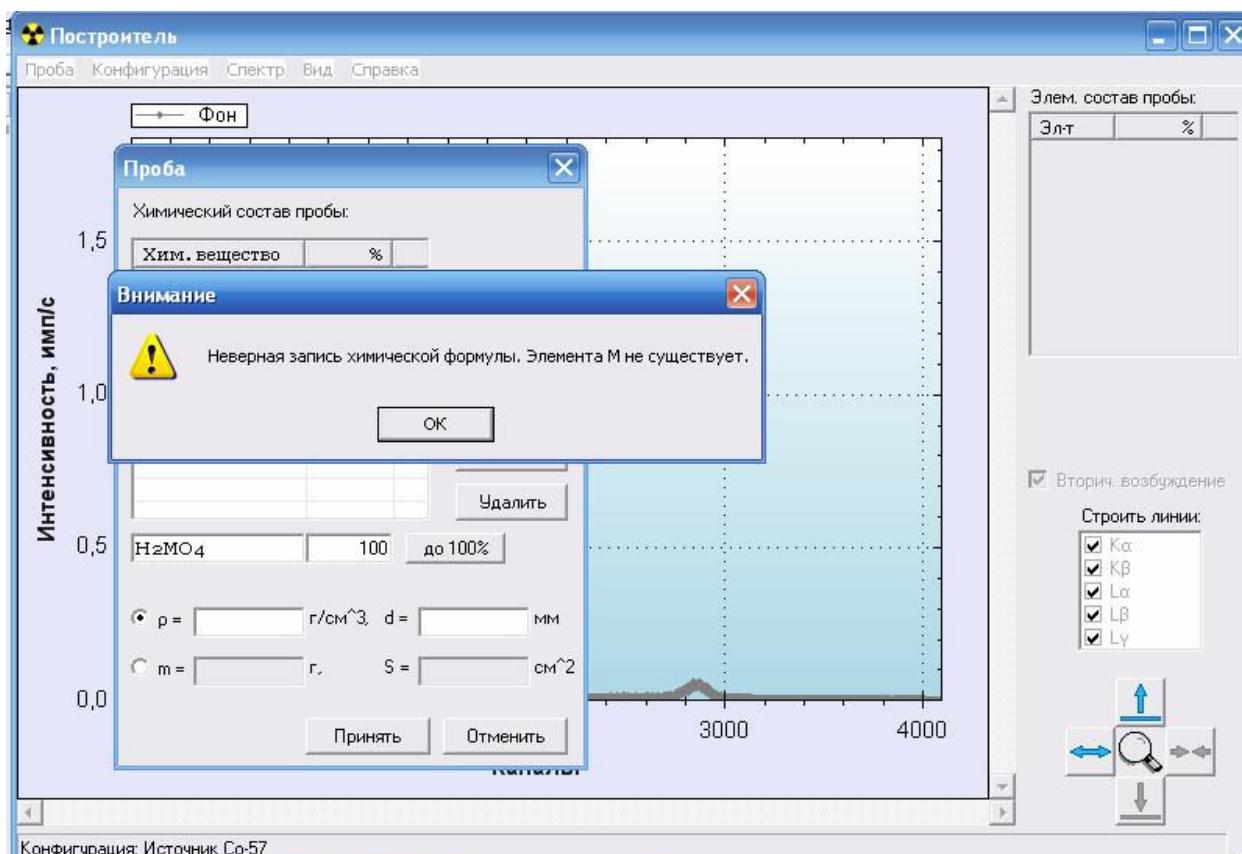


Рис. 11. Интерфейс решателя класса задач построения теоретического спектра

формулы проверяет все онтологические соглашения, определенные в модуле модели органической химии (рис.9), не позволяя пользователю задать не согласованные с онтологией значения. Оболочка содержит решатели классов задач поиска путей синтеза органических соединений (рис. 10), построения теоретического спектра по заданному составу пробы и описанной конфигурации спектрометра (рис. 11), а также определения состава пробы по спектру, полученному со спектрометра. При разработке всех решателей задач использована модель онтологии и знаний, описанная в главе 4, в терминах которой были даны формальные постановки классов задач и описаны методы их решения.

В качестве программных компонентов, с помощью которых могут разрабатываться системы для решения прикладных задач химии, специализированная оболочка содержит компилятор языка, основанного на модели конфлюэнтных недоопределеных декларативных продукции. Язык системы

продукций поддерживает операции над числовыми данными и множествами, ограниченные логические и математические кванторы, определенные в стандартном расширении ЯПЛ, а также в специализированных расширениях "Интервалы" и "Математические кванторы", а также допускает правила, зависящие от параметров (схемы правил) и конкретизации схем. Схема задает множество правил, т.е. ее можно рассматривать как аналог подпрограммы в алгоритмическом языке. Конкретизация схемы задает фактические параметры схемы, т.е. ее можно рассматривать как аналог вызова подпрограмм в алгоритмических языках. Язык допускает создание модулей правил.

Специализированная оболочка СОЗ для физической химии использовалась в лаборатории фторидных материалов Института химии ДВО РАН. Специализированная оболочка для раздела рентгено-флуоресцентного анализа используется в лаборатории ядерно-химических методов анализа Института химии ДВО РАН. В настоящее время специализированная оболочка, интегрирующая онтологии, знания и программные системы разных разделов химии, применяется при создании СОЗ для раздела катализ. Методы разработки специализированных оболочек для сложно-структурных предметных областей также используются при создании оболочки, интегрирующей онтологии и знания разных разделов химии, работающей под управлением Интернет.

Седьмая глава диссертации содержит описание технологии создания систем, основанных на знаниях, для сложно-структурных предметных областей и результаты ее экспериментального исследования.

Разработка специализированной оболочки систем, основанных на знаниях, для сложно-структурной предметной области включает следующие этапы: (1) анализ предметной области, разработка ее многоуровневой модели; если существует модель онтологии верхнего уровня, которая может быть повторно использована, то построение производится методом "сверху вниз" с использованием существующей модели; (2) разработка системы сопровождения специализированной оболочки; (3) разработка специализированных редакторов многоуровневой онтологии и знаний; (4) спецификации классов задач; (5) разработка методов решения классов задач или процедуры автоматического формирования методов; (6) разработка подсистем для решения прикладных задач и поддержки библиотеки методов.

Первая версия специализированной оболочки должна включать редактор многоуровневой онтологии, редактор знаний и все компоненты подсистемы сопровождения. С использованием специализированных редакторов создаются информационные компоненты системы, основанной на знаниях. С использованием системы сопровождения производится добавление требуемых программных компонентов. Например, добавление нового решателя задач с использованием оболочки для химии состоит в задании метаонтологии или онтологии, в терминах которых даются постановки задач данного класса, названия добавляемого класса, информации о расположении программы решателя (рис. 12) и содержательного комментария. При использовании решателя пользователь выбирает требуемую ему подсистему (рис. 13). Редакторы нестандартных величин вызываются автоматически редактором знаний и системой ввода исходных данных задач.

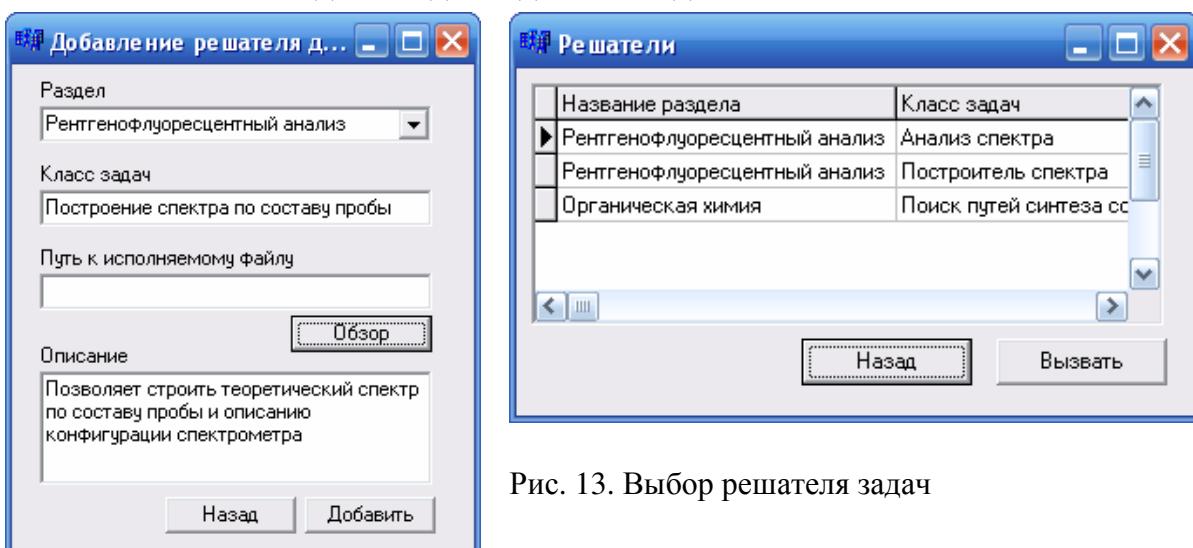


Рис. 13. Выбор решателя задач

Рис. 12. Добавление нового решателя задач

Методы анализа сложно-структурированных предметных областей, а также создания специализированных оболочек СОЗ использовались в течение 8 лет в Дальневосточном государственном университете (г. Владивосток) и Институте технологии и бизнеса (г. Находка). При изучении дисциплины "Системы искусственного интеллекта" студенты выполняют практические работы, целью которых является освоение метода анализа предметных областей. Результаты анализа и предложенные в диссертационной работе методы используются при выполнении работ, целью которых является создание расширяемых специализированных оболочек. Методы анализа предметных областей и создания специализированных оболочек использовались также при выполнении курсовых и дипломных работ студентами Института математики и компьютерных наук Дальневосточного государственного университета. Некоторые специализированные оболочки доведены до практического использования.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В диссертационной работе на основе проведенных автором исследований разработаны теоретические положения и получено практическое решение проблемы создания расширяемых специализированных оболочек систем, основанных на знаниях, для сложно-структурированных предметных областей. В рамках указанной проблемы получены следующие основные теоретические и практические результаты.

1. Определен класс сложно-структурированных предметных областей, в которых существуют разделы и подразделы, описываемые в разных, но похожих системах понятий; раздел и подраздел сложно-структурированной области является предметной областью, в которой происходит специфическая профессиональная деятельность, характеризующаяся множеством прикладных задач. Выделены существенные свойства сложно-структурированных предметных областей и их онтологий. Определены свойства их многоуровневых моделей. Сформулированы требования к языку для представления моделей сложно-структурированных предметных областей, среди которых основными являются декларативность, расширяемость набора математических символов и наличие модульности.

2. Разработан класс многоуровневых необогащенных систем логических соотношений (НСЛС). Определен переход от НСЛС уровня m к НСЛС уровня $m-1$ посредством задания обогащения СЛС. Предложена интерпретация СЛС как моделей сложно-структурированных предметных областей. Разработан класс многосортных языков прикладной логики для

представления многоуровневых моделей сложно-структурных предметных областей. Все языки данного класса имеют общее ядро, каждый характеризуется своим набором используемых расширений. Языки поддерживают представление модульных моделей.

3. Разработаны методы "снизу вверх" и "сверху вниз" анализа сложно-структурных предметных областей; метод анализа "снизу вверх" предназначен для обобщения одноуровневых онтологий разделов сложно-структурированной предметной области до многоуровневых и получения онтологии верхнего уровня, определяющей схему анализа "сверху вниз" для новых разделов данной области, при котором онтологии новых разделов представляются как конкретизации онтологии верхнего уровня.

4. Разработана четырехуровневая модель химии, являющейся сложно-структурированной областью, включающей физическую и органическую химию и раздел рентгенофлуоресцентного анализа. Четвертый уровень представляет собой модель метаонтологии химии. Третий уровень содержит модели метаонтологий физической и органической химии, а также рентгенофлуоресцентного анализа. Разработаны модульные модели онтологий физической и органической химии, а также рентгено-флуоресцентного анализа.

5. Разработаны требования к специализированным оболочкам сложно-структурных предметных областей, а также их общая архитектура. Отмечено, что важным компонентом таких оболочек является подсистема сопровождения, которая должна позволять добавление программных компонентов. Разработаны методы реализации таких оболочек.

6. Разработаны специализированные оболочки систем, основанных на знаниях, для физической и органической химии, для раздела рентгенофлуоресцентного анализа, а также специализированная оболочка, интегрирующая онтологии, знания и программные системы указанных разделов химии.

7. Разработана технология использования специализированных оболочек при создании систем, основанных на знаниях, для сложно-структурных предметных областей. Технология опробована при создании систем, основанных на знаниях, для разных разделов химии, а также системы, основанной на знаниях, интегрирующей информационные и программные ресурсы разных разделов химии. Методы анализа сложно-структурных предметных областей, а также создания специализированных оболочек СОЗ использованы в учебном процессе Института математики и компьютерных наук Дальневосточного государственного университета, а также Института технологии и бизнеса при выполнении курсовых и дипломных работ. Результаты диссертации

используются при чтении лекций по дисциплине "Системы искусственного интеллекта" и выполнении студентами практических работ.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Работы [7], [12], [13], [17], [28], [32], [36], [37], [39], [40], [41], [42], [43] опубликованы в журналах, входящих в Перечень ВАК.

1. Артемьева И.Л. Разработка решателей задач с использованием моделей онтологий предметных областей. // Юбилейный сборник / под общ. ред. В.П.Мясникова. - Владивосток: ИАПУ ДВО РАН. – 2001.- С. 285-292.
2. Артемьева И.Л. Разработка решателей прикладных задач на основе непримитивных онтологий // Девятая нац. конф. по искусственному интеллекту с междунар. участием, Тверь, 28 сентября - 2 октября 2004: сб. тр. в 3-х томах. М.: Физматлит. - 2004. - Т.1. - С. 28-36.
3. Артемьева И.Л. Многоуровневые модели предметных областей и методы их разработки // Десятая нац. конф. по искусств. интеллекту с междунар. участием, Обнинск, 25-28 сентября 2006: сб. тр. в 3-х томах. М.: Физматлит. 2006. - Т.1. - С. 44-51. URL: <http://raai.org/resurs/papers/kii-2006/>
4. Артемьева И.Л. Многоуровневые математические модели предметных областей // Искусственный интеллект. – 2006 .- №.4.- С. 85-94.
5. Артемьева И.Л. Многоуровневые модели предметных областей // Межд. научн.-техн. конф. "Искусственный интеллект. Интеллектуальные и многопроцессорные системы", Кацивели, 25-30 сентября 2006: сб. тр. Таганрог: Изд. ТРТУ. 2006.- Т.1. - С. 58-62.
6. Артемьева И.Л. Метод построения многоуровневых онтологий сложно структурированных предметных областей // Всероссийская конф. с межд. участием «Знания-Онтологии-Теории». Новосибирск, 14-16 сентября 2007. Новосибирск: Институт математики. - Т.1. С. 131-137.
7. Артемьева И.Л. Интеллектуальные системы для сложно-структурированных предметных областей // Научно-технические ведомости СПбГПУ. - 2008. - № 2. - С.108-111.
8. Артемьева И.Л. Специализированные оболочки интеллектуальных систем для сложно-структурированных предметных областей // Одиннадцатая нац. конф. по искусств. интеллекту с междунар. участием, Дубна, 28 сентября – 3 октября 2008: сб. тр. в 3-х томах. М.: ЛЕНАНД, 2008. - Т.1. - С. 95-103.
9. Artemieva I.L. Multilevel ontologies for domains with complicated structures // In the Proceedings of the XIII-th Intern. Conf. "Knowledge-Dialog-Solution", June 18-24, Varna, Bulgaria, Sofia: FOI ITHEA. - 2007. - Vol. 2. - PP.403-410.

10. Артемьева И.Л. Управление созданием интеллектуальных систем для сложно-структурной предметной области // Управление создание и развитием систем, сетей и устройств телекоммуникаций / Под ред. д.э.к.н., проф. А.В.Бабкина, д.т.н., проф. В.А.Кежаева: Тр. науч.-пр. конф., СПб.: НОЦ "Перспектива". 2008. – С. 47-50. - ISBN 5-7422-1583-5
11. Artemieva I.L. Domains with complicated structures and their ontologies // Inf. Theories and Appl. – 2008. - Vol. 15. - № 4. – PP. 330-337. – ISSN 1310-0513.
- 12. Артемьева И.Л., Высоцкий В.И., Рештаненко Н.В. Модель онтологии предметной области (на примере органической химии) // Научно-техническая информация, сер.2.- 2005.- № 8.- С.19-27. И.Л.Артемьевой разработан фрагмент онтологии и ее модели, используемой при описании электронного строения органических соединений.**
- 13. Артемьева И.Л., Высоцкий В.И., Рештаненко Н.В. Описание структурного строения органических соединений в модели онтологии органической химии // НТИ, сер.2.- 2006.- №2.- С.11-19. И.Л.Артемьевой разработан фрагмент онтологии и ее модели, используемой при описании структурного строения органических соединений.**
14. Артемьева И.Л., Высоцкий В.И., Рештаненко Н.В. Модульная модель онтологии органической химии. Свойства органических соединений // Информатика и системы управления.- 2006.- № 1.- С.121-132. И.Л.Артемьевой разработан фрагмент онтологии и ее модели, используемой при описании свойств органических соединений.
15. Артемьева И.Л., Высоцкий В.И., Рештаненко Н.В. Описание пространственного расположения атомов, ионного и электронного строения соединений в модели онтологии химии // Информатика и системы управления.-2007.-№ 1.–С. 98-109. И.Л.Артемьевой разработан фрагмент онтологии и ее модели, используемой при описании пространственных свойств органических соединений, их ионного и электронного строения.
16. Артемьева И.Л., Высоцкий В.И., Рештаненко Н.В. Описание механизмов реакций в модели онтологии химии // Информатика и системы управления. – 2007. - № 1. – С. 109-117. И.Л.Артемьевой разработан фрагмент онтологии и ее модели, используемой при описании механизмов химических реакций.
- 17. Артемьева И.Л., Гавrilova Т.Л., Грибова В.В. и др. Мультидисциплинарная система управления информационными ресурсами различных уровней общности // Проблемы управления.- 2006.- № 4. - С. 64-68. И.Л.Артемьевой разработана структура специализированных оболочек для химии.**
18. Артемьева И.Л., Крылов Д.А. Автоматическое построение интеллектуальных решателей прикладных задач по модели онтологии для некоторых классов

- предметных областей // Первая международная конференция "Системный анализ и информационные технологии" САИТ-2005, 12-16 сентября, 2005, Переславль-Залесский: Тр. конф. В 2 т., Т.1. – М.: КомКнига. 2005. С.145-148. *И.Л.Артемьевой разработаны методы анализа задач для сложно-структурированных предметных областей и использования этих результатов при создании средств автоматического построения систем для решения этих задач.*
19. Артемьева И.Л., Мирошниченко Н.Л. Модель онтологии рентгенофлуоресцентного анализа // Информатика и системы управления.- 2005.- № 2.- С.78-88. *И.Л.Артемьевой разработан фрагмент онтологии и ее модели для рентгенофлуоресцентного анализа.*
20. Артемьева И.Л., Мирошниченко Н.Л, Старовойтов И.В. Интеллектуальная система для рентгенофлуоресцентного анализа // Информатика и системы управления. – 2006. - № 2. – С. 54-61. *И.Л.Артемьевой разработаны методы создания специализированной оболочки для рентгено-флуоресцентного анализа.*
21. Артемьева И.Л., Рештаненко Н.В. Модульная модель онтологии органической химии // Информатика и системы управления. – 2004. - № 2. - С.98-108. *И.Л.Артемьевой разработана структура онтологии и ее модели для органической химии.*
22. Артемьева И.Л., Рештаненко Н.В. Специализированный компьютерный банк знаний предметной области "Химия" //Искусственный интеллект.–2004.-№1.- С. 235-244. *И.Л.Артемьевой разработана структура специализированной оболочки для химии.*
23. Артемьева И.Л., Рештаненко Н.В. Концепция специализированного компьютерного банка знаний предметной области "Химия" // Межд. научн.-техн. конф. "Искусственный интеллект. Интеллектуальные и многопроцессорные системы", Кацивели, 20-25 сентября 2004: сб.тр. Таганрог: Изд. ТРТУ. 2004. Т.2. С. 197-199. *И.Л.Артемьевой разработана структура специализированной оболочки для химии.*
24. Артемьева И.Л., Рештаненко Н.В. Разработка специализированного банка знаний по органической химии на основе онтологии // Межд. научн.-техн. конф. "Искусственный интеллект. Интеллектуальные и многопроцессорные системы", Кацивели, 25 – 30 сентября 2006: сб.тр. Таганрог:Изд. ТРТУ.- 2006.-Т.1.-С.72-76. *И.Л.Артемьевой разработаны методы создания специализированной оболочки для органической химии.*
25. Артемьева И.Л., Рештаненко Н.В.Специализированный компьютерный банк знаний по органической химии и его разработка на основе онтологии // Искусственный интеллект. -2006. - №4. - С. 95-106. *И.Л.Артемьевой*

разработаны методы создания специализированной оболочки для органической химии.

26. Артемьева И.Л., Рештаненко Н.В. Разработка интеллектуальных Интернет-систем на основе многоуровневых онтологий // Вторая межд. конф. "Системный анализ и информационные технологии" САИТ-2007, 10-14 сентября, 2007, Обнинск: Тр. конф. В 2 т., Т.1. – М.: Издательство ЛКИ. 2007. С.96-99. *И.Л.Артемьевой разработаны методы создания специализированной оболочки по химии, интегрирующей онтологии, знания и программные системы разных разделов данной области.*
27. Артемьева И.Л., Рештаненко Н.В. Специализированный трехуровневый редактор метаонтологий, онтологий и знаний для компьютерного банка знаний по химии // Искусственный интеллект.- 2007.- № 3. - с. 40-47. *И.Л.Артемьевой определены особенности редакторов информационных компонентов, обусловленных свойствами сложно-структурированной области, а также разработаны методы создания таких редакторов.*
28. Артемьева И.Л., Рештаненко Н.В. Интеллектуальная система, основанная на многоуровневой онтологии химии // Программные продукты и системы. - 2008. - № 1. – С. 84-87. *И.Л.Артемьевой разработаны методы создания специализированной оболочки по химии, интегрирующей онтологии, знания и программные системы разных разделов данной области.*
29. Артемьева И.Л., Рештаненко Н.В., Цветников В.А. Многоуровневая онтология химии // Всероссийская конф. с межд. участием «Знания-Онтологии-Теории». Новосибирск, 14-16 сентября 2007. Новосибирск: Институт математики. - Т.1. С. 138-146. *И.Л.Артемьевой разработана многоуровневая модель для предметной области "Химия".*
30. Артемьева И.Л., Рештаненко Н.В., Цветников В.А. Расширяемая интеллектуальная Интернет система по химии // IX Межд. конф. "Интеллектуальные системы и компьютерные науки", Москва, 23-27 октября 2006: сб. тр. Москва: ЦПИ при механико-математическом факультете МГУ. 2006.- Том 2.- Часть 2.- С. 44-47. *И.Л.Артемьевой определены особенности специализированной оболочки, обусловленные свойствами сложно-структурированной области.*
31. Артемьева И.Л., Рештаненко Н.В., Цветников В.А. Описание свойств реакций в модели онтологии химии // Информатика и системы управления.- 2006.- № 1.- С.132-143. *И.Л.Артемьевой разработан фрагмент онтологии и ее модели для физической химии, используемый при описании физико-химических свойств реакций.*

- 32.Артемьева И.Л., Рештаненко Н.В., Цветников В.А. Описание физико-химических процессов в модели онтологии химии // Информатика и системы управления. – 2008. - № 1 – С. 121-131. И.Л.Артемьевой разработан фрагмент онтологии и ее модели для химии, используемый при описании свойств физико-химических процессов.**
- 33.Артемьева И.Л., Спивачук Н.А. Модель онтологии предметной области «Построение характеристического рентгеновского спектра» // Информатика и системы управления.- 2007.- № 2. – С. 120-131. И.Л.Артемьевой разработан фрагмент онтологии и ее модели для рентгено-флуоресцентного анализа.**
- 34.Артемьева И.Л., Суров В.В. Принципы организации библиотеки методов решения задач в экспертных системах // Диалог-Решение, Сб. научн. тр. Шестой Международной конференции, Ялта. - 1997. - Т.1.- С.116-122. И.Л.Артемьевой разработаны принципы организации библиотек методов решения задач для расширяемых специализированных оболочек систем, основанных на знаниях.**
- 35.Артемьева И.Л., Тютюнник М.Б. Модель модульного языка декларативных конфлюэнтных продуктов с ограниченными квантами // Искусственный интеллект. – 2007. – № 3. – с. 374-382. И.Л.Артемьевой разработана модель модульного языка конфлюэнтных продуктов.**
- 36.Артемьева И.Л., Тютюнник М.Б. Модульная система конфлюэнтных продуктов для многопроцессорной вычислительной системы // Программные продукты и системы, 2007, № 2, с. 38-39 И.Л.Артемьевой разработаны методы создания системы, основанной на правилах.**
- 37.Артемьева И.Л., Тютюнник М.Б. Методы управления распараллеливанием логического вывода системы конфлюэнтных продуктов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. - 2008. - № 3.- С.99-103. И.Л.Артемьевой разработаны методы управления процессом логического вывода для системы, основанной на правилах.**
- 38.Артемьева И.Л., Цветников В.А. Фрагмент онтологии физической химии и его модель // Электронный журнал "Исследовано в России".- 2002.- №3.- С. 454-474. (<http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2002/042.pdf>) И.Л.Артемьевой разработана структура онтологии и ее модели для физической химии.**
- 39.Клещев А.С., Артемьева И.Л. Необогащенные системы логических соотношений. Ч.1//Научно-техническая информация, сер.2.-2000.-№ 7.- С.18-28. И.Л.Артемьевой разработан класс языков прикладной логики.**
- 40.Клещев А.С., Артемьева И.Л. Необогащенные системы логических соотношений. Ч.2//НТИ, сер. 2.-2000.-№ 8.-С.8-18. И.Л.Артемьевой**

разработан класс математических соотношений для представления моделей одноуровневых онтологий и знаний.

- 41. Клещев А.С., Артемьева И.Л. Математические модели онтологий предметных областей. Часть 1. Существующие подходы к определению понятия «онтология» // НТИ, сер. 2.- 2001.- № 2. - С. 20–27.** *И.Л.Артемьевой выполнен анализ существующих определений понятия "онтология предметной области".*
- 42. Клещев А.С., Артемьева И.Л. Математические модели онтологий предметных областей. Часть 2. Компоненты модели. // Научно-техническая информация, сер. 2. – 2001. - № 3. - С.19-29.** *И.Л.Артемьевой разработана структура математических моделей предметных областей и моделей их одноуровневых онтологий.*
- 43. Клещев А.С., Артемьева И.Л. Математические модели онтологий предметных областей. Часть 3. Сравнение разных классов моделей онтологий // Научно–техническая информация, сер. 2.- 2001.- № 4.- С.10-15.** *И.Л.Артемьевой разработаны подклассы моделей одноуровневых онтологий.*
44. Kleshchev A.S., Artemjeva I.L. A structure of domain ontologies and their mathematical models. In the Proceedings of the Pacific Asian Conference on Intelligent Systems 2001 (PAIS 2001). Korea. November 16-17, 2001. *И.Л.Артемьевой разработана структура одноуровневых онтологий предметных областей и их моделей.*
45. Kleshchev A.S., Artemjeva I.L. A mathematical apparatus for domain ontology simulation. An extendable language of applied logic // Inf. Theories and Appl., 2005, vol. 12, № 2. PP. 149-157. – ISSN 1310-0513. *И.Л. Артемьевой разработан класс языков прикладной логики.*
46. Kleshchev A.S., Artemjeva I.L. A mathematical apparatus for ontology simulation. Specialized extensions of the extendable language of applied logic // Inf. Theories and Appl., 2005, vol. 12, № 3. PP. 265-271. – ISSN 1310-0513. *И.Л.Артемьевой разработан ряд специализированных расширений языков прикладной логики.*
47. Kleshchev A.S., Artemjeva I.L. A mathematical apparatus for domain ontology simulation. Logical relationship systems // Inf. Theories and Appl., 2005, vol. 12, № 4. PP. 343-351. – ISSN 1310-0513. *И.Л.Артемьевой разработан класс математических соотношений, предназначенных для представления моделей одноуровневых онтологий и знаний предметных областей.*
48. Kleshchev A.S., Artemjeva I.L. Mathematical models of domain ontologies // Inf. Theories and Appl., 2007, vol. 14, № 1. PP. 35-43. – ISSN 1310-0513. *И.Л.Артемьевой разработана структура моделей предметных областей и моделей их одноуровневых онтологий.*

