

# Принципы конструирования интеллектуальных систем

Ю.М. Арский, В.К. Финн

**Аннотация.** В статье сформулированы принципы интеллектуального анализа данных и рассмотрен ДСМ-метод автоматического порождения гипотез, содержащий КПЭ-рассуждения. Практика применения КПЭ-рассуждений (в виде ДСМ-рассуждений) дает основание сформулировать тезис о наименьшем «шуме» при порождении гипотез о зависимостях причинно-следственного типа. Кроме того, предложена идея интеллектуализации информационно-вычислительных систем, связанных с имитацией интеллектуальной деятельности.

## 1. Основные определения: искусственный интеллект и интеллектуальные системы

Стратегия развития информационного общества в России, проект которой был одобрен на заседании Совета Безопасности РФ в июле 2007 года, предусматривает, в частности, совершенствование информационной инфраструктуры, расширение и использование информационных и телекоммуникационных технологий в жизни общества. Технологии же рождаются в результате взаимодействия науки и промышленности, поэтому наука, как один из «родителей» технологий, ответственна за их высокие качества и эффективность применения. Информационные системы, информационно-вычислительные системы и интеллектуальные системы являются инструментами информационных технологий, широко применяемыми для решения задач управления, обороны, медицины, образования и поддержки научных исследований. В процессе информатизации общества особую роль играют интеллектуальные системы – основной продукт направления исследований «искусственный интеллект». Целью «искусственного интеллекта» является имитация и усиление рационального поведения человека, основанного на анализе данных, порождении гипотез и поддержке принимаемых решений.

В научно-популярной литературе «искусственный интеллект» часто понимается метафорически как устройство равносильное разуму человека, способное порождать поведение подобное рациональному поведению людей. Однако научные задачи направления исследований «искусственный интеллект» (ИИ) в настоящее время являются более скромными и реалистичными.

Для понимания задач ИИ прежде всего следует уточнить феномен естественного интеллекта. ИИ как направление исследований является аппроксимацией интеллекта естественного, точнее, совокупности способностей, образующих его реальный феномен. Таковыми являются:

- (1) способность выделять существенное в наличных знаниях, т.е. упорядочивать их (она – необходимый аспект интуиции);
- (2) способность к целеполаганию и планированию поведения – порождение последовательностей «цель → план → действие»;
- (3) способность к отбору знаний (посылок выводов, релевантных цели рассуждения);
- (4) способность извлекать следствия из имеющихся знаний, т.е. способность к рассуждению, которое может содержать как правдоподобные выводы, используемые для выдвижения гипотез, так и достоверные выводы (следовательно,

- под рассуждением понимается последовательность правдоподобных и достоверных выводов);
- (5) способность к аргументированному принятию решений, использующему упорядоченные знания (представление знаний) и результаты рассуждений, соответствующие поставленной цели;
  - (6) способность к рефлексии – оценке знаний и действий;
  - (7) наличие познавательного любопытства: познающий субъект должен быть способен задавать вопрос «что такое?» и искать на него ответ;
  - (8) способность и потребность находить объяснение (не обязательно дедуктивное!), как ответ на вопрос «почему?»;
  - (9) способность к синтезу познавательных процедур, образующих эвристику решения задач и рассмотрения проблем, например, таковой является взаимодействие индукции, аналогии и абдукции (с учетом фальсификации выдвигаемых гипотез посредством поиска контрпримеров) с последующим применением дедукции;
  - (10) способность к обучению и использованию памяти;
  - (11) способность к рационализации идей: стремление уточнить их как понятия;
  - (12) способность к созданию целостной картины относительно предмета мышления, объединяющей знания, релевантные поставленной цели (т.е. формирование, по крайней мере, приближенной «теории» предметной области);
  - (13) способность к адаптации в условиях изменения жизненных ситуаций и знаний, что означает коррекцию «теорий» и поведения.

Главным продуктом научных исследований являются компьютерные системы, осуществляющие конструктивное приближение и имитацию способностей (1) – (13), представляющих феноменологию познавательной деятельности человека (она охарактеризована как «идеальный тип интеллекта»). «Ядром» приближенного отображения познавательных способностей человека, охарактеризованных в перечне (1) – (13), яв-

ляются способности, необходимые для реализации рассуждений и представления знаний, к которым они применимы. Таковыми являются способности (1), (3), (4), (5), (6), (8), (9) и (10), которые конструктивно имитируются в современных системах ИИ в автоматическом режиме работы, способности же (2), (7), (12) и (13) могут имитироваться лишь в интерактивном режиме с участием человека.

Однако следует отметить, что приведенная выше характеристика феномена естественного интеллекта является лишь **идеальным типом** в смысле Макса Вебера, выражающим существенные черты феномена рационалистического интеллекта (разумеется, не всегда присущего конкретному индивиду).

Термин «интеллектуальный» стал весьма употребляемым словом, но, к сожалению, его употребление далеко не всегда имеет определенный смысл, выразимый в соответствующей понятийной системе компьютерной науки.

Процедуры, имитирующие способности идеального типа интеллекта, которые реализованы в компьютерных программах, будем называть **интеллектуальными**. Заметим, что не каждая вычислительная процедура может в этом смысле считаться интеллектуальной. Таковой будет процедура, реализующая познавательные способности из перечня (1) – (13).<sup>1</sup>

Познавательная деятельность, осуществляемая компьютерными средствами, имеет три необходимых аспекта: представление данных и знаний, рассуждения и вычисления, комфорт для пользователя, обеспечивающий доступное и удобное общение с компьютером.

Два первых упомянутых аспекта существенным образом определяют «интеллектуальность» компьютерной системы – возможность получения нового знания посредством использования наличного знания в качестве посылок рассуждения (это предполагает реализацию способностей (1) – (6) и (8) – (10)). Дедуктивное рассуждение подчинено принципу переноса истинности посылок на заключение, а также переносу ложности заключения на посылки: если посылки истинны, то результатом дедуктивного вывода будет истинное заключение;

<sup>1</sup> Возможно, по-видимому, расширение этого перечня, но оно должно быть обосновано.

если же заключение ложно, то результатом дедуктивного вывода будет ложность посылок. Такова природа дедукции, а адекватным способом представления знаний для дедукции являются аксиоматические системы (системы аксиом и правил вывода, выраженные в логических языках [1], [2]).

Автоматическое выведение следствий из посылок и автоматическое доказательство теорем является разработанной областью прикладной логики и искусственного интеллекта [3, 4].

Аксиоматические системы и автоматизация дедукции используют представление знаний 0 «замкнутых мирах»: предполагается, что предметная область охарактеризована аксиомами (правда, допускается добавление посылок в качестве гипотез и выводимость из них следствий посредством аксиом и правил вывода). Однако имеются многочисленные проблемы и задачи такие, что знания о соответствующих предметных областях открыты (т.е. постоянно пополняются), а для них требуется выдвинуть гипотезы, допускающие проверку и фальсификацию. В свою очередь выдвижение гипотез (как рациональных догадок) требует создания формализованных методов их порождения из множеств эмпирических фактов с использованием имеющегося знания. Следовательно, возникает потребность разработки формализованных эвристик, допускающих автоматизацию в компьютерных системах, таких, что они содержат различные познавательные процедуры для извлечения нового знания из имеющихся фактов (баз фактов) с использованием наличных знаний (баз знаний). Таким образом, мы приходим к заключению, что имеется необходимость разрабатывать компьютерные системы, содержащие как средства извлечения знаний из баз фактов (knowledge discovery), так и средства порождения гипотез и способы объяснения имеющихся фактов с использованием порожденных гипотез. Это означает, что имеется необходимость в реализации способностей (8) – (10), упомянутых выше как обязательных черт идеального типа интеллекта.

Итак, анализ данных посредством автоматизированных познавательных процедур с использованием баз фактов и баз знаний, автоматическое порождение гипотез, процедуры объяснения исходного состояния баз фактов с

целью оправдания и принятия гипотезы, наконец, дедуктивный вывод из имеющихся ранее знаний и знаний, полученных в результате индуктивного обобщения сходных фактов из баз фактов (т.е. машинного обучения), реализованные в компьютерной системе, дают основание охарактеризовать ее как **интеллектуальную**.

Рассуждения, применяемые для формализации эвристик решения задач в компьютерной системе таких, что необходимо выдвижение гипотез (рациональных догадок), согласующихся с базой фактов, будем называть **правдоподобными рассуждениями**.<sup>2</sup>

Правдоподобные выводы, содержащиеся в правдоподобных рассуждениях, не подчиняются принципу дедукции, ибо из истинных посылок в правдоподобных выводах могут следовать неистинные заключения. Таковыми, например, являются индуктивные обобщения сходных фактов (результат процедуры индукции), а также выводы по аналогии, применяемые при решении творческих задач. Заключения правдоподобных выводов имеют оценку некоторой степени правдоподобия. Задачей формализации правдоподобных выводов является построение средств конструктивного порождения степени правдоподобия выводов и формулирование критериев принятия гипотез, являющихся результатом правдоподобного рассуждения.

Формализованные эвристики, применяемые в современных компьютерных системах для решения различных классов задач (соответствующих «целям» рассуждения, представляющих способность к целеполаганию идеального типа интеллекта (2)), формулируются как взаимодействие некоторых познавательных процедур. Примером такой формализованной эвристики является взаимодействие индукции, аналогии и абдукции (принятия гипотез посредством объяснения исходного множества фактов) [6,7].<sup>3</sup>

Подчеркнем еще раз, что общей характеристикой правдоподобных выводов является их

<sup>2</sup> Термин «правдоподобные рассуждения» был введен Д. Пойа в [5] в связи с анализом эвристических приемов в математике.

<sup>3</sup> Эвристика типа «индукция + аналогия + абдукция» реализуется в ДСМ-методе автоматического порождения гипотез [7].

не дедуктивный характер: из истинности посылок не вытекает истинность следствия, следствие является лишь правдоподобным высказыванием. Следовательно, рассуждения, содержащие правдоподобные выводы, имеют лишь правдоподобные следствия. Правдоподобные выводы, следствия которых есть результат догадки, оформленной в виде некоторого правила, называют **амплиативными** выводами (этот термин использовал автор идеи абдукции американский математик и философ Ч.С. Пирс).

Охарактеризуем теперь класс правдоподобных рассуждений, называемых **когнитивными правдоподобными рассуждениями** (КП-рассуждениями).

КП-рассуждения подразделяются на три подкласса: вероятностные (например, использующие байесовские правила); приближенные (например, использующие аппарат нечетких множеств [8]); правдоподобные рассуждения, являющиеся организацией различных взаимодействующих познавательных процедур.

Сформулируем некоторый подкласс КП-рассуждений, который будем называть **когнитивными правдоподобными эмпирическими рассуждениями** (КПЭ-рассуждениями), характеризующимися утверждениями А1 – А9. КПЭ-рассуждения являются эффективным инструментом для компьютерной имитации интеллектуальных способностей (1) – (13). Заметим, что в современных компьютерных системах, реализующих методы искусственного интеллекта, используются все указанные выше подклассы правдоподобных рассуждений, а также автоматизированные дедуктивные выводы.

Применение рассуждений в компьютерных системах не является делом произвольного выбора, ибо их эффективность зависит от соответствия приведенных выше подклассов правдоподобных рассуждений типам предметных областей  $W$  («миров»). Можно выделить три типа предметных областей  $W$ , знания о которых используются в компьютерных системах, имитирующих интеллектуальную активность человека, охарактеризованную посредством способностей (1) – (13):

(а) предметные области  $W$  («миры», «универсумы») такие, что факты, принадлежащие им, яв-

ляются случайными событиями; соответственно, правила вывода, применяемые в рассуждениях о  $W$ , используют аппарат теории вероятностей (в том числе различные статистические методы анализа данных);

(в) предметные области  $W$  такие, что факты, принадлежащие  $W$ , причинно обусловлены; соответственно, правила вывода, применяемые в рассуждениях о  $W$ , порождают гипотезы о причинно-следственных зависимостях и основанные на них обобщения;

(с) предметные области  $W$  такие, что факты, принадлежащие  $W$ , могут быть как причинно обусловленными, так и случайными событиями. Это означает, что  $W$  является объединением «миров» (а) и (в); а рассуждения, применяемые к знаниям о  $W$ , должны использовать правила, порождающие гипотезы о зависимостях причинно-следственного типа с учетом вероятностных соображений (например, частоты появления причинно-следственного эффекта).

Приведем ниже утверждения А1 – А9, характеризующие КПЭ-рассуждения.

А1. Знания, используемые в КПЭ-рассуждениях, должны некоторым образом соответствовать типам предметных областей (в) и (с), содержащих зависимости причинно-следственного типа (т.е. детерминациям изучаемых эффектов)<sup>4</sup>.

А2. Знания, используемые в КПЭ-рассуждениях, являются **открытым** множеством высказываний. Это знание пополняется в соответствии с некоторым критерием, контролирующим принятие гипотез, полученных посредством амплиативных выводов.

А3. КПЭ-рассуждения являются синтезом некоторых познавательных процедур, включающих **индукцию**. Индукция используется для сравнения фактов установления их сходства и порождения гипотез о причинно-следственных зависимостях. Примером такого синтеза может служить взаимодействие индукции, аналогии и абдукции [7].

А4. Индуктивные процедуры, реализующие идею индукции (порождение обобщения сходства рассматриваемых фактов), представимы в

<sup>4</sup> Очевидно, что предметным областям  $W$  типа (а) соответствуют вероятностные рассуждения.

виде специальных правил амплиативного вывода, отличных от перечислительной индукции.

А5. При формализации КПЭ-рассуждений используется неклассическая концепция истины такая, что:

- (1) различаются оценки фактов, гипотез и металогических утверждений о них [9];
- (2) оценки гипотез есть некоторые степени правдоподобия, эффективно порождаемые посредством амплиативных правил;
- (3) используемые металогические утверждения имеют истинностные значения «истина» или «ложь» двузначной логики.

А6. Правила амплиативных выводов формулируются в аргументативном языке [10] так, что порождаемые гипотезы проверяются на наличие аргументов за их принятие и аргументов против их принятия (контраргументов).

А7. Утверждение А6 предполагает, что в «мирах»  $W$  типа (в) или (с) существуют как положительные примеры (факты) исследуемого эффекта ((+)-примеры), так и отрицательные примеры (факты) ((-)-примеры), а порожденные гипотезы о зависимостях причинно-следственного типа являются аргументами или контраргументами для предсказания наличия или отсутствия изучаемого эффекта у соответствующих объектов из имеющегося массива фактов. Это означает, что в процессе реализации КПЭ-рассуждений автоматически порождаются фальсификаторы гипотез.

А8. Исходными данными КПЭ-рассуждений (в компьютерной системе они образуют базу фактов (БФ)) являются множества высказываний, представляющих факты, т.е. результаты эмпирического исследования (например, описание экспериментов или наблюдений). Эти факты содержат объекты со сложной структурой (множества, кортежи, графы, системы отношений и т.п.), характеризующиеся как качественными, так и количественными параметрами. Отсюда следует невозможность манипулирования (в том числе – установление сходства) массивами этих фактов в реальное время без применения компьютерных систем.

А9. Исходные данные КПЭ-рассуждений (т.е. начальные состояния БФ компьютерных систем) расширяются в зависимости от полученных результатов и выполнимости критерия

принятия гипотез (в соответствии с А2). Это расширение является динамическим формированием БФ достаточно информативной для того, чтобы порожденные гипотезы объясняли начальное состояние БФ и были приняты.

Утверждения А1-А9 характеризуют класс формализованных эвристик, реализуемых в компьютерных системах посредством КПЭ-рассуждений, которые содержат индуктивные процедуры. Эти процедуры основаны на установлении сходства фактов, имеющего осмысленную интерпретацию. При этом осуществляется принцип качественного анализа данных: **сходство фактов влечет наличие (отсутствие) изучаемого эффекта и его повторяемость.**

Компьютерные системы, которые являются средством автоматизации способностей (1) – (13), представляющих явную характеристику феномена естественного интеллекта (они образуют идею интеллекта как идеального типа) будем называть **интеллектуальными системами (ИС)**, если они имеют специфическую архитектуру, допускающую определенные вариации. Схематически эта архитектура может быть представлена следующим образом:

ИС = Решатель задач + Информационная среда + Интеллектуальный интерфейс. Решатель задач = Рассуждатель + Вычислитель + Синтезатор. Информационная среда = База фактов (БФ) + База знаний (БЗ). Интеллектуальный интерфейс состоит из средств представления результатов (в том числе графического), диалога на естественном языке и научения работе с компьютерной системой. Существенной особенностью ИС является реализация в Рассуждателе КПЭ-рассуждений в интерактивном режиме с целью соответствующего пополнения БФ для формирования информативности представлений изучаемых эффектов и **подбора посылок, релевантных цели рассуждения.** Обратим внимание на соответствие этого подбора посылок КПЭ-рассуждений способностям (1) – (13) в характеристике интеллекта как идеального типа.

Подбор посылок, релевантных цели рассуждения, возможен в ИС благодаря процедурам КПЭ-рассуждения (индукции и аналогии, использующих сходство фактов в БФ и сходство знаний в БЗ).

БЗ в ИС задана посредством процедур, реализуемых Рассуждателем и Вычислителем, аксиом структур данных (например, аксиом булевой алгебры, если объекты и их свойства, содержащиеся в БФ, представлены множествами элементов), а также дескриптивных аксиом, характеризующих соответствующую предметную область.

Архитектура ИС является структурой, соответствующей следующим основным функциям ИС: представлению данных и знаний в компьютерной системе; осуществлению рассуждений и вычислений для решения класса задач, представляющего цель познавательного процесса, реализуемого в ИС; а также комфортному для пользователя интерфейсу.

ИС, осуществляющие КПЭ-рассуждения, способны анализировать данные, порождать гипотезы о зависимостях между параметрами представленных в БФ фактах посредством выдвинутых гипотез ИС, способны объяснять наличие или отсутствие эффектов, которыми обладают объекты из БФ, имеющей структуру «объект – эффект». Порожденные Решателем задач гипотезы используются для предсказания эффектов, содержащихся в БФ, которая соответствует определенному классу задач.

Анализ данных посредством ИС будем называть интеллектуальным анализом данных (ИАД)<sup>5</sup>.

## 2. Принципы конструирования интеллектуальных систем и интеллектуальный анализ данных

Сформулируем принципы интеллектуального анализа данных, образующих методологию извлечения знаний из БФ. Формулируемые принципы ИАД естественным образом соответствуют характеристике КПЭ-рассуждений посредством условий А1 – А9, так как КПЭ-рассуждения являются логическим средством извлечения знаний из объединения БФ и БЗ.

### Принцип I (цель ИС)

Для создания ИС должна быть сформулирована проблема P1, которой соответствует класс формализуемых задач.

Примерами P1 являются медицинская диагностика по клиническим данным и выбор наилучшего способа лечения, предсказание биологической активности химических соединений (в том числе токсичности и канцерогенности), планирование и интерпретация химических экспериментов, контроль загрязнения окружающей среды<sup>6</sup>, техническая диагностика, поддержка принятия решений с использованием предыдущего опыта, предсказание социального поведения (действий, установок, мнений) и распознавание его рациональности, формирование типологии преступлений на основе базы прецедентов с последующим распознаванием типа конкретного преступления (например, преступлений рецидивистов и т.п.), автоматическая классификация текстов, выбор решения роботом посредством анализа ситуации, принятие решений в многоагентных системах и т.д.

### Принцип II (типы «миров» и представление знаний о них)

Ранее были охарактеризованы три типа предметных областей W («миров») (а), (в) и (с) такие, что факты, принадлежащие W и знания о W используются в ИС: цель P1 ИАД формулируется посредством представления знаний в соответствии с типами W (а), (в) и (с).

### Принцип III (адекватность предметной области W и Решателя для P1)

Рассуждатель и Вычислитель должны содержать методы рассуждений и вычислений, соответствующие типам W (а), (в) и (с).

Очевидно, что для типа (а) адекватными методами анализа данных будут статистические методы, а для W типа (в) адекватными методами рассуждений будут правдоподобные рассуждения, формализующие анализ отношений причинно-следственного типа.

### Принцип IV (условие применимости ИС для ИАД)

Этот принцип является развитием Принципов II и III. Он состоит в том, что условия применимости Решателя задач должны быть точно сформулированы. Например, для миров типа (в) может быть охарактеризован класс каузальных моделей, к которым применим ме-

<sup>5</sup> Это определение интеллектуального анализа данных является усилением понимания data mining и knowledge discovery, используемых в работах по анализу данных [11].

<sup>6</sup> Различные примеры применения методов искусственного интеллекта в задачах химии содержатся в [12].

тод автоматического порождения гипотез, осуществляемый посредством КПЭ-рассуждений [7] соответствующим Рассуждателем. БФ, представляющая предметные области  $W$  типа (в), должна содержать позитивные и негативные примеры изучаемого эффекта. В БФ в неявном виде должны содержаться причинно-следственные зависимости как позитивные (вынуждающие наличие эффекта), так и негативные (вынуждающие отсутствие эффекта). Кроме того, структура данных, используемая для представления фактов в БФ, должна быть пригодна для формализации структурного сходства фактов. Это обстоятельство делает возможным реализацию условия: **сходство фактов влечет сходство эффектов и их повторяемость** (это условие лежит в основе формализованного качественного анализа данных).

Примером цели  $P1$  и ИАД в БФ является предсказание токсичности химических соединений в БФ такой, что в ней представлено отношение «химическое соединение – токсичность» [13]. ИАД состоит в том, что ИС посредством Рассуждателя порождает гипотезы о фрагментах химических соединений, которые ответственны за наличие (отсутствие) эффекта токсичности. Позитивные гипотезы ((+)-гипотезы) о причинах наличия токсичности и негативные гипотезы ((-)-гипотезы) о причинах отсутствия токсичности порождаются как индуктивные обобщения сходства позитивных и негативных фактов, соответственно, представленных в БФ. Порожденные индукцией (+)-гипотезы и (-)-гипотезы образуют автоматически образованный фрагмент БЗ в соответствии с условием – «сходство фактов влечет сходство эффектов и их повторяемость».

Другим примером БФ типа (в) для ИАД является база историй болезней для диагностики двух заболеваний глаз – дегенеративного ретиношизиса и наследственных витреоретинальных дистрофий, созданная в Лаборатории клинической физиологии зрения МНИИ глазных болезней им. Гельмгольца. В соответствии с приведенным выше условием установления сходства посредством индуктивных обобщений Рассуждатель порождает (+)-гипотезы и (-)-гипотезы, являющиеся достаточными условиями для диагностики указанных глазных заболе-

ваний (эти гипотезы образуют фрагмент БЗ соответствующей ИС)<sup>7</sup>.

#### **Принцип V (синтез познавательных процедур для ИАД в БФ)**

ИС, используемые для ИАД в соответствии с Принципом IV, применяются для предметных областей  $W$  таких, что знания о них слабо формализованы, а данные (факты) пригодны для структурирования для установления сходства. Поэтому для достижения цели ИАД необходима соответствующая  $W$  формализованная эвристика. В силу этого актуален следующий принцип: формализованная эвристика для решения задач посредством ИС, соответствующих цели (проблеме)  $P1$ , должна быть **синтезом познавательных процедур**, применение которого к объединению БФ и БЗ ( $БФ \cup БЗ$ ) порождает новые знания, расширяющие БЗ.

Решатель задач, осуществляющий этот синтез посредством своих подсистем Рассуждателя, Вычислителя и Синтезатора, использует эвристики в соответствии с Принципом III при условии выполнимости Принципа IV.

Принцип V соответствует интеллектуальной способности (9) – возможности синтеза познавательных процедур, образующих эвристику для решения определенного класса задач.

Примером синтеза познавательных процедур является эвристика, объединяющая процедуры индукции, аналогии и абдукции (принятие порожденных гипотез посредством объяснения начального состояния БФ). Эта эвристика реализуется посредством КПЭ-рассуждений типа «индукция + аналогия + абдукция», используемых в ДСМ-методе автоматического порождения гипотез [7, 15, 16]<sup>8</sup>.

#### **Принцип VI (фальсифицируемость и аргументируемость результатов работы Решателя)**

<sup>7</sup> Интеллектуальная система для диагностики указанных выше глазных заболеваний создана сотрудниками Сектора интеллектуальных систем ВИНТИ РАН и Лаборатории клинической физиологии зрения МНИИ глазных болезней им. Гельмгольца [14].

<sup>8</sup> ДСМ-метод автоматического порождения гипотез (ДСМ-метод АПГ) создан в ВИНТИ РАН. Первые компьютерные эксперименты с ДСМ-методом АПГ были осуществлены в начале 80-х годов прошлого века для решения задач прогнозирования биологической активности химических соединений.

Уточним предварительно идею «знание в компьютерной системе». Знания в компьютерной системе (КС) подразделяются на процедурные и декларативные. Под процедурными знаниями понимают задание алгоритмов и их комбинаций, применяемых в Решателе для достижения цели, и представимой классом задач. Процедурными знаниями являются стратегии решения задач, образованные посредством комбинирования различных видов рассуждений и вычислений, которые, соответственно, осуществляются Рассуждателем и Вычислителем. Взаимодействие же Рассуждателя и Вычислителя производится Синтезатором.

Под декларативным знанием понимают систему утверждений, которая определяет класс решаемых задач. Таковыми утверждениями являются дескриптивные утверждения, характеризующие как предметную область, так и структуру данных, представленных, в частности, в БФ (примерами структур данных являются булевские структуры, а также структуры данных, в которых объектами являются графы, пространственные графы, системы отношений и т.п.).

Декларативными знаниями в ИС являются также утверждения, выражающие в имплицитном виде (если ..., то ...) правила правдоподобного вывода Рассуждателя (в том числе правила вывода в КПЭ-рассуждениях для индукции и аналогии). Эти утверждения входят в метатеорию ИС и создают возможность исследования процесса функционирования ИС на логическом уровне. Если КС есть ИС, то цель P1 достигается посредством осуществления Принципа V, применяемого к БФ и БЗ.

Обозначим множество декларативных знаний ИС посредством  $\Sigma$ , тогда применение Решателя к объединению  $\Sigma$  и БФ представим как Решатель  $(\text{БФ} \cup \Sigma) = [R]$ , где  $R = (\text{БФ} \cup \Sigma, \text{Решатель})$  - упорядоченная пара, называемая каркасом ИС, а  $[R]$  - множество всех результатов применения Решателя к  $\text{БФ} \cup \Sigma$ .

**Принцип VI** состоит в том, что в ИС должны содержаться средства фальсификации результатов применения Решателя к  $\text{БФ} \cup \Sigma$ . Таковыми могут быть утверждения из  $\Sigma$ , которые накладывают ограничения на  $[R]$ , или же автоматически порожденные фальсификаторы, ко-

торые извлекаются из отрицательных примеров БФ и запрещают некоторые гипотезы, порождаемые Решателем.

Аргументируемость результатов из  $[R]$  означает, что порождаемые Решателем гипотезы имеют аргументы за их применение и не имеют контраргументов, их запрещающих. Очевидно, что этот принцип ИАД соответствует интеллектуальной способности (5) и свойству А6 КПЭ-рассуждений.

### Принцип VII (синтез теорий истины)

Для ИС, аппроксимирующих базисные способности интеллекта (1) - (13) (в том числе выделение существенных факторов, синтез познавательных процедур, правдоподобные рассуждения и порождение гипотез, машинное обучение на примерах из БФ) неадекватной оказывается аристотелевская теория истины как теория соответствия, формализованная А. Тарским средствами двузначной логики для дедуктивных наук [17] (см. также [18], глава 9). Дело в том, что порождаемые Решателем гипотезы либо правдоподобны, если порождены Рассуждателем посредством правдоподобных рассуждений [19], либо имеют некоторую вероятность, если порождены Решателем с использованием статистических методов. Однако и в том, и в другом случае имеются **критерии принятия гипотез** на основе БФ и БЗ.

Уточним строение БЗ. Напомним, что Решатель  $(\Sigma \cup \text{БФ}) = [R]$ . Применение Решателя к  $\Sigma \cup \text{БФ}$  порождает множество высказываний  $\Sigma' \subseteq [R]$ , но так как Решатель имеет три подсистемы - Рассуждатель, Вычислитель и Синтезатор, то он использует для решения проблемы P1 (цели ИС) множество правил правдоподобного и достоверного (дедуктивного) вывода  $\Gamma$  и множество вычислительных процедур  $C$ . Правила из  $\Gamma$  и процедуры из  $C$  реализуются в Рассуждателе и Вычислителе, соответственно, а их комбинирование осуществляет Синтезатор (напомним, что Решатель = Рассуждатель + Вычислитель + Синтезатор).

Если результат работы Решателя, содержащийся в  $[R]$ , получен с применением Синтезатора и Вычислителя и является высказыванием, то он принадлежит  $\Sigma'$ , где  $\Sigma' \subseteq [R]$ . Если же результаты получены только применением Рассуждателя, то все такие высказывания обозна-

чим посредством  $\Sigma''$ , где  $\Sigma''$  = Рассуждатель  $(\Sigma \cup \text{БФ})$ , а  $\Sigma'' \subseteq \Sigma'$ .

Теперь можно охарактеризовать строение БЗ для ИС, осуществляющей ИАД для решения проблемы P1:

$$\text{БЗ} = \langle \Sigma, \Sigma', \Gamma, C \rangle.$$

Отметим, что  $\Sigma'$  - вторая компонента этой упорядоченной четверки, является открытым множеством, ибо последовательное применение Решателя с изменением БФ или изменением стратегий решения P1 изменяет  $\Sigma'$ .

Таким образом, применение Решателя к  $\text{БФ} \cup \Sigma$  и использование БЗ, содержащей гипотезы, принятые посредством соответствующих критериев, порождают оценки вновь полученных знаний в силу согласованности с имеющимися знаниями в БЗ и посредством правил правдоподобного вывода. Следовательно, теория соответствия Аристотеля – Тарского недостаточна для понимания истинностных оценок высказываний из  $\Sigma'$ . В связи с этим фактически в ИС используется теория истины, называемая теорией когерентности [18], в которой значения истинности высказываний основаны на имеющихся знаниях, а не на соответствии реальности.

Наконец, результаты работы ИС могут иметь практическую полезность, хотя их истинность не была установлена. В этом случае можно говорить о применимости прагматической теории истины [18]: истинно то, что полезно.

Таким образом, когнитивный процесс порождения нового знания в ИС, включающий ИАД и выдвижения гипотез, может быть охарактеризован посредством трех теорий истины – теории соответствия, теории когерентности и прагматической теории. В самом деле, БФ формируется при соблюдении теории соответствия, гипотезы оцениваются согласно теории когерентности, а результаты работы ИС могут быть оправданы согласно прагматической теории истины. Таков **Принцип VII** для ИС, использующих автоматическое порождение гипотез и машинное обучение.

**Принцип VIII (инвариантность структуры Рассуждателя относительно варьируемости предметных областей и структур данных)**

Если Рассуждатель используется для решения некоторого класса задач посредством синтеза

познавательных процедур согласно **Принципу V**, то структура Рассуждателя не изменяется при применении его к различным предметным областям W и различным структурам данных таким, что они удовлетворяют **Принципу IV** – условию применимости ИС. Таким образом, при варьировании W и структур данных не изменяется тип правил правдоподобного вывода и тип рассуждения. Например, сохраняется синтез познавательных процедур типа «индукция + аналогия + абдукция» с последующим применением дедукции, осуществляемый посредством КПЭ - рассуждений.

Это означает, что может быть задан класс интеллектуальных систем ИС<sub>j</sub>, соответствующих проблемам P<sub>1</sub><sup>(j)</sup>, j=1, ..., k, решения которых осуществляются одним **типом формализованных эвристик**. Этому классу эвристик соответствует один и тот же тип Рассуждателя и аналогичные условия его применимости, характеризующиеся **Принципами III и IV**. Будем этот класс формализованных эвристик называть «ядром» Решателя. Очевидно, что конкретная ИС<sub>j</sub> есть «ядро» + его спецификация относительно предметной области W и проблемы P<sub>1</sub><sup>(j)</sup>.

Класс проблем P1, имеющих «ядро» интеллектуальных систем ИС<sub>j</sub>, будем называть **суперпроблемой** (очевидно, что P<sub>1</sub><sup>(j)</sup> ∈ P1). Например, суперпроблемой P1 является прогнозирование каких-либо эффектов посредством порождения гипотез о причинно-следственных зависимостях в БФ, а конкретными проблемами P<sup>(1)</sup>1, P<sup>(2)</sup>1 и P<sup>(3)</sup>1 являются проблемы, соответственно, прогнозирования биологической активности химических соединений с помощью гипотез о фармакофорах (предполагаемых причин биологической активности химических соединений – их подструктур), прогнозирования электорального поведения посредством некоторых детерминант, содержащихся в описаниях индивидуальных социальных субъектов, а также прогнозирования диагноза посредством гипотез, полученных на основании сравнений историй болезней.

**Принцип IX (наличие метауровня ИС)**

Пусть заданы каркас ИС R = ⟨БФ ∪ Σ, Решатель, Решатель (БФ ∪ Σ) = [R] и Рассуждатель (БФ ∪ Σ) = Σ'' и БЗ = ⟨Σ, Σ', Γ, C⟩, где Σ' ⊆ [R], выраженные посредством формального языка представления знаний L, выразительная сила

которого не слабее языка логики предикатов 1-го порядка [1]. Будем полагать, что имеются метаматематические средства ML такие, что в языке ML можно формулировать дедуктивную имитацию Рассуждателя [20] и осуществлять анализ алгоритмов, соответствующих процедурам Решателя [21]. Из этого следует, в частности, возможность выбора стратегий решения задачи  $P^{(j)}$  на логическом уровне. Отметим, что изменение стратегии может иметь место после препроцессинга и экспериментальных (пробных) применений ИС. **Принцип IX** соответствует интеллектуальной способности (13) (адаптация в связи с изменением ситуаций и знаний). Кроме того, следует отметить, что этот принцип предполагает интерактивное использование ИС как человеко-машинной системы.

Таким образом, осуществление **Принципа IX** создает возможность планирования и выбора стратегии решения задачи в компьютерной системе на логическом уровне.

**Принцип X (абдуктивное объяснение результатов ИАД посредством ИС)**

Если исследуемая предметная область является «миром»  $W$  таким, что он характеризуется множеством аксиом  $A_1, \dots, A_m$ , то объяснением события  $E$  является следующая схема [22]:

$$\frac{A_1, \dots, A_m}{B}$$

$$E,$$

где  $B$  – условие реализации события  $E$ , которое дедуктивно следует из посылок  $A_1, \dots, A_m, B$ .

Однако, эта схема дедуктивного объяснения не охватывает случаев открытых теорий, для которых предметная область может быть охарактеризована аксиомами лишь частично, а массив экспериментальных данных расширяется, что может порождать новые обобщения, не принадлежащие ранее принятым утверждениям. В ИС этой ситуации открытости знаний о предметной области соответствуют процедуры машинного обучения в БФ посредством КПЭ - рассуждений, содержащих индукцию, выявляющую сходство фактов.

Для предметных областей таких, что схема дедуктивного объяснения не является применимой, используется схема абдукции Ч.С. Пирса [23]:

$$\frac{D - \text{множество фактов}}{H - \text{множество гипотез}}$$

$$H \text{ объясняют } D$$

Всякая  $h$ , принадлежащая  $H$ , является правдоподобной.

Если  $D$  есть БФ,  $H \subseteq \Sigma' \subseteq \text{Решатель} (БФ \cup \Sigma)$ , отношение « $H$  объясняют БФ» формализуемо относительно предметной области [7], то абдуктивное принятие гипотез завершает синтез познавательных процедур в соответствии с **Принципом VI** ( $H$  могут порождаться, например, посредством индукции и аналогии, что осуществлено в ДСМ-методе автоматического порождения гипотез [15, 16]).

Таким образом, объяснение результатов работы Решателя порождает принятие нового знания (гипотез из  $H$ ), извлеченного из  $БФ \cup \Sigma$ . В приведенной выше схеме абдукции Ч.С. Пирса следует уточнить: способы порождения гипотез  $h$  из множества  $H$ , отношение объяснения гипотезами из  $H$  множеств фактов  $D$  (т.е. БФ), способы установления оценок правдоподобия гипотез  $h$ . Заметим также, что сам **Принцип X** является уточнением интеллектуальной способности (8) из перечня способностей, образующих феноменологию интеллекта.

Последним принципом ИАД посредством ИС является

**Принцип XI (эволюционная эпистемология решения задач в ИС)**

$$P1 \rightarrow TT \rightarrow EE \rightarrow P2$$

является известной схемой роста знания К.Р. Поппера [10], где  $P1$  – решаемая проблема  $TT$  – пробная теория для ее решения,  $EE$  – устранение ошибок и коррекция  $TT$  после ее применения, а  $P2$  – вновь возникшая проблема после анализа результатов измененной (и более корректной)  $TT$ .

Принцип эволюционной эпистемологии для ИС с Рассуждателем, реализующим КПЭ - рассуждения с машинным обучением [24], может быть представлен следующим образом:

$P^{(j)}1 \rightarrow (БФ \cup \Sigma) \rightarrow EE \rightarrow P^{(j)}2$ , где  $EE$  – коррекция и расширение БФ и, быть может, выбор другой стратегии для Рассуждателя;  $P^{(j)}2$  – новая возникшая проблема, требующая продолжение ИАД в рамках суперпроблемы  $P1$  (или, быть

может, требование перехода к другой супер-проблеме).

Следствием **Принципа XI** является необходимость включения ИС в реальный процесс исследования, управления или принятия решений, а также **открытость**  $B\Phi \cup \Sigma$ , что означает, что ИС является человеко-машинной (партнерской) компьютерной системой.

Основной продукт направления исследований «искусственный интеллект» - компьютерные системы, осуществляющие анализ данных и прогнозирование изучаемых эффектов, представленных в БФ. Имитация способностей (1) – (13), характеризующих интеллект (точнее, его феноменологию) посредством Решателя, является основанием для отнесения таких систем к классу **интеллектуальных**.

**Принципы I – XI** могут служить «кодексом интеллектуальности» компьютерной системы. Разумеется, что это отнесение компьютерной системы к классу ИС ограничивает произвол в квалификации компьютерных систем как интеллектуальных.

Из **Принципов I – XI** вытекают следствия, уточняющие смысл термина «интеллектуальная система».

**Следствие 1.** ИС должна быть партнерской человеко-машинной системой, способной функционировать как в интерактивном режиме, применяемой к **открытым** («мирам») предметным областям («мирам»), так и в автономном режиме, применяемой к «замкнутым мирам».

**Следствие 2.** **Принципы I – XI** образуют систему **концептуальных знаний**, управляющую созданием как подсистемы декларативных знаний ИС, так и подсистемы процедурных знаний ИС.

**Следствие 3.** Следствием **Принципов III – VI, X и XI** является взаимодействие Решателя, реализующего правдоподобные рассуждения и вычисления (Решатель = Рассуждатель + Вычислитель + Синтезатор), с информационной средой ИС – базой фактов (БФ) и базой знаний (БЗ). В силу открытости БФ и БЗ ИС имеет возможность их коррекции (ЕЕ – схеме роста знания **Принципа XI**), благодаря этому человеко-машинная система осуществляет адаптацию к изменившемуся состоянию ИС. Это соз-

дает возможность сформулировать новую проблему P2 (в схеме роста знания).

Следовательно, строение и возможности Рассуждателя и Вычислителя компьютерной системы, обладающей Решателем, определяют тип анализа данных в БФ и получение нового знания, включаемого в БЗ. Можно выделить три основных типа Решателей для анализа данных и получения нового знания.

1. Решатель= Вычислитель + Синтезатор, Рассуждатель отсутствует, а Вычислитель осуществляет различные процедуры над числовыми данными, Синтезатор же объединяет различные вычислительные методы, реализуемые Вычислителем. Компьютерную систему с таким Решателем будем называть **вычислительной**.

2. Решатель= Рассуждатель + Вычислитель + Синтезатор, где Рассуждатель осуществляет комбинаторные алгоритмы [25], а Синтезатор объединяет вычислительные методы Вычислителя и комбинаторные алгоритмы Рассуждателя. Компьютерную систему с таким Решателем будем называть **комбинаторно-вычислительной**.

3. Решатель= Рассуждатель + Вычислитель + Синтезатор, где Рассуждатель реализует правдоподобные рассуждения, а Синтезатор формирует стратегии решения задач, объединяющие рассуждения, вычисления и комбинаторные алгоритмы. Однако рассуждения являются **управляющей** процедурой выполняемой стратегии решения задачи, что соответствует способностям (2) – (4), характеризующих интеллект как идеальный тип.

Заметим, что наиболее адекватными для получения нового знания являются КПЭ-рассуждения, характеризующиеся утверждениями A1 – A9.

**Следствие 4.** Из **Принципов I – XI** вытекает интерпретируемость результатов работы Рассуждателя относительно БФ, где  $\Sigma'' = \text{Рассуждатель} (B\Phi \cup \Sigma)$ . Эта интерпретируемость основана на **Принципах I** (цель ИС P1), II (выделение и характеристика предметной области W), III (адекватность W и P1, где P1 – супер-проблема, IV (условие применимости ИС), V (синтез познавательных процедур для интеллектуального анализа данных), VI (фальсифицируемость и аргументируемость [R] – результатов работы Решателя) и X (принцип

абдуктивного объяснения результатов ИС) и, наконец, XI (эволюционная эпистемология решения задач в ИС, включающая ЕЕ – коррекцию результатов и исправление ошибок).

**Следствие 5.** Следствием сформулированных выше **Принципов I – XI**, согласно которым создаются БФ, БЗ и Решатель, является возможность извлекать из результатов работы ИС не только «образцы», добываемые из данных в смысле «data mining» [11], но порождать гипотезы о **закономерностях** (в том числе о зависимостях причинно-следственного типа), обнаруженных в расширяемых последовательностях БФ в интерактивном режиме работы ИС.

Уточним теперь понятие **интеллектуальной системы (ИС)**. Компьютерную систему с Решателем типа 3° (**Следствие 3**), БФ и БЗ= $\langle \Sigma, \Sigma', \Gamma, C \rangle$  будем называть **интеллектуальной**, если  $\Sigma'' \neq \emptyset$ , где  $\Sigma'' =$  Рассуждатель (БФ $\cup$  $\Sigma$ ).

Пусть  $\tilde{\Sigma}$  - разность множеств  $\Sigma'$  и  $\Sigma''$ , где  $\Sigma' \subseteq [R] =$  Решатель (БФ $\cup$  $\Sigma$ ), т.е.  $\tilde{\Sigma} = \Sigma' \setminus \Sigma''$ . Следовательно,  $\tilde{\Sigma}$  - множество всех результатов Решателя, полученных с использованием Вычислителя. ИС будем называть **интегрированной**, если  $\tilde{\Sigma} \neq \emptyset$ .

ИС будем называть **гибридной**, если исходные данные, представленные в БФ, имеют различные структуры – множества (булевские структуры), графы, системы отношений и т.п. Естественной ИС для поддержки научных исследований является ИС такая, что она – интегрированная, гибридная с исходными данными, содержащими как числовые, так и нечисловые (качественные) параметры.

Таким образом, интегрированной ИС является ИС такая, что результаты работы ее Решателя получены с использованием Рассуждателя и Вычислителя.

ИС осуществляет анализ данных и прогнозирование изучаемых эффектов, представленных в БФ, посредством взаимодействия трех типов знаний – концептуального (в соответствии с **Принципами I – XI**), декларативного и процедурного.

Выделение ИС как особого класса компьютерных систем оправдано необходимостью имитации и усиления интеллектуальной дея-

тельности человека в различных областях науки, медицины управления, обороны, правовой сферы и образования. ИС необходимы для создания роботов, способных к обучению и рассуждению в связи с наблюдением различных ситуаций [26].

Компьютерные системы с Решателями задач, логическими средствами которых являются системы продукции «если X, то Y», называются экспертными системами [27]. Экспертные системы, как правило, не содержат подсистем машинного обучения, а их базы знаний формируются для представления знаний и опыта экспертов соответствующей предметной области. Экспертные системы можно считать интеллектуальными системами с ограниченными логическими возможностями [28].

### 3. ДСМ-метод автоматического порождения гипотез и интеллектуальные системы типа ДСМ

Примером интеллектуальных систем, реализующих КПЭ - рассуждения, является класс интеллектуальных систем типа ДСМ (ДСМ - системы), применяемых в различных предметных областях – фармакологии, медицинской диагностике, технической диагностике, социологии и криминалистике.

ДСМ-системы реализуют ДСМ-метод автоматического порождения гипотез (ДСМ-метод АПГ), который состоит из: условий применимости (они могут быть охарактеризованы точным образом [7]), автоматизированных КПЭ-рассуждений, представления знаний в виде квазиаксиоматических теорий (КАТ), дедуктивной имитации КПЭ-рассуждений (она обеспечивает корректность ДСМ-метода АПГ) и, наконец, интеллектуальных систем типа ДСМ<sup>9</sup>.

ДСМ – метода АПГ является формализованной эвристикой для установления причин наличия или отсутствия изучаемых эффектов, представленных в открытых (пополняемых) базах структурированных фактов, сходство которых

<sup>9</sup> Систематическое изложение ДСМ – метода АПГ и его применений в ДСМ– системах содержится в [16], [29] и [32]. ДСМ-метод назван в честь английского мыслителя Д.С. Милля.

выявляется посредством автоматизированных правдоподобных рассуждений – КПЭ – рассуждений, удовлетворяющих условиям А1 – А9. ДСМ – метода АПГ состоит из трех познавательных процедур: эмпирической индукции (порождение причин эффектов на основе обнаруженных сходств фактов), аналогии (правдоподобных выводов, использующих наличие положительных или отрицательных причин в фактах с неопределенной оценкой, требующей уточнения – наличия или отсутствия изучаемого эффекта) и, наконец, абдукции [23, 30] (принятие гипотез посредством объяснения начального состояния базы фактов с помощью ( $\pm$ ) – причин, то есть гипотез, ответственных за наличие эффекта ((+) – причины) и за отсутствие эффекта ((-) – причины)). ДСМ-системы (как интеллектуальные системы) используются в качестве средства интеллектуального анализа данных. ДСМ – метод, будучи нестатистическим методом анализа данных, в состоянии учитывать индивидуальные особенности изучаемых объектов исследования, если их структура представлена информативно так, что используемые параметры достаточны для выявления сходства – условия порождения эффекта (то есть причины изучаемого явления).

Второй важной особенностью ДСМ – метода является его способность порождать полезные гипотезы на малых массивах данных благодаря выявленному сходству объектов, характеризующихся существенными параметрами.

Третья особенность ДСМ – метода анализа данных состоит в том, что он работает с открытыми массивами данных в БФ, распознавая необходимость расширения БФ, если таковая возникает в результате объяснения ее начального состояния, что соответствует интеллектуальной способности (8) (способность находить объяснение и отвечать на вопрос «почему?») и **Принципу X** (абдуктивное объяснение результатов ИАД посредством ИС).

Примерами применения ДСМ – систем является прогнозирование биологических активностей химических соединений [29, 13] (в том числе прогнозирование токсичности и канцерогенности), диагностика глазных заболеваний и диагностика нефрологических заболеваний, качественный анализ социологических данных

[33], использование ДСМ – систем для реализации адаптивного поведения роботов [26, 31].

Охарактеризуем теперь ДСМ – метод АПГ как метод ИАД и прогнозирования зависимостей причинно-следственного типа.

Условиями применимости ДСМ – метода АПГ, а, следовательно, и ДСМ – систем являются условия (а), (в) и (с).

(а) Для применимости ДСМ – метода АПГ знания могут быть слабо формализованы, но данные в БФ должны быть хорошо структурированы, а это означает, соответственно:

1. что предметная область описана неполно и возможна лишь частичная ее аксиоматизация посредством представления знаний в виде квазосаксиоматической теории (КАТ)<sup>10</sup>;

2. что определена операция, устанавливающая **сходство** исследуемых фактов (в БФ) (например, описаний клинических данных или химических соединений, имеющих изучаемые биологические активности и т.п.), такая, что ее результат имеет осмысленную интерпретацию<sup>11</sup>.

(в) Предметная область W, сведения о которой представлены в БФ, должна содержать позитивные факты ((+)–факты), негативные факты ((-)–факты) и примеры неопределенности изучаемого эффекта (( $\tau$ ) – факты) (соответственно, наличие или отсутствие биологической активности химических соединений или симптомов исследуемого заболевания в клинических данных).

БФ в ИС для ДСМ – метода АПГ образована фактоподобными высказываниями вида «объект С имеет множество свойств Q», которым приписаны оценки: «фактически истинно» - (1), «фактически ложно» - (-1), «фактически противоречиво» (0), «неопределенно» ( $\tau$ ).

Таким образом, **фактом** (в БФ) будем называть фактоподобные высказывания с приписанными типами оценок - 1, -1, 0,  $\tau$ .

<sup>10</sup> КАТ есть упорядоченная тройка  $\mathfrak{S} = \langle \Sigma, \Sigma_1, \Gamma \rangle$ , где  $\Sigma$ ,  $\Sigma_1$  и  $\Gamma$ , соответственно, являются множеством аксиом, открытым множеством гипотез и фактов (из БФ) и правил правдоподобного и дедуктивного вывода  $\Sigma$ ,  $\Sigma_1$  и  $\Gamma$  [16].

<sup>11</sup> Подчеркнем здесь снова, что ДСМ – метод АПГ является нестатистическим методом анализа данных, реализующим принцип: сходство фактов определяет наличие изучаемого эффекта и его повторяемость.

(с) В БФ в неявном виде содержатся зависимости причинно-следственного типа, которые могут быть представлены высказываниями вида «подобъект (часть объекта)  $C'$  есть причина наличия (отсутствия) множества свойств  $Q$ ».

Условие (с) является весьма существенным для нестатического анализа данных (то есть фактов из БФ). Оно характеризует предметную область  $W$  посредством следующего допущения о ее природе: всякий позитивный факт ((+) – факт) имеет причину, в силу которой объект обладает соответствующим эффектом (множеством свойств); аналогично, всякий негативный факт из БФ ((–)–факт) имеет причину, в силу которой объект не обладает соответствующим эффектом (множеством свойств). Эти допущения о позитивных и негативных (( $\pm$  - причинах) будем называть аксиомами каузальной полноты (АКП ( $\pm$ )). Очевидно, что АКП ( $\pm$ ) в соответствии с **Принципом II (типы «миров» и представление знаний о нем)** специфицирует предметные области типа (в) и содержится в качестве аксиомы в квазиаксиоматической теории, характеризующей предметную область, что соответствует суперпроблеме  $P1$  из **Принципа XI**.

БФ такую, что для нее выполняются АКП ( $\pm$ ), будем называть **каузально полной**. Очевидно, что это идеальный случай, ибо в БФ содержатся сведения об изучаемом эффекте, представленные достаточно информативно, что делает возможным порождение гипотез о причинно-следственных зависимостях. Посредством этих гипотез может быть предсказано наличие или отсутствие эффектов у фактов из БФ. Это означает, что осуществляется **Принцип X (абдуктивное объяснение результатов ИАД посредством ИС)**: множество гипотез  $H$  объясняет начальное состояние БФ, где  $H = H^+ \cup H^-$ ,  $H^+$  - множество всех гипотез о позитивных причинах ((+) – причинах), а  $H^-$  - множество всех гипотез о негативных причинах ((–) – причинах). Предикаты  $E(H^+, B\Phi^+)$  и  $E(H^-, B\Phi^-)$  означают, что (+) – причины объясняют (+) – факты из БФ, а (–) – причины, соответственно, объясняют (–) – факты из БФ, где  $B\Phi = B\Phi^+ \cup B\Phi^-$ .

Следует отметить, что реально существующие БФ имеют некоторую степень каузальной полноты  $\rho^+$  и  $\rho^-$ , где  $\rho^+$  - отношение числа по-

зитивных фактов, имеющих объяснение посредством (+) – гипотез к числу всех (+) – фактов в БФ, а  $\rho^-$  - отношение числа негативных фактов, имеющих объяснение посредством (–) – гипотез к числу всех (–) – фактов в БФ. Таким образом,

$$\rho^+ = \frac{|B\tilde{\Phi}^+|}{|B\Phi^+|}, \quad \rho^- = \frac{|B\tilde{\Phi}^-|}{|B\Phi^-|}, \quad \text{где } B\tilde{\Phi}^+, B\tilde{\Phi}^- -$$

подмножества фактов позитивных и негативных, соответственно, имеющих объяснение посредством ( $\pm$ ) – гипотез о причинах, а  $B\Phi^+$  и  $B\Phi^-$  – подмножества позитивных и негативных фактов, соответственно, т.е.  $B\tilde{\Phi}^+ \subseteq B\Phi^+$  и  $B\tilde{\Phi}^- \subseteq B\Phi^-$ .

В случае каузальной неполноты БФ, когда  $\rho^+ < 1$  или  $\rho^- < 1$  исследователь назначает пороги  $\rho_0^+$  и  $\rho_0^-$  такие, что если  $\rho^+ \geq \rho_0^+$  и  $\rho^- \geq \rho_0^-$ , то множество порожденных гипотез  $H$  принимается. Для достижения  $\rho_0^+$  и  $\rho_0^-$  рассматривается последовательность расширений БФ:

$$B\Phi_1 \subset B\Phi_2 \subset \dots \subset B\Phi_m \text{ такая, что } \rho_m^+ = \frac{|B\tilde{\Phi}_m^+|}{|B\Phi_m^+|} \text{ и}$$

$$\rho_m^- = \frac{|B\tilde{\Phi}_m^-|}{|B\Phi_m^-|} \text{ и } \rho_m^+ \geq \rho_0^+, \rho_m^- \geq \rho_0^- \text{ (естественно}$$

положить  $0,8 \leq \rho_m^+ \leq 1$  и  $0,7 \leq \rho_m^- \leq 1$ , так как (–) – причины не столь явно выражены, как (+) – причины).

Таким образом, первой составляющей ДСМ – метода АПГ являются точно характеризующие условия его применимости.

Второй составляющей ДСМ – метода АПГ являются КПЭ – рассуждения, формализующие эвристики типа «индукция + аналогия + абдукция», что соответствует способностям (3) (отбор посылок релевантных цели рассуждений) и (4) (способность к рассуждению). Этот основной аспект ДСМ – метода АПГ есть реализация **Принципа V (синтез познавательных процедур для ИАД в БФ)**.

ДСМ – рассуждения (как вид КПЭ – рассуждений) состоят в последовательном применении правил вывода, представляющих индукцию, и правил вывода, представляющих аналогию. Посредством индукции, применяе-

мой к БФ, порождаются гипотезы о ( $\pm$ ) – причинах изучаемых эффектов. Эти гипотезы порождаются посредством обнаружения сходства фактов – позитивных и негативных, соответственно.

Правила правдоподобного вывода, формализующие эмпирическую индукцию, осуществляют поиск и извлечение из БФ зависимостей причинно-следственного типа (гипотез о ( $\pm$ ) – причинах) посредством, как уже говорилось, установления сходства фактов, имеющих определенную структуру. Например, таким сходством могут быть фрагменты структуры химических соединений, имеющих биологическую активность, объективные характеристики организма как в норме, так и при отклонении от нее, соответствующие отсутствию или наличию рассматриваемых заболеваний.

Правила правдоподобного вывода, формализующие индукцию, будем называть правилами правдоподобного вывода 1-го рода (п.п.в.-1). БФ, к которой применяются п.п.в.-1, содержат представления фактов посредством высказываний вида «объект С имеет множество свойств Q», имеющих истинностное значение  $\langle v, 0 \rangle$ , где  $v$  – тип истинностного значения  $v = 1, -1, 0, \tau$ , а «0» означает, что число применений правил правдоподобного вывода равно нулю. Типы истинностных значений  $1, -1, 0, \tau$  обозначают, соответственно, оценки «фактически истинно», «фактически ложно», «фактически противоречиво» и «неопределенно». В частности, высказывание «объект С имеет множество свойств Q» имеет истинностное значение  $\langle 1, 0 \rangle$ , если С обладает множеством свойств Q;  $\langle -1, 0 \rangle$ , если высказывание «объект С не имеет множество свойств Q».

БФ, к которым применяются п.п.в.-1, содержат ( $\pm$ ) – факты и ( $\tau$ ) – факты (примеры неопределенности), представляющие предикат – «объект X обладает эффектом Y»  $X \Rightarrow_1 Y$ , где X – переменная, значениями которой являются представления объектов, а Y – переменная, значениями которой являются представления изучаемых эффектов (множеств свойств). Объекты могут быть охарактеризованы в различных структурах данных. А именно, объект С может быть представлен как множество элементов, как кортеж (упорядоченное конечное множест-

во  $n$  элементов), как граф, как пространственный граф и, наконец, как система отношений. Соответственно, сходство фактов определяется специфическим образом для каждой структуры данных<sup>12</sup>.

Предикат  $X \Rightarrow_1 Y$  является бесконечнозначным, так как его истинностными значениями являются пары  $\langle v, n \rangle$ , где  $v \in \{1, -1, 0\}$ , а  $n \in \mathbb{N}$ ,  $\mathbb{N}$  – множество натуральных чисел.

Определим одноместную логическую связку для  $v \in \{1, -1, 0\}$   $J_v$ :  $J_v p = \begin{cases} t, & \text{если } V[p] = v \\ f, & \text{если } V[p] \neq v \end{cases}$ , где

$t$  и  $f$  – истинностные значения двузначной логики «истина» и «ложь», соответственно,  $p$  – пропозициональная переменная, а  $V$  – функция оценки.  $V_{in} = \{\langle v, n \rangle \mid (v \in \{\pm 1, 0, \tau\}) \& (n \in \mathbb{N})\}$ . Введем также обозначение для множества **возможных** фактических истинностных значений, соответствующих примерам (фактам или гипотезам) с оценкой «неопределенно» –  $\langle \tau, n \rangle$ , где  $\langle \tau, n \rangle$  определяется следующим рекуррентным соотношением:

$$\langle \tau, n \rangle = \{\langle 1, n+1 \rangle, \langle -1, n+1 \rangle, \langle 0, n+1 \rangle\} \cup \langle \tau, n+1 \rangle,$$

а  $n$  и  $n+1$  выражают число применений правил правдоподобного вывода.

Предикат  $X \Rightarrow_1 Y$  является бесконечнозначным, так как его оценками являются фактические истинностные значения  $\langle v, n \rangle$ , где  $v \in \{1, -1, 0\}$ , а  $n \in \mathbb{N}$ , и множества фактических истинностных значений  $\langle \tau, n \rangle$  ( $n \in \mathbb{N}$ ).

Этим оценкам  $X \Rightarrow_1 Y$  соответствуют элементарные формулы  $J_{v,n}(X \Rightarrow_1 Y)$  и  $J_{\langle \tau, n \rangle}(X \Rightarrow_1 Y)$ , где  $v \in \{1, -1, 0\}$ . Посредством  $V_{ex}$  обозначим множество логических истинностных значений  $V_{ex} = \{t, f\}$ . Оценки  $\langle v, n \rangle$  и  $\langle \tau, n \rangle$  будем называть **внутренними** оценками; соответственно,  $\langle v, n \rangle$  будем называть внутренними истинностными значениями. Оценки же  $t$  и  $f$  будем называть **внешними** (или внешними истинностными значениями).

Множество внутренних оценок обозначим посредством  $\tilde{V}_{in}$ , где  $\tilde{V}_{in} = \{\langle v, n \rangle \mid (v \in \{1, -1, 0\}) \& (n \in \mathbb{N})\} \cup \{\langle \tau, n \rangle \mid n \in \mathbb{N}\}$ .

<sup>12</sup> Если объект С и эффект Q представлены множествами элементов, то используется булевская структура данных.

Напомним, что при  $n=0$  имеем оценки фактов, а при  $n>0$  – оценки гипотез, где  $n$  – степень правдоподобия гипотезы.

Определим также одноместную логическую связку  $J_{(v,n)}$ , где  $v \in \{1, -1, 0\}$ , а  $n \in \mathbb{N}$ :

$$J_{(v,n)}p = \bigvee_{i=0}^n J_{(v,i)}p$$

Таким образом, оценка  $(v, n)$  выражается посредством дизъюнкции высказываний  $J_{(0,n)}p, \dots, J_{(v,n)}p$  с истинностным значением  $t$ , что означает, что  $v[p] = (v, i)$ , где  $i=0, 1, \dots, n$ . Логическая связка  $J_{(v,n)}$  необходима для представления итеративного применения правил правдоподобного вывода с неопределенностью в БФ. Напомним, что  $\pm 1, 0, \tau$  – типы истинностных значений, а  $n$  – число применений (шагов) правил правдоподобных выводов, выражающее степень правдоподобия гипотез при  $n$  (чем больше  $n>0$ , тем меньше степень правдоподобия гипотезы).

Таким образом, элементарные формулы  $J_{(v,0)}(C \Rightarrow_1 Q)$ , где  $v = \pm 1, 0$ , а  $C$  и  $Q$  – константы, выражают факты с истинностными значениями «фактически истинно»  $(\langle 1, 0 \rangle)$ , «фактически ложно»  $(\langle -1, 0 \rangle)$ , «фактически противоречиво»  $(\langle 0, 0 \rangle)$ . Элементарные же формулы  $J_{(\tau,0)}(C \Rightarrow_1 Q)$  представляют в БФ примеры неопределенности.

Для формулирования п.п.в.-1 (индукции) используются предикаты позитивного и негативного сходства  $M_n^+(V, W)$  и  $M_n^-(V, W)$ , где  $V$  – переменная, значениями которой являются сходства объектов из (+)-фактов и (-)-фактов, соответственно, а  $W$  – переменная, значениями которой являются множества свойств, представляющие изучаемый эффект или его часть. Параметр  $n$  выражает число применений п.п.в.-1 ( $n=0, 1, 2, \dots$ ). Таким образом, имеется семейство предикатов  $M_n^+(V, W), M_n^-(V, W)$ , где  $n \in \mathbb{N}$ .

Для простоты изложения будем рассматривать булевскую структуру данных. Тогда  $M_n^\sigma(V, W)$ ,  $\sigma = +, -$  определяются посредством формул  $J_{(v,n)}(X_i \Rightarrow_1 Y_i)$ ,  $n \in \mathbb{N}$ ,  $v \in \{1, -1\}$ ,  $i=1, \dots, k$ , где  $k$  – число сходных фактов – (+)-фактов для  $M_n^+$  и (-)-фактов для  $M_n^-$ , а также предикатов  $X=Y, X \subseteq Y$ , операций алгебры множеств  $\cap$  и  $\cup$  и логических связок двузначной логики  $\neg, \&, \vee, \rightarrow, \forall$  и  $\exists$  (для

двух сортов переменных:  $X_i, V$  – для объектов и подобъектов,  $Y_i, W$  – для множеств свойств).

Так как формулы  $J_{(v,n)}(X_i \Rightarrow_1 Y_i)$  для пары  $\langle C, Q \rangle$  порождают двузначные высказывания  $J_{(v,n)}(C \Rightarrow_1 Q)$ , то и предикаты  $M_n^+(V, W)$  и  $M_n^-(V, W)$  являются двузначными (истинными или ложными).

$M_n^+(V, W)$  и  $M_n^-(V, W)$  являются генераторами гипотез о позитивных и негативных причинах, соответственно, так как посредством п.п.в.-1, содержащих эти предикаты, порождаются гипотезы о (+)-причинах и (-)-причинах. Эти гипотезы представимы посредством предиката  $V \Rightarrow_2 W$ : «подобъект  $V$  есть причина наличия (отсутствия) множества свойств  $W$ ».

Охарактеризуем теперь строение  $M_n^+(V, W)$ .

Предикат  $M_n^+(V, W)$  определяется посредством параметрического предиката  $\tilde{M}_n^+(V, W, k)$ , в котором параметр  $k$  выражает число (+)-примеров, имеющих эффект  $W$ , а сходством объектов которых является  $V$ .

$M_n^+(V, W)$  определяется следующим образом:

$M_n^+(V, W) = \exists k \tilde{M}_n^+(V, W, k)$ , где  $=$  – «равенство по определению».

Предикат  $\tilde{M}_n^+(V, W, k)$  выражает четыре условия: экзистенциальное условие (ЭУ), сходство (+)-фактов (или (+)-гипотез) (СФ), эмпирическую зависимость (ЭЗ) и условие исчерпываемости рассматриваемых (+)-примеров изучаемого эффекта в БФ (УИ).

ЭУ выражает то обстоятельство, что существует  $k$  (+)-примеров (фактов, если  $n=0$ , или гипотез, если  $n>0$ ), где  $k$  – переменная величина, таких, что соответствующие  $k$  объектов образуют изучаемым эффектом. СФ представляет сходство этих  $k$  объектов  $V$ , имеющих изучаемый эффект (для химических соединений, обладающих данной биологической активностью, их сходством является фрагмент структуры этих соединений; для описания химических данных больных их сходством является множество общих характеристик историй болезней). ЭЗ выражает причинно-следственную зависимость: если  $V$  (установленное сходство объектов) содержится в объекте  $X$  таком, что высказывание « $X$  обладает эффектом  $Y$ » имеет оценку  $(1, n)$ , где  $n \geq 0$ , то  $W$  есть либо эффект  $Y$ ,

либо его часть (то есть  $W$  – следствие  $V$ ). УИ выражает то обстоятельство, что все сходные (+)-примеры из БФ такие, что их сходством является  $V$ , рассмотрены.

Таким образом, предикат положительного сходства выражает условия ЭУ, СФ, ЭЗ и УИ. Кроме того, следует задать нижнюю границу числа  $k$  сходных (+)-примеров из БФ (наименьшей границей является 2:  $k \geq 2$ ).

Следующие подформулы выражают перечисленные выше условия.

$$\text{ЭУ: } J_{(1,n)}(X_1 \Rightarrow_1 Y_1) \& \dots \& J_{(1,n)}(X_k \Rightarrow_1 Y_k),$$

$$\text{СФ: } (X_1 \cap \dots \cap X_k = V) \& (V \neq \emptyset),$$

ЭЗ и УИ:  $\forall X \forall Y ((J_{(1,n)}(X_1 \Rightarrow_1 Y_1) \& (V \subset X)) \rightarrow ((W \subset Y) \& (W \neq \emptyset) \& (X = X_1 \vee \dots \vee X = X_k)))$ . В ЭУ, СФ, ЭЗ и УИ  $k$  является переменной, значениями которой являются натуральные числа  $k \geq 2$ .

ЭУ выражает тот факт, что в БФ на  $n$ -ом шаге применения правил правдоподобного вывода существуют  $k$  (+)-примеров  $J_{(1,i)}(X_i \Rightarrow_1 Y_i)$ ,  $i=1, \dots, k$ .

СФ выражает установленное сходство  $V$  (+)-примеров из ЭУ. ЭЗ и УИ выражают тот факт, что  $V$  предполагаемая причина эффекта  $W$ .

Аналогично для (-)-примеров из БФ определяется предикат негативного сходства  $M_n^-(V, W)$ . Для (-)-примеров определяется параметрический предикат  $\tilde{M}_n^-(V, W, k)$ , тогда  $M_n^-(V, W) \Leftrightarrow \exists k \tilde{M}_n^-(V, W, k)$ . Заметим, что предикаты  $M_n^+(V, W)$  и  $M_n^-(V, W)$  зависят от параметра  $n$ , выражающего число применений правил правдоподобного вывода к БФ, изменяющих ее состояние.

Пусть  $C'$  - значение  $V$ , а  $Q$  – значение  $W$ , тогда правила правдоподобного вывода (п.п.в.-1 для индукции) формулируются следующим образом:

(I)<sup>+</sup> Если  $M_n^+(C', Q)$  истинно и  $M_n^-(C', Q)$  ложно, то высказывание « $C'$  есть причина  $Q$ » имеет истинностное значение  $\langle 1, n+1 \rangle$ ;

(I)<sup>-</sup> Если  $M_n^+(C', Q)$  ложно и  $M_n^-(C', Q)$  истинно, то высказывание « $C'$  есть причина  $Q$ » имеет истинностное значение  $\langle -1, n+1 \rangle$ ;

(I)<sup>0</sup> Если  $M_n^+(C', Q)$  истинно и  $M_n^-(C', Q)$  истинно, то высказывание « $C'$  есть причина  $Q$ » имеет истинностное значение  $\langle 0, n+1 \rangle$

(I)<sup>τ</sup> Если  $M_n^+(C', Q)$  ложно и  $M_n^-(C', Q)$  ложно, то высказывание « $C'$  есть причина  $Q$ » имеет оценку  $\langle \tau, n+1 \rangle$ .

Выразим теперь эти правила правдоподобного вывода (п.п.в.-1) формально:

$$(I)^+ \frac{J_{(\tau,n)}(V \Rightarrow_2 W), M_n^+(V, W) \& \neg M_n^-(V, W)}{J_{\langle 1, n+1 \rangle}(V \Rightarrow_2 W)},$$

$$(I)^- \frac{J_{(\tau,n)}(V \Rightarrow_2 W), \neg M_n^+(V, W) \& M_n^-(V, W)}{J_{\langle -1, n+1 \rangle}(V \Rightarrow_2 W)},$$

$$(I)^0 \frac{J_{(\tau,n)}(V \Rightarrow_2 W), M_n^+(V, W) \& M_n^-(V, W)}{J_{\langle 0, n+1 \rangle}(V \Rightarrow_2 W)},$$

$$(I)^\tau \frac{J_{(\tau,n)}(V \Rightarrow_2 W), \neg M_n^+(V, W) \& \neg M_n^-(V, W)}{J_{\langle \tau, n+1 \rangle}(V \Rightarrow_2 W)}.$$

П.п.в.-1 являются семейством правил, т.к. (I)<sup>σ</sup> зависят от параметра  $n$ , выражающего степень правдоподобия как истинностных значений  $\bar{v} = \langle v, n \rangle$ , где  $v = \pm 1, 0$ , так и множества истинностных значений  $\langle \tau, n \rangle$ .

Порождаемый предикат  $V \Rightarrow_2 W$  (подобъект  $V$  есть причина наличия (отсутствия) эффекта  $W$ ) является результатом извлечения из БФ сходства соответствующих примеров (ЭУ и СФ), выражающего зависимость причинно-следственного типа (ЭЗ и УИ). Предикат  $V \Rightarrow_2 W$  есть результат индуктивного обобщения посредством сравнения рассматриваемых примеров из БФ.

Начальное состояние БФ может быть представлено следующим образом:

$$\text{БФ} = \text{БФ}^+ \cup \text{БФ}^- \cup \text{БФ}^\tau, \text{ где}$$

$$\text{БФ}^+ = \{ \langle X, Y \rangle | J_{(1,0)}(X \Rightarrow_1 Y) \},$$

$$\text{БФ}^- = \{ \langle X, Y \rangle | J_{(-1,0)}(X \Rightarrow_1 Y) \},$$

$$\text{а } \text{БФ}^\tau = \{ \langle X, Y \rangle | J_{(\tau,0)}(X \Rightarrow_1 Y) \},$$

где  $\langle X, Y \rangle$  - упорядоченная пара  $\langle$ объект, эффект $\rangle$ ;

$\text{БФ}^\sigma$ , где  $\sigma \in \{+, -, \tau\}$ , есть множества пар  $\langle X, Y \rangle$  таких, что выполняются  $J_{(1,0)}(X \Rightarrow_1 Y)$ ,  $J_{(-1,0)}(X \Rightarrow_1 Y)$  и  $J_{(\tau,0)}(X \Rightarrow_1 Y)$ , соответственно<sup>13</sup>.

Формулируемые ниже правила правдоподобного вывода по аналогии – п.п.в.-2 – ис-

<sup>13</sup> В некоторых интеллектуальных системах  $\text{БФ} = \text{БФ}^+ \cup \text{БФ}^- \cup \text{БФ}^0 \cup \text{БФ}^\tau$ , где  $\text{БФ}^0 = \{ \langle X, Y \rangle | J_{(0,0)}(X \Rightarrow_1 Y) \}$ . Такими системами являются системы интеллектуального анализа социологических данных [33].

пользуются для уменьшения неопределенности фактов из БФ<sup>†</sup>. П.п.в.-2 используют результаты применения п.п.в.-1 (индукции) – гипотезы вида  $J_{(v,n)}(C' \Rightarrow_2 Q)$ , где  $v \in \{1, -1, 0\}$ , а  $n \geq 1$ .

П.п.в.-2 формулируются посредством предикатов аналогии  $\Pi_n^+(V, W)$ ,  $\Pi_n^-(V, W)$ ,  $\Pi_n^0(V, W)$  и  $\Pi_n^\tau(V, W)$ .  $\Pi_n^+(V, W)$  и  $\Pi_n^-(V, W)$  определяются, соответственно, посредством параметрических предикатов  $\tilde{\Pi}_n^+(V, W, k)$  и  $\tilde{\Pi}_n^-(V, W, k)$ , где  $k$  – параметр, выражающий число порожденных гипотез, представленных формулами  $J_{(1,n)}(X_i \Rightarrow_2 Y_i)$  и  $J_{(-1,n)}(X_i \Rightarrow_2 Y_i)$  для  $\tilde{\Pi}_n^+$  и  $\tilde{\Pi}_n^-$ , соответственно, где  $i=1, \dots, k$ .

Результатом применения п.п.в.-2 являются гипотезы о наличии (отсутствии) изучаемого эффекта у соответствующих объектов, относительно которых имелась оценка «неопределенно». Таким образом, п.п.в.-2 порождают предсказания вида  $J_{(v, n+1)}(C \Rightarrow_1 Q)$ , где  $v \in \{1, -1, 0\}$ , или  $J_{(\tau, n+1)}(C \Rightarrow_1 Q)$ , а  $n$  – число шагов, за которое были получены гипотезы о ( $\pm$ ) – причинах, используемые в предикатах  $\Pi_n^+(V, W)$  и  $\Pi_n^-(V, W)$  (гипотезы с истинностными значениями  $\langle 0, n \rangle$  используются в предикате  $\Pi_n^0(V, W)$ ).

Предикат  $\tilde{\Pi}_n^+(V, W, k)$  выражает условие такое, что объект  $V$  содержит позитивные причины  $X_1, \dots, X_k$  для множеств свойств  $Y_1, \dots, Y_k$ , соответственно, а множество свойств  $W$ , представляющее изучаемый эффект, покрывается множествами  $Y_1, \dots, Y_k$  ( $k$  – параметр). Это условие выразимо формулой

$$\left( \bigwedge_{i=1}^k \exists X_i (J_{(1,n)}(X_i \Rightarrow_2 Y_i) \& (X_i \subset V)) \& \left( \bigcup_{i=1}^k Y_i = W \right) \right). (1)$$

Вторым условием, содержащимся в  $\Pi_n^+(V, W)$ , является условие исчерпываемости всех причин, вынуждающих наличие множества свойств таких, что они включаются в  $V$ . Это условие выразимо формулой

$$\forall Y (\exists X (J_{(1,n)}(X \Rightarrow_2 Y \& (X \subset V)) \rightarrow \left( \bigvee_{i=1}^k (Y = Y_i) \right)). (2)$$

Третьим условием, содержащимся в  $\Pi_n^+(V, W)$ , является условие, утверждающее, что  $V$  не содержит ни отрицательных причин  $Z$ , ни  $Z$  таких, что  $J_{(0,n)}(Z \Rightarrow_2 U)$   $Z$  для любого непустого подмножества свойств  $U$  множества  $W$ .

Это условие выразимо формулой  $\forall U ((U \subseteq W) \& (U \neq \emptyset)) \rightarrow \neg \exists Z ((J_{(-1,n)}(Z \Rightarrow_2 U) \vee J_{(0,n)}(Z \Rightarrow_2 U)) \& (Z \subseteq W))$ . (3)

$\Pi_n^-(V, W)$  определяется аналогично с заменой в (1) и (2)  $J_{(1,n)}$  на  $J_{(-1,n)}$  и с заменой в (3)  $J_{(-1,n)}$  на  $J_{(1,n)}$ .

Определение предиката  $\Pi_n^+(V, W)$  образовано конъюнкцией условий (1), (2) и (3) и применением кванторов существования к переменным  $Y_1, \dots, Y_k$ :  $\exists Y_1, \dots, \exists Y_k ((1) \& (2) \& (3))$ <sup>14</sup>.

Предикаты  $\Pi_n^0(V, W)$  и  $\Pi_n^\tau(V, W)$  определяются следующим образом:

$$\begin{aligned} \Pi_n^0(V, W) &= \exists X_1 \exists Y_1 \exists X_2 \exists Y_2 (J_{(1,n)}(X_1 \Rightarrow_2 Y_1) \& \\ & J_{(-1,n)}(X_2 \Rightarrow_2 Y_2) \& (Y_1 \cap Y_2 \neq \emptyset) \& (X_1 \subset Y_1) \& (X_2 \subset Y_2) \\ & \& (Y_1 \subseteq W) \& (Y_2 \subseteq W)) \vee \exists X \exists Y (J_{(0,n)}(X \Rightarrow_2 Y)) \& \\ & (X \subset V) \& (Y \subseteq W)), \end{aligned}$$

$\Pi_n^\tau(V, W) = \neg \Pi_n^+(V, W) \vee \Pi_n^-(V, W) \cup \Pi_n^0(V, W)$   
Из определений  $\Pi_n^+(V, W)$ ,  $\Pi_n^-(V, W)$  и  $\Pi_n^0(V, W)$  следуют утверждения (а) и (в):

- (а)  $\forall V \forall W (\Pi_n^+(V, W) \rightarrow \neg \Pi_n^-(V, W))$ ,
- (в)  $\forall V \forall W (\Pi_n^\sigma(V, W) \rightarrow \neg \Pi_n^0(V, W))$ , где  $\sigma \in \{+, -\}$ .

Аналогично п.п.в.-1 формулируются п.п.в.-2 (правила вывода для аналогии):

$$(II)^+ \frac{J_{(\tau,n)}(V \Rightarrow_1 W), \Pi_n^+(V, W)}{J_{\langle 1, n+1 \rangle}(V \Rightarrow_1 W)},$$

$$(II)^- \frac{J_{(\tau,n)}(V \Rightarrow_1 W), \Pi_n^-(V, W)}{J_{\langle -1, n+1 \rangle}(V \Rightarrow_1 W)},$$

$$(II)^0 \frac{J_{(\tau,n)}(V \Rightarrow_1 W), \Pi_n^0(V, W)}{J_{\langle 0, n+1 \rangle}(V \Rightarrow_1 W)},$$

$$(II)^\tau \frac{J_{(\tau,n)}(V \Rightarrow_1 W), \Pi_n^\tau(V, W)}{J_{(\tau,n)}(V \Rightarrow_1 W)}.$$

Из определений предикатов  $\Pi_n^+(V, W)$ ,  $\Pi_n^-(V, W)$  и  $\Pi_n^0(V, W)$  следует, что они представляют формализацию выводов по **анalogии**. В самом деле,  $\Pi_n^\sigma(V, W)$  содержат в качестве подформул формулы  $J_{(v,n)}(X \Rightarrow_2 Y)$ , где  $v \in \{1, -1\}$ , а  $n > 0$ . Эти подформулы получены в

<sup>14</sup> Так как  $k$  – переменная, то  $\Pi_n^+(V, W)$  определяется формулой с кванторами по кортежам переменной длины. Это означает, что используется язык слабой логики предикатов 2-го порядка [35] (см. также [36]).

результате применения п.п.в.-1 (индукции) к БФ (и ее расширениям посредством п.п.в.-2). Но  $J_{(v,n)}(X \Rightarrow_2 Y)$  является сходством фактов или гипотез  $J_{(v,i)}(V_j \Rightarrow_1 W_j)$ , где  $i < n$ , а потому результат п.п.в.-2, которым является  $J_{(v,n)}(V \Rightarrow_1 W)$  сходен с  $J_{(v,i)}(V_j \Rightarrow_1 W_j)$ , что соответствует структуре вывода по аналогии [7].

Рассмотрим теперь строение ДСМ-рассуждений<sup>15</sup>.

1. **Шагом** ДСМ-рассуждения будем называть однократное применение п.п.в.-1 (индукции) или п.п.в.-2 (анalogии).

2. **Тактом** ДСМ-рассуждения будем называть упорядоченное последовательное применение п.п.в.-1 и п.п.в.-2 (т.е. двух шагов).

3. **Первым Этапом (Этап I)** ДСМ-рассуждения будем называть последовательное применение тактов (п.п.в.-1  $\rightarrow$  п.п.в.-2)<sub>1</sub>  $\rightarrow$  (п.п.в.-1  $\rightarrow$  п.п.в.-2)<sub>2</sub>  $\rightarrow$  ... (п.п.в.-1  $\rightarrow$  п.п.в.-2)<sub>n-1</sub>  $\rightarrow$  (п.п.в.-1  $\rightarrow$  п.п.в.-2)<sub>n</sub> такое, что множество порожденных гипотез на такте  $n$  совпадает с множеством гипотез на такте  $n-1$ , где  $n$  – номер первого такого совпадения. Такт  $n$  будем называть тактом **стабилизации** первого этапа ДСМ-рассуждения.

Таким образом, Этап I осуществляет итерацию тактов «индукция – аналогия» до стабилизации порождения гипотез.

Охарактеризуем теперь применение ДСМ-рассуждений к БФ и начальному состоянию БЗ, содержащей правило вывода Г, аксиомы булевской структуры данных и аксиомы каузальной полноты, являющиеся основанием для принятия гипотез посредством абдукции [7]. Применение п.п.в.-1 к БФ и последующее применение п.п.в.-2 на этапе I порождает расширение – БФ<sub>1</sub>, определяемое ниже.

Для характеристики этапа I введем следующие определения:

$$\begin{aligned} \text{БФ}_0 &= \text{БФ}, \text{БФ} = \text{БФ}^+ \cup \text{БФ}^- \cup \text{БФ}^\tau, \\ \text{где } \text{БФ}^v &= \{ \langle X, Y \rangle \mid J_{(v,0)}(X \Rightarrow_1 Y) \} \quad v \in \{1, -1, 0\}, \text{ а} \\ \text{БФ}^\tau &= \{ \langle X, Y \rangle \mid J_{(\tau,0)}(X \Rightarrow_1 Y) \}; \end{aligned}$$

<sup>15</sup> ДСМ-рассуждения, содержащие п.п.в.-1, которые являются уточнением индуктивного метода Д.С. Милля [37] средствами современной логики, используют также аналогю и абдукцию, однако идея использования сходства для порождения гипотез о причинах явлений систематически была развита Д.С. Миллем.

$$\text{БФ}_1^+ = \{ \langle V, W \rangle \mid J_{(1,2)}(V \Rightarrow_1 W) \},$$

$$\text{БФ}_2^+ = \{ \langle V, W \rangle \mid J_{(1,4)}(V \Rightarrow_1 W) \},$$

$$\text{БФ}_3^+ = \{ \langle V, W \rangle \mid J_{(1,6)}(V \Rightarrow_1 W) \},$$

⋮

$$\text{БФ}_n^+ = \{ \langle V, W \rangle \mid J_{(1,2n)}(V \Rightarrow_1 W) \}.$$

Аналогично определяются БФ<sub>n</sub><sup>-</sup> и БФ<sub>n</sub><sup>0</sup>, а БФ<sub>n</sub><sup>τ</sup> = {⟨V, W⟩ | J<sub>(τ, 2n)</sub>(V ⇒<sub>1</sub> W)}.

$$\overline{\text{БФ}}_n^v = \text{БФ}_0^v \cup \left( \bigcup_{i=1}^n \text{БФ}_i^v \right), \quad v \in \{1, -1, 0, \tau\},$$

$$\overline{\text{БФ}}_n = \overline{\text{БФ}}_n^+ \cup \overline{\text{БФ}}_n^- \cup \overline{\text{БФ}}_n^0 \cup \overline{\text{БФ}}_n^\tau, \quad \text{где}$$

$\bigcup_{i=1}^n \text{БФ}_i^v$ ,  $i > 0$  – часть базы знаний, порожденная ДСМ-рассуждением за  $n$  тактов. Очевидно, что

$$\{ \langle V, W \rangle \mid J_{(v, 2n)}(V \Rightarrow_1 W) \} = \{ \langle V, W \rangle \mid \text{П}_{2n-1}^v(V, W) \& J_{(\tau, 2n-1)}(V \Rightarrow_1 W) \}, \quad \text{где } v \in \{+, -, 0\}; \text{ а}$$

$$\{ \langle V, W \rangle \mid J_{(\tau, 2n)}(V \Rightarrow_1 W) \} = \{ \langle V, W \rangle \mid \text{П}_{2n-1}^\tau(V, W) \& J_{(\tau, 2n-1)}(V \Rightarrow_1 W) \}.$$

Очевидно, что

$$\text{БФ}_n^+ = \{ \langle V, W \rangle \mid \text{П}_{2n-1}^+(V, W) \& J_{(\tau, 2n-1)}(X \Rightarrow_1 Y) \}.$$

Таким образом,

$$\text{БФ}_1^v = \{ \langle V, W \rangle \mid \text{П}_1^v(V, W) \& J_{(\tau, 1)}(V \Rightarrow_1 W) \},$$

$$\text{БФ}_2^v = \{ \langle V, W \rangle \mid \text{П}_3^v(V, W) \& J_{(\tau, 3)}(V \Rightarrow_1 W) \},$$

$$\text{БФ}_3^v = \{ \langle V, W \rangle \mid \text{П}_5^v(V, W) \& J_{(\tau, 5)}(V \Rightarrow_1 W) \},$$

⋮

⋮

⋮

$$\text{БФ}_n^v = \{ \langle V, W \rangle \mid \text{П}_{2n-1}^v(V, W) \& J_{(\tau, 2n-1)}(V \Rightarrow_1 W) \}, \quad \text{где } v \in \{+, -, 0, \tau\}.$$

Заметим, что БФ есть база фактов, в которой факты представлены формулами  $J_{(v,0)}(C \Rightarrow_1 Q)$  и  $J_{(\tau,0)}(C \Rightarrow_1 Q)$ ; однако БФ<sub>i</sub><sup>v</sup>, где  $v \in \{1, -1, 0, \tau\}$ ,  $i = 1, 2, \dots$  являются фрагментами базы знаний, так как они порождены ДСМ-рассуждением, включающим на последнем шаге п.п.в.-2.

Другими фрагментами базы знаний являются БЗ<sub>n</sub><sup>v</sup>, порожденные ДСМ-рассуждениями, последним шагом которых являются п.п.в.-1.

$$\text{БЗ}_0^v = \{ \langle V, W \rangle \mid J_{(\tau,0)}(V \Rightarrow_2 W) \},$$

$$\text{БЗ}_1^v = \{ \langle V, W \rangle \mid J_{(v,1)}(V \Rightarrow_2 W) \},$$

$$\text{БЗ}_2^v = \{ \langle V, W \rangle \mid J_{(v,3)}(V \Rightarrow_2 W) \},$$

$$\text{БЗ}_3^v = \{ \langle V, W \rangle \mid J_{(v,5)}(V \Rightarrow_2 W) \},$$

⋮

⋮

⋮

$$\text{БЗ}_n^v = \{ \langle V, W \rangle \mid J_{(v, 2n-1)}(V \Rightarrow_2 W) \},$$

$$\text{где } v \in \{1, -1, 0\}, n \geq 1.$$

Соответственно,

$$BZ_n^\tau = \{\langle V, W \rangle \mid J_{(\tau, 2n-1)}(V \Rightarrow_2 W)\}, \text{ где } n \geq 1.$$

Очевидно, что

$$BZ_n^+ = \{\langle V, W \rangle \mid M_{2n-2}^+(V, W) \& \neg M_{2n-2}^-(V, W) \& J_{(\tau, 2n-2)}(V \Rightarrow_2 W)\}, \text{ где } n \geq 2.$$

Аналогично определяются  $BZ_n^v$  для  $v = -1, 0, \tau$  для  $\neg M_{2n-2}^+(V, W) \& M_{2n-2}^-(V, W)$ ,  $M_{2n-2}^+(V, W) \& M_{2n-2}^-(V, W)$  и  $\neg M_{2n-2}^+(V, W) \& \neg M_{2n-2}^-(V, W)$ , соответственно.

Определим также  $BZ_n$ ,  $\overline{BZ}_n^v$  и  $\overline{BZ}_n$ , где

$$BZ_n = BZ_n^+ \cup BZ_n^- \cup BZ_n^0 \cup BZ_n^\tau,$$

$$\overline{BZ}_n^v = \bigcup_{i=1}^n BZ_i^v, v \in \{1, -1, 0, \tau\},$$

$$\overline{BZ}_n = BZ_0 \cup \overline{BZ}_n^+ \cup \overline{BZ}_n^- \cup \overline{BZ}_n^0 \cup \overline{BZ}_n^\tau, \text{ где } n \geq 1.$$

Базисом ДСМ-рассуждения является пара  $\langle B\Phi_0, BZ_0 \rangle$ ,  $n$ -м тактом – пара  $\langle \overline{BZ}_n, \overline{B\Phi}_{n+1} \rangle$ , где  $BZ_0 = \{\langle V, W \rangle \mid J_{(\tau, 0)}(V \Rightarrow_2 W)\}$ .

**Условием стабилизации** (окончанием Этапа I) ДСМ-рассуждения является равенство  $\overline{BZ}_n = \overline{BZ}_{n+2}$ .

Определим отношение вложения  $\sqsubseteq$  для  $\overline{B\Phi}_m$  и  $\overline{BZ}_m$ :

$$\overline{B\Phi}_m \sqsubseteq \overline{B\Phi}_{m+2} \Leftrightarrow (\overline{B\Phi}_m^+ \subseteq \overline{B\Phi}_{m+2}^+) \& (\overline{B\Phi}_m^- \subseteq \overline{B\Phi}_{m+2}^-) \& (\overline{B\Phi}_m^0 \subseteq \overline{B\Phi}_{m+2}^0) \& (\overline{B\Phi}_m^\tau \subseteq \overline{B\Phi}_{m+2}^\tau),$$

$$\overline{BZ}_m \sqsubseteq \overline{BZ}_{m+2} \Leftrightarrow (\overline{BZ}_m^+ \subseteq \overline{BZ}_{m+2}^+) \& (\overline{BZ}_m^- \subseteq \overline{BZ}_{m+2}^-) \& (\overline{BZ}_m^0 \subseteq \overline{BZ}_{m+2}^0) \& (\overline{BZ}_m^\tau \subseteq \overline{BZ}_{m+2}^\tau).$$

Эти определения выражают уменьшение фактов и гипотез с оценками «неопределенно» в последовательности тактов ДСМ-рассуждений.

Рассмотрим  $B\Phi_n^v$ , где  $v \in \{+, -, 0, \tau\}$ , а  $n = 0, 1, \dots$ .

Тогда каждой паре  $\langle C, Q \rangle \in B\Phi_n^v$  взаимно однозначно соответствует элементарная формула  $J_{\langle v, n \rangle}(C \Rightarrow_1 Q)$ , если  $v \in \{1, -1, 0, \tau\}$ , и формула  $J_{\langle \tau, n \rangle}(C \Rightarrow_1 Q)$ , если  $v = \tau$ . Множество всех таких формул, соответствующих  $B\Phi_n^v$ , где  $v \in \{1, -1, 0, \tau\}$ , обозначим посредством  $\Omega_n^v$ .  $\Omega_n^v$  будем называть **описанием**  $B\Phi_n^v$ , а  $\Omega_n$  будем называть **описанием**  $\overline{B\Phi}_n$ .

Аналогично посредством  $\Delta_n^v$  обозначим множество всех формул, соответствующих

$BZ_n^v$ .  $\Delta_n^v$  будем называть **описанием**  $BZ_n^v$ , а  $\Delta_n$  будем называть **описанием**  $\overline{BZ}_n$ .

Пары  $S_n = \langle \Delta_n, \Omega_{n-1} \rangle$  и  $S_{n+1} = \langle \Omega_n, \Delta_{n-1} \rangle$  будем называть  **$n$ -м состоянием** интеллектуальной системы типа ДСМ. Легко показать, что тактам ДСМ-рассуждения, представимыми посредством состояний ИС  $S_n$  и  $S_{n+1}$  соответствуют пары  $S_n = \langle \Delta_{2n-1}, \Omega_{2n-2} \rangle$  и  $S_{n+1} = \langle \Omega_{2n-1}, \Delta_{2n} \rangle$ <sup>16</sup>.

Вторым Этапом ДСМ-рассуждения, который осуществляется после достижимости равенства  $\overline{BZ}_n = \overline{BZ}_{n+2}$  (это равносильно  $\Delta_n = \Delta_{n+2}$ ), является абдуктивное принятие гипотез согласно уточненной схеме Ч.С. Пирса [23], представленной в данной статье **Принципом X**.

Для ДСМ-метода АПГ будем рассматривать тип (в) предметных областей («миров»)  $W$ , к которым применяются ИС типа ДСМ. Это означает, что выполняются относительно  $W$  условия применимости  $(\alpha)$ ,  $(\beta)$  и  $(\gamma)$ .

Условие  $(\gamma)$  представимо **аксиомами каузальной полноты** АКП<sup>(+)</sup> и АКП<sup>(-)</sup>.

АКП<sup>(+)</sup>:

$$\forall X \forall Y \exists V_1 \dots \exists V_k \exists W_1 \dots \exists W_k ((J_{\langle 1, 0 \rangle}(X \Rightarrow_1 Y) \rightarrow \bigwedge_{i=1}^k J_{\langle 1, n \rangle}(V_i \Rightarrow_2 W_i) \& (V_i \subset X) \& (V_i \neq \emptyset) \& (W_i \neq \emptyset) \& (\bigwedge_{i=1}^k W_i = Y))),$$

АКП<sup>(-)</sup>:

$$\forall X \forall Y \exists V_1 \dots \exists V_k \exists W_1 \dots \exists W_k ((J_{\langle -1, 0 \rangle}(X \Rightarrow_1 Y) \rightarrow \bigwedge_{i=1}^k J_{\langle -1, n \rangle}(V_i \Rightarrow_2 W_i) \& (V_i \subset X) \& (V_i \neq \emptyset) \& (W_i \neq \emptyset) \& (\bigwedge_{i=1}^k W_i = Y))).$$

В случае, если существуют единственные причины  $V$  эффектов  $W$  АКП<sup>(+)</sup> упрощается:

$$\forall X \forall Y \exists V (J_{\langle 1, n \rangle}(X \Rightarrow_1 Y) \rightarrow \exists n (J_{\langle 1, n \rangle}(V \Rightarrow_2 Y) \& (V \subset X) \& (V_i \neq \emptyset))).$$

Аналогично упрощается АКП<sup>(-)</sup>.

Таким образом, в предметной области  $W$  типа (в) в каждом позитивном факте для соответствующего эффекта  $Y$  существует причина  $V$ . Аналогичное имеет место для отрицательных

<sup>16</sup> Таблицы представления тактов ДСМ-рассуждения содержатся в Приложении I.

фактов. Это условие обобщается для случая существования  $k$  причин  $V_1, \dots, V_k$  в АКП<sup>(σ)</sup>, где  $σ \in \{+, -\}$ <sup>17</sup>.

В абдуктивной схеме принятия гипотез Ч.С. Пирса имеется отношение объяснения, представленное предикатом «Н объясняет D», где Н – множество гипотез, а D – множество фактов из предметной области W.

Уточним абдуктивную схему Ч.С. Пирса, используя метаязык для ДСМ-рассуждений, содержащий переменные для элементарных формул  $\varphi, \psi, \chi$  (быть может с нижними индексами) и переменные для множеств элементарных формул вида  $J_{\langle v, n \rangle} (C \Rightarrow_2 Q)$  и  $J_{\langle v, 0 \rangle} (C \Rightarrow_1 Q)$ , ( $v \in \{1, -1, 0\}$ ,  $n > 1$ ), обозначаемые посредством  $\Lambda, X$  (быть может с нижними индексами), соответственно.

Определим в метаязыке предикат  $E^+(\varphi, \psi)$  – « $\psi$  позитивно объясняет  $\varphi$ » - следующим образом, используя метапредикат « $\equiv$ » графического равенства формул:

$$E^+(\varphi, \psi) \equiv \exists n \exists X \exists Y \exists V_1 \dots \exists V_k \exists W_1 \dots \exists W_k ((\psi \equiv_k (\& J_{\langle 1, n \rangle} (V_i \Rightarrow_2 W_i) \& (V_i \subset X) \& (V_i \neq \emptyset) \& (W_i \neq \emptyset) \& \bigwedge_{i=1}^k (W_i = Y)))) \& (\varphi \equiv J_{\langle 1, 0 \rangle} (X \Rightarrow_1 Y))).$$

Аналогично определим  $E^-(\varphi, \psi)$  – « $\psi$  негативно объясняет  $\varphi$ ».

В случае существования единственной гипотезы о (+)-причине

$$E^+(\varphi, \psi) \equiv \exists n \exists X \exists Y \exists V ((\psi \equiv J_{\langle 1, n \rangle} (V \Rightarrow_2 Y)) \& (\varphi \equiv J_{\langle 1, 0 \rangle} (X \Rightarrow_1 Y) \& (V \subset X) \& (V \neq \emptyset))).$$

Далее определим предикат  $E(\varphi, \psi)$  – « $\psi$  объясняет  $\varphi$ »:

$$E(\varphi, \psi) \equiv E^+(\varphi, \psi) \vee E^-(\varphi, \psi).$$

Пусть  $\Lambda$  и  $X$  - переменные, область определения которых являются, соответственно, элементарные формулы  $J_{\langle v, n \rangle} (C \Rightarrow_2 Q)$  и  $J_{\langle v, 0 \rangle} (C \Rightarrow_1 Q)$ , где  $v = \pm 1$ , а  $n > 1$ .

Определим предикаты  $\bar{E}(\Lambda, X)$  и  $\bar{E}^\sigma(\Lambda, X)$ , где  $σ \in \{+, -\}$ :

$$\bar{E}(\Lambda, X) \equiv \forall \varphi ((\varphi \in X) \rightarrow \exists \psi ((\psi \in \Lambda) \& E(\psi, \varphi))),$$

$$\bar{E}^\sigma(\Lambda, X) \equiv \forall \varphi ((\varphi \in X) \rightarrow \exists \psi ((\psi \in \Lambda) \& E^\sigma(\psi, \varphi))),$$

где  $σ \in \{+, -\}$ .

Имеет место следующее

**Утверждение (\*):**

$\exists \Lambda (\text{АКП}^{(\sigma)} \rightarrow \bar{E}^\sigma(\Lambda, \Omega_0))$ , где  $σ \in \{+, -\}$ , а  $\Omega_0$  – описание начального состояния базы фактов –  $B\Phi_0$ .

Очевидно, что имеют место утверждения

$$(\text{АКП}^{(+)} \rightarrow \bar{E}^+(\Delta_{2n-1}, \Omega_0))$$

и

$(\text{АКП}^{(-)} \rightarrow \bar{E}^-(\Delta_{2n-1}, \Omega_0))$ , если выполняется условие стабилизации ДСМ-рассуждения

$\bar{B}\bar{Z}_n = \bar{B}\bar{Z}_{n+1}$ . Из этих рассуждений в силу конечности  $\Omega_0$  и определения Этапа I ДСМ-рассуждения следует **Утверждение (\*)**, а также

$$((\text{АКП}^{(+)} \& \text{АКП}^{(-)}) \rightarrow \bar{E}(\Delta_{2n-1}, \Omega_0)),$$

где

$$\bar{E}(\Delta_{2n-1}, \Omega_0) \equiv \bar{E}^+(\Delta_{2n-1}, \Omega_0) \vee \bar{E}^-(\Delta_{2n-1}, \Omega_0).$$

Уточним теперь схему абдуктивного принятия гипотез (абдукции) Ч.С. Пирса [23] средствами ДСМ-рассуждений.

После стабилизации ДСМ-рассуждений, представленной равенством  $\bar{B}\bar{Z}_n = \bar{B}\bar{Z}_{n+1}$ , завершается Этап I. В качестве D, Н и отношения «Н объясняет D» рассмотрим  $\Omega_0$  (описание  $B\Phi_0$ ),  $\Delta_{2n-1} \cup \Omega_{2n}$  (множество порожденных гипотез при условии стабилизации),  $E(\Delta_{2n-1}, \Omega_0)$  ( $\Delta_{2n-1}$  объясняют  $\Omega_0$ ). Обозначим посредством  $\Omega_{2n}^*$  множество гипотез, где  $\Omega_{2n}^* = \Omega_{2n} \setminus \Omega_0$  (« $\setminus$ » - операция разности множеств).

Тогда абдуктивная схема Ч.С. Пирса будет представлена следующим образом:

$\Omega_0$  – множество фактов

$\Delta_{2n-1} \cup \Omega_{2n}^*$  - множество гипотез

$$\bar{E}(\Delta_{2n-1}, \Omega_0), \Delta_{2n-1} = \Delta_{2n+1}$$

$$\forall h ((J \bar{v} h \in \Delta_{2n-1} \cup \Omega_{2n}^*) \rightarrow \forall [J \bar{v} h] = t),$$

где  $h$  есть  $(C \Rightarrow_1 Q)$  или  $(C' \Rightarrow_2 Q)$ , а  $\bar{v} = \langle v, 2n-1 \rangle$ ,  $v \in \{1, -1, 0\}$  или  $\bar{v} = \langle \tau, 2n-1 \rangle$ ,  $\bar{v} = \langle v, 2n \rangle$  или  $\bar{v} = \langle \tau, 2n \rangle$ ,  $V$  – функция оценки  $J \bar{v} h$ ,  $\bar{v}$  – оценка правдоподобия гипотезы (внутренние истинностные значения),  $t$  – внешнее истинностное значение «истинно».

Уточненная абдуктивная схема выражает **синтез трех познавательных процедур** – эмпирической индукции (п.п.в.-1), аналогии (п.п.в.-2) и абдукции (принятие гипотез посред-

<sup>17</sup> Для предметных областей, содержащих факты  $J_{\langle 0, 0 \rangle} (C \Rightarrow_1 Q)$  формулируются АКП<sup>(0)</sup>.

ством объяснения  $B\Phi_0$ ). Этап II есть применение абдукции.

Отметим, что  $\Delta_{2n-1}$  и  $\Omega_{2n}^*$  порождены конструктивно посредством применения п.п.в.-1 и п.п.в.-2 к  $B\Phi_0$ , ее расширениям  $\overline{B\Phi}_n$  и автоматически порожденным фрагментам базы знаний  $\overline{B\Xi}_n$ . Истинностное значение гипотез  $\overline{V}$  также порождено конструктивно посредством п.п.в.-1 и п.п.в.-2.

Следующие утверждения являются итогом характеристики ДСМ-рассуждений.

1. П.п.в.-1 (индукция) и п.п.в.-2 (аналогия) являются правилами амплиативных выводов.

2. ДСМ-рассуждения содержат средства фальсифицируемости кандидатов в гипотезы (предикаты  $M_n^+$ ,  $M_n^-$  и  $(\pm)$  – гипотезы и  $(0)$  – гипотезы).

3. ДСМ-рассуждения являются синтезом индукции, аналогии и абдукции.

4.  $(\pm)$  – гипотезы о причинах являются аргументами в выводах по аналогии посредством п.п.в.-2.

5. Так как для ДСМ-рассуждений имеют место утверждения А1 – А9, то ДСМ-рассуждения являются КПЭ – рассуждениями. Это означает, что ДСМ-рассуждения являются логическим аппаратом для **КОГНИТИВНОГО** анализа данных в интеллектуальных системах.

Выше были определены шаг, такт и Этапы ДСМ-рассуждения. Определим также процесс ДСМ-рассуждения, являющийся компонентой ДСМ-метода АПГ.

Ранее была охарактеризована часть  $B\Phi^+$ , обозначаемая посредством  $\widehat{B\Phi}^+$  такая, что все ее факты имеют объяснение. Аналогичное имеет место и для  $\widehat{B\Phi}^-$ . Используя определение Этапа II ДСМ-рассуждения, определим теперь  $\widehat{B\Phi}^+$  следующим образом:

$$\widehat{B\Phi}^+ = \{ \langle X, Y \rangle \mid \exists V_1 \dots \exists V_k \exists W_1 \dots \exists W_k ((J_{(1,0)}(X \Rightarrow_1 Y) \rightarrow \exists m ( \& \bigwedge_{i=1}^k J_{(1,m)}(V_i \Rightarrow_2 W_i) \& (V_i \subset X) \& (V_i \neq \emptyset) \& (W_i \neq \emptyset) \& ( \bigcup_{i=1}^k W_i = Y))) \}$$

$\widehat{B\Phi}^+$  определяется при условии стабилизации ДСМ-рассуждения, что означает выполнение равенства  $\overline{B\Xi}_m = \overline{B\Xi}_{m+1}$ , которое равно-

сильно выполнимости равенств  $B\Xi_m^v = B\Xi_{m+1}^v$ , где  $v \in \{1, -1, 0\}$ .

Аналогично определим  $\widehat{B\Phi}^-$ .

Уточним теперь ранее введенные понятия степеней каузальной полноты  $\rho^+$  и  $\rho^-$ :

$$\rho^\sigma = \frac{|\widehat{B\Phi}^\sigma|}{|B\Phi^\sigma|}, \text{ где } \sigma \in \{+, -\}, \text{ а } |\widehat{B\Phi}^\sigma| \text{ и } |B\Phi^\sigma| -$$

числа элементов  $\widehat{B\Phi}^\sigma$  и  $B\Phi^\sigma$ , используя введенное выше определение  $\widehat{B\Phi}^\sigma$ .

Ранее был охарактеризован процесс расширения начальных состояний баз фактов  $B\Phi_0 \sqsubset B\Phi_1 \sqsubset \dots \sqsubset B\Phi_m$  при назначенных порогах  $(+)$  и  $(-)$  – степеней каузальной полноты  $\tilde{\rho}^+$  и  $\tilde{\rho}^-$ , соответственно.

Ранее был охарактеризован процесс расширения начальных состояний баз фактов  $B\Phi_0 \sqsubset B\Phi_1 \sqsubset \dots \sqsubset B\Phi_m$  при назначенных порогах  $(+)$  и  $(-)$  – степеней каузальной полноты  $\tilde{\rho}^+$  и  $\tilde{\rho}^-$ , соответственно.

$$\text{Если } \rho_m^+ = \frac{|\widehat{B\Phi}_m^+|}{|B\Phi_m^+|} \geq \tilde{\rho}^+, \rho_m^- = \frac{|\widehat{B\Phi}_m^-|}{|B\Phi_m^-|} \geq \tilde{\rho}^-$$

и  $\rho_0^+ \leq \rho_1^+ \leq \dots \leq \rho_m^+$ ,  $\rho_0^- \leq \rho_1^- \leq \dots \leq \rho_m^-$ , то будем говорить, что **процесс ДСМ-рассуждений имеет абдуктивную сходимость**; **процессом ДСМ-рассуждений** будем называть построение последовательности  $m$  – ных состояний  $S_m = \langle \Omega_{m+1}, \Delta_m \rangle$  или  $S_m = \langle \Delta_m, \Omega_{m-1} \rangle$  интеллектуальной системы типа ДСМ.

Разумеется, возможны лишь частичные  $\sigma$ -абдуктивные сходимости только для  $\sigma = +$  или  $\sigma = -$ .

Если существуют  $m$  и  $l$  такие, что  $\rho_m^+ \geq \tilde{\rho}^+$  и  $\rho_l^- \geq \tilde{\rho}^-$ , то порожденные гипотезы в заключительном такте ДСМ-рассуждения принимаются на **достаточном основании**.

Если существует абдуктивная сходимость процесса ДСМ-рассуждений только для  $B\Phi_i^+$  (или  $B\Phi_i^-$ ), то будем говорить, что  $(+)$  – гипотезы ( $(-)$  – гипотезы) принимаются на **квазидостаточном основании**, а процесс ДСМ-рассуждения имеет  $(+)$  – абдуктивную сходимость ( $(-)$  – абдуктивную сходимость). Таким

образом, процесс ДСМ-рассуждений имеет абдуктивную сходимость, если и только если он имеет (+) – и (–) – абдуктивную сходимость.

Существенно отметить, что расширения  $B\Phi_i^\sigma \sqsubset B\Phi_{i+2}^\sigma$  ( $\sigma \in \{+, -\}$ ) осуществляются так, что к  $(\sigma)$  – фактам в  $B\Phi_i^\sigma$ , не имеющих объяснений в  $B\Phi_{i+1}^\sigma$  добавляются новые  $(\sigma)$  – факты такие, что они имеют сходство с этими  $(\sigma)$  – фактами из  $B\Phi_i^\sigma$ .

Если при всех практически возможных расширениях  $B\Phi_0$  найдется  $i$  такое, что  $B\Phi_i^+ \sqsubset B\Phi_{i+2}^+$  и  $\rho_{i+2}^+ < \rho_i^+$ , то будем говорить, что имеет место (+) – **абдуктивная расходямость процесса ДСМ-рассуждений**. (аналогично определяется (–) – абдуктивная расходямость).

Процесс ДСМ-рассуждений является практической реализацией **Принципа XI (эволюционной эпистемологии решения задач в ИС)** и **Следствия 1 Принципов I - XI**, которое утверждает, что ИС должны быть человеко-машинными системами применимыми к открытым предметным областям.

Если  $\Delta_{2n-1}$  и  $\Omega_{2n}$  являются описаниями  $\overline{B\Xi}_{2n-1}$  и  $\overline{B\Phi}_{2n}$ , соответственно, таким, что выполняются:

1. условия стабилизации ДСМ-рассуждения
2. АКП<sup>(+)</sup> и АКП<sup>(-)</sup>,

то будем говорить, что ИС типа ДСМ является **совершенной**.

Выполнимость условий 1° и 2° означает, что результаты, полученные на Этапе II, порождены на достаточном основании без расширения  $B\Phi_0$  и осуществления процесса ДСМ-рассуждения.

Так как ДСМ-рассуждения являются правдоподобными рассуждениями, то существенно охарактеризовать процедурную семантику приписывания истинностных значений порождаемым гипотезам  $J\bar{v}h$ , где  $\bar{v} = \langle v, n \rangle$ ,  $n > 0$ , а

$$h = \begin{cases} C \Rightarrow_1 Q, \text{ если } J\bar{v}h \text{ порождена п.п.в. - 2} \\ C \Rightarrow_2 Q, \text{ если } J\bar{v}h \text{ порождена п.п.в. - 1} \end{cases}$$

Напомним, что  $v$  - типы внутренних (фактических) истинностных значений,  $\langle v, n \rangle$  - фактические истинностные значения ( $n \geq 0$ );  $t, f$  – внешние (логические) истинностные значения («истинно», «ложно») двузначной логики. Гипотезы  $J\bar{v}h$  являются результатом Этапа I

ДСМ-рассуждения. В силу определения  $J$ -операторов  $J\bar{v}h = \begin{cases} t, \text{ если } V[h] = \bar{v} \\ f, \text{ если } V[h] \neq \bar{v} \end{cases}$ , где  $V[h]$  – функция оценки.

Однако возникает вопрос оценки гипотез после применения Этапа II: какова оценка  $J\bar{v}h$ , если  $J\bar{v}h$  приняты при выполнимости  $\overline{E}(\Lambda, X)$  в абдуктивной схеме Ч.С. Пирса; и если  $J\bar{v}h$  не приняты при невыполнимости  $\overline{E}(\Lambda, X)$ ? Это означает, что существуют  $\Delta_{2n-1}$  и  $\Omega_0$  такие, что  $\overline{E}(\Delta_{2n-1}, \Omega_0)$  истинное или ложное высказывание метаязыка ДСМ-рассуждений.

В случае истинности АКП<sup>(+)</sup>&АКП<sup>(-)</sup>  $\overline{E}(\Delta_{2n-1}, \Omega_0)$  истинно, так как имеет место  $((\text{АКП}^{(+)} \& \text{АКП}^{(-)}) \rightarrow \overline{E}(\Delta_{2n-1}, \Omega_0))$  (аналогичное имеет место для  $(\text{АКП}^{(\sigma)} \rightarrow \overline{E}^\sigma(\Delta_{2n-1}, \Omega_0))$ , где  $\sigma \in \{+, -\}$ ).

В случае выполнимости АКП<sup>(+)</sup>& АКП<sup>(-)</sup> степени каузальной полноты  $\tilde{\rho}^\sigma = 1$ , где  $\sigma \in \{+, -\}$ . Тогда положим, что  $V[J\bar{v}h] = \langle t, 1 \rangle$ , где  $\langle t, 1 \rangle$  – оценка АКП<sup>(\sigma)</sup>. Соответственно, положим  $J\bar{v}h \in \Delta_{2n-1} \cup \Omega_{2n}$   $V[J\bar{v}h] = \langle t, 1 \rangle$ , заменив  $t$  на  $\langle t, 1 \rangle$ .

Рассмотрим далее процесс ДСМ-рассуждений. Пусть имеет место абдуктивная сходимость. Следовательно, существуют  $m$  и  $l$  такие, что:  $\rho_m^+ \geq \tilde{\rho}^+$  и  $\rho_l^- \geq \tilde{\rho}^-$ . Тогда определим функцию оценки  $\tilde{V}$  такую, что

$$\tilde{V}[\text{АКП}^{(+)}] = \begin{cases} \langle t, \rho_m^+ \rangle, \text{ если } \rho_m^+ \geq \tilde{\rho}^+ \\ \langle f, \rho_m^+ \rangle, \text{ если } \rho_m^+ < \tilde{\rho}^+ \end{cases}$$

$$\tilde{V}[\text{АКП}^{(-)}] = \begin{cases} \langle t, \rho_l^- \rangle, \text{ если } \rho_l^- \geq \tilde{\rho}^- \\ \langle f, \rho_l^- \rangle, \text{ если } \rho_l^- < \tilde{\rho}^- \end{cases}$$

Соответственно для  $J\bar{v}h$  определим  $V[J\bar{v}h]$  следующим образом:

$$\tilde{V}[J_{\langle 1, s \rangle} h] = \begin{cases} \langle t, \rho_m^+ \rangle, \text{ если } \rho_m^+ \geq \tilde{\rho}^+ \\ \langle f, \rho_m^+ \rangle, \text{ если } \rho_m^+ < \tilde{\rho}^+ \end{cases}$$

$$\tilde{V}[J_{\langle -1, s \rangle} h] = \begin{cases} \langle t, \rho_l^- \rangle, \text{ если } \rho_l^- \geq \tilde{\rho}^- \\ \langle f, \rho_l^- \rangle, \text{ если } \rho_l^- < \tilde{\rho}^- \end{cases}$$

Таким образом, относительно процесса ДСМ-рассуждений осуществим **пересмотр** истинностных значений  $t$  на  $\langle t, \rho \rangle$  или  $\langle f, \rho \rangle$ , где  $\rho$  - степень каузальной полноты, выражающая абдуктивную сходимую или расходимость<sup>18</sup>.

Рассмотрим ранее определенные  $\tilde{B}\tilde{\Phi}^+$  и  $\tilde{B}\tilde{\Phi}^-$ , которым соответствуют их описания  $\tilde{\Omega}^+$  и  $\tilde{\Omega}^-$ , а также  $B\Phi^+ = \{\langle X, Y \rangle | J_{\langle 1, 0 \rangle}(X \Rightarrow_1 Y)\}$  и  $B\Phi^- = \{\langle X, Y \rangle | J_{\langle -1, 0 \rangle}(X \Rightarrow_1 Y)\}$  и соответствующие

им  $\rho^\sigma = \frac{|\tilde{B}\tilde{\Phi}^\sigma|}{|B\Phi^\sigma|}$ , где  $\sigma \in \{+, -\}$  (очевидно, что

$$\rho^\sigma = \frac{|\tilde{\Omega}^\sigma|}{|\Omega_0^\sigma|}.$$

Пусть  $\tilde{\rho}^\sigma \leq \rho^\sigma < 1$ , где  $\sigma \in \{+, -\}$ , тогда имеет место аналог **Утверждения (\*)**

**Утверждение (\*\*).** Если  $\tilde{V} [AKP^{(\sigma)}] = \langle t, \tilde{\rho}^\sigma \rangle$ , то  $\bar{E}^\sigma(\tilde{\Delta}_{2n-1}^\sigma, \tilde{\Omega}_0^\sigma)$ , где  $\sigma \in \{+, -\}$ ,  $\tilde{\Delta}_{2n-1}^\sigma \subseteq \Delta_{2n-1}^\sigma$ ,  $\tilde{\Omega}_0^\sigma \subseteq \Omega_0^\sigma$ , а  $\tilde{\Delta}_{2n-1}^\sigma$  - множество тех и только тех гипотез о  $\sigma$ -причинах, которые объясняют  $\tilde{\Omega}_0^\sigma$ .

В соответствии с **Утверждением (\*\*)** абдуктивная схема Ч.С. Пирса может быть уточнена следующим образом:

$\Omega_0$  - множество фактов,  $\tilde{\Omega}_0 \subseteq \Omega_0$

$\Delta_{2n-1} \cup \Omega_{2n}$  - множество гипотез

$\tilde{\Delta}_{2n-1} \subseteq \Delta_{2n-1}$ ,  $\tilde{\Omega}_{2n} \subseteq \Omega_{2n}$

$\bar{E}(\tilde{\Delta}_{2n-1}, \tilde{\Omega}_0), \Delta_{2n-1} = \Delta_{2n+1}$

$\forall h((J\bar{v} h \in \tilde{\Delta}_{2n-1} \cup \tilde{\Omega}_{2n}) \rightarrow$

$(V[J\bar{v} h] = \langle t, \tilde{\rho}^+ \rangle \vee (V[J\bar{v} h] = \langle t, \tilde{\rho}^- \rangle)))$ ,

где  $\tilde{\Omega}_{2n}$  - множество тех и только тех гипотез,

которые порождены посредством  $\tilde{\Delta}_{2n-1}$  п.п.в. - 2 (аналогией).

ДСМ-рассуждение (Этапы I и II) могут быть представлены посредством следующей схемы обобщенного немонотонного вывода [40]:

$\Omega_0: AKP^{(+)} \& AKP^{(-)} \& (\Delta_{2n-1} = \Delta_{2n+1}),$

$\Delta_{2n-1} \cup \Omega_{2n}^*$

где  $\Omega_0$  - посылки (описание  $B\Phi_0$ ),  $\Omega_{2n-1} \cup \Omega_{2n}^*$  - множество следствий (гипотез), а  $AKP^{(+)} \& AKP^{(-)} \& (\Delta_{2n-1} = \Delta_{2n+1})$  - условие, при выполнении которого выводимы следствия из  $\Delta_{2n-1} \cup \Omega_{2n}^*$ .

Процесс ДСМ-рассуждения может быть представлен посредством следующей схемы обобщенного немонотонного вывода:

$\Omega_{0,m}: \tilde{V} [AKP^{(\sigma)}] = \langle t, \tilde{\rho}^\sigma \rangle \& (\Delta_{2n-1} = \Delta_{2n+1}),$

$\tilde{\Delta}_{2n-1}^\sigma \cup \tilde{\Omega}_{2n}^\sigma$

где  $\sigma \in \{+, -\}$ ,  $\tilde{\Delta}_{2n-1}^\sigma \subseteq \Delta_{2n-1}^\sigma$ ,  $\tilde{\Omega}_{2n}^\sigma \subseteq \Omega_{2n}^\sigma$ , а  $\Omega_{0,m}$  - база фактов при  $m$ -том пополнении таком, что  $\rho_m^\sigma \geq \tilde{\rho}^\sigma$ ,  $\sigma \in \{+, -\}$ .

Заметим, что возможно определить более информативную оценку  $AKP^{(\sigma)}$ , если положить, что  $\tilde{V} [AKP^{(\sigma)}] = \langle t, \tilde{\rho}^\sigma, 2n \rangle$  или  $\tilde{V} [AKP^{(\sigma)}] = \langle f, \tilde{\rho}^\sigma, 2n \rangle$ , где  $2n$  - номер последнего шага применения п.п.в.-2.

Следует обратить внимание на **динамический** и **конструктивный** способ порождения истинностных значений гипотез  $J\bar{v} h$  на каждом из этапов ДСМ-рассуждения. На Этапе I  $\bar{V} = \langle v, n \rangle$ , где  $n > 0$ , порождаются посредством п.п.в.-1 и п.п.в.-2, а параметр  $n$  выражает число применений этих правил (степень правдоподобия гипотез). На Этапе II и в процессе ДСМ-рассуждений порождаются истинностные значения  $\langle t, \rho \rangle$  и  $\langle f, \rho \rangle$ , где параметр  $\rho$  выражает степень каузальной полноты, соответствующий  $AKP^{(\sigma)}$  и также определяется конструктивно. Конструктивность порождения истинностных значений в ДСМ-методе АПГ отличает ДСМ-рассуждения от рассуждений в нечетких логиках, в которых истинностные значения зависят от априорно заданных  $\mu$ -функций принадлежности.

Охарактеризуем теперь ИС типа ДСМ следующим образом: Рассуждатель, реализующий ДСМ-рассуждения, применяется к  $\Sigma \cup B\Phi_0$ :

Рассуждатель  $(\Sigma \cup B\Phi_0) = \Delta_{2n-1} \cup \Omega_{2n}^*$ , где  $\Delta_{2n-1} = \Delta_{2n+1}$ , а  $\Sigma$  - множество аксиом базы знаний (аксиомы предметной области, аксиомы струк-

<sup>18</sup> Логика с пересматриваемыми истинностными значениями подробно рассмотрены в [38] (см. также [19]).

туры данных и АКП<sup>(σ)</sup>,  $\sigma \in \{+, -\}$ ), а также декларативное представление п.п.в.-1 и п.п.в.-2, используемое для дедуктивной имитации ДСМ-рассуждений [20, 16]).

Обозначим посредством  $\Omega_{2n}^*$  гипотезы, представляющие предикат  $X \Rightarrow_1 Y$ , которые получены на последнем шаге применения п.п.в.-2:  $\Omega_{2n}^* = \Omega_{2n}^+ \cup \Omega_{2n}^- \cup \Omega_{2n}^0 \cup \Omega_{2n}^t$ , т.е.  $\Omega_{2n}^* = \Omega_{2n} \setminus \Omega_0$  (описания без начального  $\Omega_0$  – описания начального состояния БФ).

БЗ ИС типа ДСМ есть следующее упорядоченное множество:

$BZ = \langle \Sigma, \Delta_{2n-1} \cup \Omega_{2n}^*, \Gamma, C \rangle$ , где  $\Delta_{2n-1} = \Delta_{2n+1}$ ,  $\Gamma$  – множество правил, содержащих п.п.в.-1 (индукцию), п.п.в.-2 (аналогию), схемы абдуктивного объяснения БФ<sub>0</sub> (абдукцию), а  $C$  – множество имеющихся вычислительных процедур<sup>19</sup>, реализуемых Вычислителем, который является подсистемой Решателя задач ИС типа ДСМ.

Важным обстоятельством является возможность модификации и усиления правил правдоподобного вывода КПЭ-рассуждений ДСМ-метода АПГ, использование которых осуществляется в различных стратегиях ДСМ-метода (некоторые из них охарактеризованы в Приложении II). Выбор стратегий, адекватных исследуемой предметной области, осуществляется посредством препроцессинга в экспериментальном режиме ИС, являющейся человеко-машинной системой.

ИС типа ДСМ, реализующие ДСМ-метод АПГ, автоматизируют ДСМ-эвристику – «индукция + аналогия + абдукция». Эта эвристика является примером класса эвристик – «сходство – предсказание – объяснение БФ»<sup>20</sup>.

ДСМ-эвристика, осуществляемая посредством ДСМ-метода АПГ, автоматизируется посредством интеллектуальных систем типа ДСМ. ДСМ-системы имеют архитектуру, рассмотренную выше:

ИС=Решатель задач + информационная среда + комфортный интерфейс, где информационная среда есть база знаний (БЗ) и база фактов (БФ), охарактеризованные выше, а Решатель задач содержит Рассуждатель, реализующий такты ДСМ-рассуждений и процесс ДСМ-рассуждений, что предполагает интерактивный режим работы человеко-машинной ДСМ-системы. Результатом работы ДСМ-системы, как было рассмотрено выше, является интеллектуальный анализ данных (порождение гипотез о причинно-следственных зависимостях и автоматическое расширение БЗ) и предсказание наличия (отсутствия) эффектов у объектов (субъектов в ИС для социологии и криминалистики), имеющих в БФ оценки «неопределенно».

Так как ДСМ-системы реализуют посредством индукции (п.п.в.-1) принцип «сходство фактов влечет наличие (отсутствия) изучаемых эффектов и их повторяемость», то ДСМ-метод является логико-комбинаторным средством машинного обучения.

Так как ДСМ-системы реализуют КПЭ-рассуждения, характеризуемые Утверждениями А1 – А9, и Принципы интеллектуального анализа данных I – XI, то ДСМ-системы являются интеллектуальными системами, имитирующими и усиливающими некоторые из способностей (1) – (13), представляющие феноменологию естественного интеллекта. В силу сказанного ДСМ-системы являются инструментальным средством поддержки научных исследований, анализа медицинских данных, а также средством интеллектуализации роботов.

Так как ДСМ-системы удовлетворяют **Принципу VIII (инвариантности структуры Рассуждателя относительно варьированности предметных областей и структур данных)**, то они применимы для различных предметных областей таких, что выполняются условия применимости ДСМ-метода АПГ. ДСМ-системы имеют «ядро», реализуемое Рассуждателем, и «настройку» на предметную область (структура данных, аксиомы предметной области, вычислительные процедуры).

Разнообразие предметных областей, к которым применимы ДСМ-системы, является экспериментальным оправданием ДСМ-метода

<sup>19</sup> В работе [42] описана гибридная интегрированная интеллектуальная система типа ДСМ, содержащая квантовохимические методы и статистические методы анализа данных.

<sup>20</sup> В [41] предложена эвристика «алгебра логики + аналогия + абдукция», являющаяся модификацией ДСМ-эвристики посредством замены индукции на процедуры алгебры логики. Эта эвристика используется для анализа социологических данных.

АПГ. Предметными областями, для которых были созданы интеллектуальные системы типа ДСМ, являются фармакология, медицинская диагностика, социология, криминалистика и роботы с адаптивным поведением.

Первыми интеллектуальными системами, которые содержали Решатели задач, осуществляющие ДСМ-метод АПГ, были ДСМ-системы для прогнозирования биологически активных химических соединений [29]. Эти системы в качестве БФ имеют представление предиката  $X \Rightarrow_1 Y$ , где значением  $X$  является описание структуры химических соединений, а значениями  $Y$  является информация о биологической активности соединения  $X$ . На Этапе I посредством п.п.в.-1 (индукции) порождаются гипотезы типа «подструктура химического соединения является причиной наличия (отсутствия) биологической активности  $W$ ». Таким образом порождается предикат  $V \Rightarrow_2 W$ , образующий фрагмент БЗ. Эти фрагменты базы знаний имеют вид  $BZ_n^v = \{\langle V, W \rangle \mid J_{(v, 2n-1)}(V \Rightarrow_2 W)\}$ , где  $v \in \{1, -1, 0\}$ , а  $n \geq 1$ . Элемент  $V$  пары  $\langle V, W \rangle$  называется **фармакофором** биологической активности  $W$ , если  $v=1$ ;  $V$  называется **антифармакофором**, если  $v = -1$ .

Посредством п.п.в.-2 (аналогии) на Этапе I порождаются расширения начального состояния БФ<sub>0</sub>  $B\Phi_n^v = \{\langle V, W \rangle \mid J_{(v, 2n)}(V \Rightarrow_1 W)\}$ , где  $v \in \{1, -1, 0\}$ , а  $n \geq 1$ . БФ<sub>n</sub><sup>v</sup> также являются порождаемыми фрагментами базы знаний, состоящей из множества фармакофоров и антифармакофоров и предсказаний о наличии (отсутствии) соответствующих биологических активностей у химических соединений из БФ<sub>0</sub> (отметим, что в БФ<sub>0</sub> имеются примеры фактов с оценкой «неопределенно»).

Таким образом, в результате работы ДСМ-системы порождаются гипотезы – фармакофоры (фрагменты химической структуры, ответственные за проявление биологической активности) и гипотезы – антифармакофоры, представляющие фрагменты химической структуры, наличие которых приводит к отсутствию биологической активности у данного химического соединения. Посредством гипотез фармакофоров и гипотез антифармакофоров предсказывается биологическая активность химических соединений, предложенных на прогноз. Таким

образом, ДСМ-рассуждения являются КПЭ-рассуждениями, порождающими новое знание с использованием БФ<sub>0</sub> и процедур машинного обучения.

Экспериментальная проверка эффективности предсказаний биологических активностей химических соединений посредством ДСМ-метода АПГ проводилась на массивах химических соединений одного ряда, либо соединений, принадлежащих к разным химическим классам<sup>21</sup>. Было исследовано около 5000 химических соединений, обладающих противоопухолевой, психотропной, антибактериальной, антилепрозной, канцерогенной, мутагенной и токсичной активностью. Результаты полученных прогнозов посредством ДСМ-систем подтверждены биологическими испытаниями на животных. На основании выделенных фармакофоров и антифармакофоров, порожденных ДСМ-системой, синтезированы и испытаны: 3 соединения с высокой антилепрозной активностью, 3 соединения – ингибиторы холинэстеразы, 2 соединения с антибактериальной активностью.

В 2001 году в рамках Общеввропейской конференции по машинному обучению и открытию закономерностей во Фрайбурге (Германия) на Симпозиуме по предсказательной токсикологии ДСМ-система была признана оптимальной в ходе соревнований по предсказанию токсичности предложенного массива химических соединений (по результатам соревнований компьютерных программ ДСМ-система заняла первое место с учетом верно и неверно предсказанных токсичных соединений) [13].

Экспериментально установлено, что для различных предметных областей ДСМ-метод АПГ имеет высокую точность предсказаний в силу наличия средств фальсификации порождаемых гипотез посредством  $M^+$  и  $M^-$  предикатов, гипотез вида  $J_{(0, n)}(C \Rightarrow_2 Q)$ , а также посредством Этапа 2 ДСМ-рассуждения – абдуктивного принятия гипотез.

Для анализа данных о непрямах канцерогенах и хронической токсичности химических со-

<sup>21</sup> Разработка интеллектуальных систем типа ДСМ для фармакологии проводится в ВИНТИ РАН с начала 80-х годов.

единений и порождения соответствующих прогнозов потребовалось развитие ДСМ-метода АПГ – настройка ДСМ-систем на предметную область (представление знаний, добавление вычислительных процедур в Решателе задач, введение числовых параметров). Настройка ДСМ-системы на предметную область состояла в учете метаболизма веществ в организме, вида животных (для прогноза канцерогенности), вводимой дозы вещества и количественной оценки биологической активности. Для решения задач прогнозирования токсичности и канцерогенности были созданы специальные варианты ДСМ-системы [29, 42 – 45].

В [46] была создана экспериментальная версия ДСМ-системы, имитирующая биотрансформации (для некоторых типов реакций) с использованием базы знаний для необходимых условий биотрансформации. ДСМ-система посредством п.п.в.-1 (индукции) способна порождать достаточные условия биотрансформации, а посредством п.п.в.-2 (аналогии) способна порождать гипотезы о метаболизируемости химических соединений, из которых специальная программа, использующая достаточные условия биотрансформации, порождает метаболиты [29, часть 2], являющиеся гипотезами ДСМ-системы.

В ВИНТИ РАН была создана гибридная интегрированная интеллектуальная система с Решателем задач, содержащим ДСМ-Рассуждатель и Вычислитель, реализующий процедуры регрессиального анализа и квантово-химические расчеты [44, 45]. Созданная ДСМ-система предназначена для прогнозирования биологической активности химических соединений (в том числе, токсичности и канцерогенности). Гибридность системы обусловлена тем, что в БФ содержатся представления химических соединений, имеющие как структурные характеристики, так и числовые параметры. Числовые параметры используются в Вычислителе для установления одной из компонент сходства химических соединений, вторая компонента определяется Рассуждателем для структурных характеристик химического соединения. Комбинирование работы Рассуждателя и Вычислителя характеризует эту ДСМ-систему как интеллектуальную интегрированную систему.

Таким образом, для анализа наличия и степени канцерогенности, а также для установления класса опасности по хронической токсичности была создана версия интеллектуальной ДСМ-системы, в которой в БФ содержатся гибридные объекты, состоящие из структур химических соединений и числовых параметров, характеризующих физико-химические свойства изучаемых веществ. Существует ряд задач, в которых структурная формула химического соединения не определяет однозначно проявления исследуемых свойств. Таковыми, например, являются задачи прогнозирования не прямых канцерогенов<sup>22</sup> и хронической токсичности веществ, где их действие определяется способностью к биоактивации в организме и реакционной способностью образующихся метаболитов в реакциях взаимодействия с ДНК. В ДСМ-системе Вычислитель осуществляет квантово-химический расчет электронных параметров, характеризующих скорость метаболизма данных веществ под действием цитохрома Р-450. Вычислитель определяет устойчивые метаболиты, а затем рассчитывает их электронные параметры, которые характеризуют их реакционную способность в реакциях с биомолекулами (т.е. осуществляется расчет минимальных значений энтальпии активации реакции образования радикалов). Созданная версия гибридной интегрированной интеллектуальной ДСМ-системы была проверена на массиве галоидозамещенных алифатических алканов и алкенов.

Другим важным классом задач, решаемых ДСМ-системами, являются задачи медицинской диагностики по клиническим данным [29, часть 3]. В ВИНТИ РАН были созданы три версии ДСМ-систем для задач медицинской диагностики. Была создана ДСМ-система для прогнозирования высокопатогенных типов вируса папилломы человека по цитологическим результатам исследования мазков (ДСМ-система была разработана и применена совместно с Кафедрой клинической и лабораторной диагностики Российской Медицинской Академии последипломного образования). В содружестве с Лабораторией клинической физиоло-

<sup>22</sup> Химическое соединение называется непрямым канцерогеном, если свойство канцерогенности вызывается его метаболитами, а не им самим.

гии зрения МНИИ глазных болезней им. Гельмгольца была разработана ДСМ-система диагностики двух заболеваний глаз: дегенеративного ретиношизеса и наследственных витреоретинальных дистрофий. Совместно с Отделением нефрологии Городской клинической больницы им. Боткина была создана ДСМ-система для диагностики системной красной волчанки.

Интеллектуальные системы типа ДСМ являются эффективным средством поддержки научных исследований, что подтверждается успешной защитой ряда кандидатских диссертаций, в которых в качестве средства интеллектуального анализа данных использовались ДСМ-системы, реализующие ДСМ-метод АПГ.

ДСМ-система была использована в кандидатской диссертации И.Г. Цидаевой «Критерии цитологической диагностики онкогенных типов вируса папилломы человека» [47]. ДСМ-система была использована также в кандидатской диссертации Е.В. Захаровой «Прогнозирование исходов системной красной волчанки и системных васкулитов с экстраренальными и почечными проявлениями» [48]. В кандидатской диссертации В.В. Решетниковой «Информационная система по противоопухолевым препаратам ГУ РОНЦ им. Н.Н. Блохина РАМН» ДСМ-система была использована для прогнозирования противоопухолевой активности химических соединений [49]. И, наконец, в кандидатской диссертации А.С. Шундеева «Логико-языковые средства автоматизации производственных процессов» [50] автор создал программную реализацию ДСМ-метода АПГ и использовал ее для автоматической классификации структур двухфазных сплавов.

Выше было упомянуто применение ДСМ-систем в социологии [33, 41]. ДСМ-метод АПГ позволяет решать следующие задачи интеллектуального анализа социологических данных: порождение детерминант социального поведения (действий, установок, мнений), использование порожденных детерминант для создания типологии индивидуального поведения; формальное определение мнений и их прогнозирование, распознавание степени рациональности мнений.

Решение указанных задач означает, что ДСМ-метод АПГ является средством формализованного качественного анализа социологических данных [51–53], востребованного современным состоянием социологических исследований [54]. Так как ДСМ-системы, применяемые для интеллектуального анализа социологических данных, способны порождать зависимости причинно-следственного типа, то ДСМ-метод открывает возможности развития когнитивной социологии – применению интеллектуального анализа данных (knowledge discovery) к проблемам социологии.

Интересным применением ДСМ-систем для интеллектуального анализа криминалистических данных является решение задач судебно – почерковедческой экспертизы [55]. Посредством модифицированного ДСМ-метода АПГ, соответствующего изучаемой предметной области, решаются две задачи почерковедческой экспертизы – идентификационная и атрибутивно-диагностическая. Идентификационная задача состоит в определении исполнителя рукописи или в установлении того, действительно ли рукопись исполнена тем лицом, чьим именем она подписана. Атрибутивно-диагностическая задача состоит в установлении по почерку определенных свойств личности таких как – пол, возраст, психофизических свойств.

Указанные задачи обычно решаются статистическими методами. Однако, рассматриваемая сложная предметная область, которой является «человек – почерк – рукопись», оказалась адекватной для применимости ДСМ-метода АПГ, который порождает детерминанты, содержащие факторы для установления изучаемых эффектов<sup>23</sup>.

Важным приложением ДСМ-метода АПГ является его использование для создания интеллектуальных роботов [31]. В рамках проекта «Адаптант – 2005» был создан мобильный мини-робот, реализующий динамическую версию ДСМ-метода в целях адаптации поведения (движения) для выбора соответствующей траектории посредством индуктивного поведения.

<sup>23</sup> Создаваемый подход к анализу криминалистических данных осуществляется совместно со специалистами Московского Университета МВД.

Применение методов искусственного интеллекта является необходимым условием создания интеллектуальных роботов, имитирующих способности естественного интеллекта (1) – (13) для принятия решений с использованием КПЭ-рассуждений, которые содержат индуктивные выводы и осуществляют синтез познавательных процедур (**Принцип V ИАД в расширяемой БФ**). В силу сказанного ДСМ-метод АПГ является когнитивным инструментом для создания интеллектуальных роботов, осуществляющих процесс ДСМ-рассуждений, определенный как продолжение этапов ДСМ-рассуждений, включающих абдуктивную сходимость относительно изменений БФ, образуемой сенсорными устройствами робота.

#### 4. Об интеллектуализации информационных систем

В настоящее время активно развиваются большие информационно-вычислительные системы поддержки научных исследований, использующие GRID-технологии и WEB-технологии. В рамках Программы фундаментальных исследований Президиума РАН «Разработка фундаментальных основ создания научной распределенной информационно-вычислительной среды на основе технологий GRID» по направлению «Электронная Земля: научные информационные ресурсы, информационно-коммуникационные технологии, информационное обслуживание, взаимодействие с национальными и международными системами» [56 – 58]<sup>24</sup>.

Основной целью проекта «Электронная Земля» является создание современных информационных технологий для решения комплексных информационно-аналитических задач в области наук о Земле с использованием сетевых распределенных вычислительных систем. Среди задач, решаемых в этом проекте, имеются задачи прогнозирования чрезвычайных ситуаций в сейсмоопасных зонах, а также задачи прогнозирования

залежей полезных ископаемых. Для решения этих задач требуется объединение разнородных данных (например, плотность населения, геофизические данные региона, геологические данные, географическое положение региона и т.д.). Это означает, что прогнозирование изучаемых эффектов осуществляется с использованием множества разнородных факторов (геолого-геохимических, тектонических и т.д.).

В проекте «Электронная Земля» создается целостное интегральное информационное поле пользователя, которое состоит из совокупности инструментальных средств, аналитических методов и геоданных, необходимых для проведения прикладных и фундаментальных исследований в науках о Земле [58]. В настоящее время создана многопользовательская распределенная геоинформационная информационно-аналитическая среда. Эта среда содержит аналитические методы, геоинформационные системы, средства информационного поиска и представления знаний, распределенную систему баз геоданных, используемую для аналитической обработки и базы документальной информации [57].

Важной особенностью создаваемой информационно-вычислительной системы является интеграция информационных, аналитических и системных ресурсов в сочетании с возможностью создания для каждого пользователя его персонализированного интегрального информационного поля, которая обеспечивает качественно новый уровень исследований в науках о Земле [58].

Инструментальные средства проекта «Электронная Земля» содержат, в частности: средства перехода от информационных данных к геоданным и аналитическим методам, средства персонализации результатов информационного поиска, средства преобразования геоданных, средства запуска и контроля выполнения расчетной задачи в GRID-системе.

При решении задач прогнозирования в компьютерных системах естественно использовать процедуры индукции. В [56] приводится пример решения задачи нахождения многомерной связи между наличием золоторудных месторождений Курило-Камчатского вулканического пояса и свойствами геологической среды с по-

<sup>24</sup> Проект «Электронная Земля» осуществляется Всероссийским институтом научной и технической информации РАН, Институтом проблем передачи информации РАН, Институтом системного анализа РАН и Институтом геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН.

следующим использованием найденной эмпирической зависимости для прогноза новых золоторудных месторождений. Заметим, что строение рассуждений для решения этой задачи подобно Этапу I ДСМ-рассуждений, образованного последовательным применением индукции (п.п.в.-1) и аналогии (п.п.в.-2), используемой для предсказания наличия (отсутствия) эффектов, представленных в БФ.

Отметим, что в проекте «Электронная Земля» требуется информативное представление знаний (т.е. БЗ) и представление фактов (т.е. БФ), к которым применяются вычислительные процедуры и логические процедуры (например, индукция и другие средства порождения и оправдания гипотез). В [56] отмечена необходимость дальнейшего развития аналитических технологий и инфраструктуры проекта. Можно предположить, что одним из аспектов такого развития является использование идей искусственного интеллекта и технологий интеллектуальных систем (например, ДСМ-систем).

Заметим, что история развития искусственного интеллекта знает целый ряд компьютерных систем, применяемых в геологии. Среди них наиболее известна экспертная система PROSPECTOR [59, стр. 113] (эта система предсказала обширные залежи молибдена в штате Вашингтон).

В связи со сказанным выше охарактеризуем идею интеллектуализации информационно-вычислительных систем. Под **интеллектуализацией информационно-вычислительных систем** будем понимать применение средств искусственного интеллекта (представление знаний и данных с целью извлечения нового знания и применение автоматизированных рассуждений для порождения гипотез), а также включение интеллектуальных систем в архитектуру информационно-вычислительных систем в качестве их подсистем.

В случае выполнимости условий применимости ДСМ-метода АПГ имеет место следующий

**Тезис о наименьшем «шуме» при порождении гипотез о зависимостях причинно-следственного типа:** при применении к БФ ДСМ-метод АПГ имеет наименьшее количество ошибок по сравнению с известными методами порождения гипотез.

Этот тезис подтверждается многими экспериментами с ДСМ-системами (для различных предметных областей), а также содержащейся в ДСМ-методе формализации фальсификации порождаемых кандидатов в гипотезы: наличие  $M^+$  - и  $M^-$  - предикатов, порождение фактических противоречий как фальсификаторов, принятие гипотез посредством абдуктивного объяснения БФ.

В силу гибридности данных в проекте «Электронная Земля» и необходимости комбинирования вычислительных и логических процедур естественно предположить, что в этом проекте возможно применение гибридных интегрированных интеллектуальных ДСМ-систем с Решателем задач, содержащим Рассуждатель и Вычислитель (аналогично ДСМ-системе в [40, 42]).

## Заключение

С развитием архитектуры компьютеров и средств программирования естественно возрастает потребность расширения сферы их применения [59], но это означает, что кроме вычислительных средств необходимо совершенствовать логические средства имитации рассуждений. Проекты развития когнитивных средств извлечения нового знания (подобные японскому проекту компьютеров 5-го поколения [59]) не теряют своей актуальности. Идеи ИИ и их воплощение в интеллектуальных системах являются необходимым средством интеллектуализации компьютерных систем и увеличения их практической эффективности.<sup>25</sup>

## Литература

1. Мендельсон Э. Введение в математическую логику. Наука, М., 1978.
2. Колмогоров А.Н., Драгалин А.Г. Введение в математическую логику. Издательство Московского Университета, 1982.
3. Чень Ч., Ли Р. Математическая логика и автоматическое доказательство теорем. М., Наука, 1983.

<sup>25</sup> Статья выполнена в рамках Программы фундаментальных исследований Президиума РАН, проект № 222 «Разработка формализованной эвристики «сходство – аналогия – абдукция» и ее применение для интеллектуального анализа данных,

4. Метакидис Г., Нероуд А. Принципы логики и логического программирования. М., Факториал, 1998.
5. Пойа Д. Математика и правдоподобные рассуждения. М., Наука, 1975.
6. Люгер Д.Ф. Искусственный интеллект. М. – Спб. – Киев, Вильямс, 2003; 8.1 Абдуктивный вывод, основанный на логике, стр. 325-340.
7. Финн В.К. Синтез познавательных процедур и проблема индукции. НТИ, сер. 2, №102, 1999, стр. 8-45.
8. Zadeh L.A. Fuzzy Sets. Information and control, Vol. 8, 1965, pp. 338-353.
9. Бочвар Д.А. Об одном трехзначном исчислении и его применении к анализу парадоксов классического расширенного функционального исчисления. Математический сборник. Т.4 (46): 2, 1938, стр. 287-308.
10. Поппер К.Р. Эволюционная эпистемология. В кн.: Эволюционная эпистемология и логика социальных наук. М., Эдиториал УРСС, 2000, стр. 57-74.
11. Fayyad I.M., Piatetsky-Shapiro G., Smyth P., Uthurusamy R. Advances in Knowledge Discovery and Data Mining. The AAAI Press, 1996.
12. Искусственный интеллект: применение в химии. М., Мир, 1988.
13. Blinova V.G., Dobrynin D.A., Finn V.K., Kuznetsov S.O., Pankratova E.S. Toxicology analysis by means of the JSM-method. Bioinformatics, Vol.19, №10, 2003, pp. 1201-1207.
14. Добрынин Д.А., Зуева М.А., Панкратова Е.С., Цапенко И.В. Интеллектуальная ДСМ-система для диагностики заболеваний зрения. Труды II международной конференции «Системный анализ и информационные технологии (САИТ-2007)». Т.1, М., URSS, стр. 156-159.
15. Автоматическое порождение гипотез в интеллектуальных системах. М., ЛКИ, 2008 (в печати).
16. ДСМ-метод порождения гипотез: логические и эпистемологические основания. М., ЛКИ, 2008 (в печати).
17. Тарский А. Понятие истины в языках дедуктивных наук. В кн.: Философия и логика Львовско-Варшавской школы. М., РОССПЭН, 1999, стр. 19-177.
18. Поппер К.Р. Объективное знание. М., УРСС, 2002, глава 9. Философские комментарии к теории истины Тарского, стр. 301-319.
19. Вагин В.Н., Головина Е.Ю., Загорянская А.А., Фомина М.В. Достоверный и правдоподобный вывод в интеллектуальных системах. М., Физматлит, 2004.
20. Аншаков О.М., Финн В.К., Скворцов Д.П. Логические средства экспертных систем типа ДСМ. Семиотика и информатика. Вып. 28, 1986, стр. 65-101.
21. Забейло М.И., Ивашко В.Г., Кузнецов С.О., Михеенкова М.А., Хазановский К.П., Аншаков О.М. Алгоритмические и программные средства ДСМ-метода автоматического порождения гипотез. НТИ, сер.2, №10, 1987, стр. 1-14.
22. Гемпель К.Г. Логика объяснения. Дом интеллектуальной книги. М., 1998.
23. Abductive Inference: Computation, Philosophy, Technology. Ed. de J.R. Josephson, S.G. Josephson. Cambridge Univ. Press, 1994.
24. Jain S., Osherson D., Royer J.S., Sharma A. Systems That Learn/ The MIT Press, Cambridge, Mass., London, England, 1999.
25. Рейнгольд Ю., Нивергельт Н., Део Н. Комбинаторные алгоритмы. М., Мир, 1980.
26. Макаров И.М., Лохин В.М., Манько С.В., Романов М.П. Искусственный интеллект и интеллектуальные системы управления. М., Наука, 2006.
27. Джексон П. Введение в экспертные системы. Вильямс, М. – Спб – Киев, 2001.
28. Ивашко В.Г., Финн В.К. Экспертные системы и некоторые проблемы их интеллектуализации. Семиотика и информатика, Вып.27, 1986, стр. 25-61.
29. Финн В.К., Блинова В.Г., Панкратова Е.С., Фабрикантова Е.Ф. Интеллектуальные системы для анализа медицинских данных. Врач и информационные технологии. Часть 1. № , 2006, стр. 62-70; Часть 2. № , 2006, стр. 50-60; Часть 3. № , 2007, стр. 51-57.
30. Абдукция. Новая философская энциклопедия. Т.1, М., Мысль, 2000, стр. 9-10.
31. Добрынин Д.А., Карпов В.Э. Моделирование некоторых форм адаптивного поведения интеллектуальных роботов. Информационные технологии и вычислительные системы, №2, 2006, стр. 45-56.
32. Финн В.К. Правдоподобные рассуждения в интеллектуальных системах типа ДСМ. М., Итоги науки и техники, сер. Информатика, Т.15, 1991, стр. 54-101.
33. Гусакова С.М., Михеенкова М.А., Финн В.К. О логических средствах автоматизированного анализа мнений. НТИ, сер.2, №5, 2001, стр. 4-24.
34. Бернайс П. О рациональности. В кн.: Эволюционная эпистемология и логика социальных наук. М., Эдиториал УРСС, 2000, стр. 147-162.
35. Скворцов Д.П. О некоторых способах построения логических языков с кванторами по кортежам. Семиотика и информатика, Вып.20, 1983, стр. 102-126.
36. Виноградов Д.В. Формализация правдоподобных рассуждений в логике предикатов 1-го порядка. НТИ, сер.2, №11, 2000, стр 17-20.
37. Милль Д.С. Система логики силлогической и индуктивной. М.: Книжное Дело, 1900.
38. Handbook of defeasible reasoning and uncertainty management systems. Ed. by Dov M. Gabbay, P. Smets. Vol.4. Kluwer Acad. Publishers, Dordrecht Harbound, 2000.
39. Antoniou G. Nonmonotonic reasoning/ The MIT Press, 1997.
40. Максин М.В. Архитектура интегрированной ДСМ-системы интеллектуального анализа гибридных данных. НТИ, сер.2, №9, 2006, стр. 10-17.
41. Михеенкова М.А., Финн В.К. Правдоподобные рассуждения и булева алгебра для анализа социологических данных (проблемы когнитивной социологии). Труды II международной конференции «Системный анализ и информационные технологии (САИТ-2007)» Т.1, М., URSS, 2007, стр. 153-155.
42. Харчевникова Н.В., Максин М.В., Добрынин Д.А., Жолдакова З.И. Прогноз канцерогенности полициклических углеводородов с использованием автоматизи-

- рованной системы, основанной на совмещении квантово-химических расчетов и логико-комбинаторного ДСМ-метода. Итоги и перспективы научных исследований по проблеме экологии человека и гигиены окружающей среды. Под ред. Ю.А. Рахманина, М., 2002.
43. Блинова В.Г., Добрынин Д.А., Жолдакова З.И., Харчевникова Н.В. Прогноз показателей хронической токсичности замещенных бензолов с помощью ДСМ-метода автоматического порождения гипотез. НТИ, сер.2, №1, 2003, стр.1-4.
  44. Максин М.В. Интеллектуальный анализ данных в науках о жизни. НТИ, сер.2, №9, 2003, стр.16-27.
  45. Максин М.В. Об одном подходе к проблеме комбинирования использования логических и численных методов в интеллектуальном анализе данных. НТИ, сер.2, №10, 2004, стр. 14-19.
  46. Фабрикантова Е.Ф. Применение ДСМ-рассуждений для интеллектуального анализа данных и автоматического порождения гипотез о путях биотрансформации. НТИ, сер.2, №2, 2002, стр. 8-44.
  47. Цидаева И.Г. Критерии цитологической диагностики онкогенных типов вируса папилломы человека. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата медицинских наук (14.00.46 – клиническая лабораторная диагностика), М., 2003.
  48. Захарова Е.В. Прогнозирование исходов системной красной волчанки и системных васкулитов с экстраренальными и почечными проявлениями. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата медицинских наук (14.00.05 – внутренние болезни, 14.00.48 - нефрология), М., 2005.
  49. Решетникова В.В. Информационная система по противоопухолевым препаратам ГУ РОНЦ им. Н.Н. Блохина РАМН. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук (05.25.05 – информационные системы и процессы, правовые основы информатики), М., 2007.
  50. Шундеев А.С. Логико-языковые средства автоматизации производственных процессов. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук (05.13.11 – математическое и программное обеспечение вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей), М., 2005.
  51. Данилова Е.Н., Климова С.Г., Михеенкова М.А. Возможности применения логико-комбинаторных методов для анализа социальной информации. Социология – 4М, №11, 1999, стр 141-160.
  52. Климова С.Г., Михеенкова М.А., Панкратов Д.В. ДСМ-метод как метод выявления детерминант социального поведения. НТИ, сер.2, №12, 1999, стр 3-14.
  53. Финн В.К., Михеенкова М.А. Логические средства анализа рациональности мнений. Математическое моделирование социальных процессов. Вып.8, 2006 стр. 37-40.
  54. Ragin С.С. The Comparative Method: moving beyond qualitative and quantitative strategies. University of California Press, Berkeley, Los Angeles, London, 1987.
  55. Гусакова С.М. Анализ криминалистических данных посредством ДСМ-метода автоматического порождения гипотез. Труды II международной конференции «Системный анализ и информационные технологии (САИТ-2007)» Т.1, М., URSS, 2007, стр. 123-125.
  56. Арский Ю.М., Гитис В.Г., Шогин А.Н. Электронная Земля – сетевая среда поиска, интеграции и анализа геоданных. «Смирновский сборник – 2007», МГУ, геологический факультет. М., 2007, стр. 117-126.
  57. Gitis V., Arsky Y., Shogin A., Weinstock A. Network geoinformation environment for the analysis of spatial and spatio-temporal data. “International Union for Geophysics and Geodesy (IUGG) XXIV General Assembly”, July 2-13, 2007, Perugia, Italy.
  58. Лавров Н.П., Арский Ю.М., Савин Г.И., Жижченко А.Б. Интегральное информационное поле в науках о Земле. Вестник Российской Академии Наук. 2008 (в печати).
  59. Симонс Дж. ЭВМ пятого поколения: компьютеры 90-х годов. М., Финансы и статистика, 1985.

### Приложение I

(состояния ИС типа ДСМ)

S	$\Delta$	$J_{\bar{v}}(C' \Rightarrow_2 Q)$	$\Omega$	$J_{\bar{v}}(C \Rightarrow_1 Q)$
$S_0$	$\Delta_0$	$J_{(\tau, 0)}(C' \Rightarrow_2 Q)$	$\Omega_0$	$J_{(v, 0)}(C \Rightarrow_1 Q)$
$S_1$	$\Delta_1$	$J_{(v, 1)}(C' \Rightarrow_2 Q)$	$\Omega_0$	$J_{(v, 0)}(C \Rightarrow_1 Q)$
$S_2$	$\Delta_1$	$J_{(v, 1)}(C' \Rightarrow_2 Q)$	$\Omega_2$	$J_{(v, 2)}(C \Rightarrow_1 Q)$
$S_3$	$\Delta_3$	$J_{(v, 3)}(C' \Rightarrow_2 Q)$	$\Omega_2$	$J_{(v, 2)}(C \Rightarrow_1 Q)$
$S_4$	$\Delta_3$	$J_{(v, 3)}(C' \Rightarrow_2 Q)$	$\Omega_4$	$J_{(v, 4)}(C \Rightarrow_1 Q)$
$S_5$	$\Delta_5$	$J_{(v, 5)}(C' \Rightarrow_2 Q)$	$\Omega_4$	$J_{(v, 4)}(C \Rightarrow_1 Q)$
$S_6$	$\Delta_5$	$J_{(v, 5)}(C' \Rightarrow_2 Q)$	$\Omega_6$	$J_{(v, 6)}(C \Rightarrow_1 Q)$
...	...	...	...	...
$S_n$	$\Delta_{2n-1}$	$J_{(v, 2n-1)}(C' \Rightarrow_2 Q)$	$\Omega_{2n-2}$	$J_{(v, 2n-2)}(C \Rightarrow_1 Q)$
$S_{n+1}$	$\Delta_{2n-1}$	$J_{(v, 2n-1)}(C' \Rightarrow_2 Q)$	$\Omega_{2n}$	$J_{(v, 2n)}(C \Rightarrow_1 Q)$

Здесь  $n \geq 1$ ,  $v \in \{1, -1, 0\}$  (кроме  $S_0$ , где  $v = \tau$ ).

Шаги ДСМ-рассуждения:

$$S_n = \langle \Delta_{2n-1}, \Omega_{2n-2} \rangle \text{ и } S_{n+1} = \langle \Delta_{2n-1}, \Omega_{2n} \rangle$$

(изменения описаний БФ и БЗ).

$T_n$  – такт ДСМ-рассуждения:

$T_n = \langle S_n, S_{n+1} \rangle$  есть смена состояния  $S_n$  на  $S_{n+1}$ .

Условие стабилизации ДСМ-рассуждения:  $\Delta_{2n-3} = \Delta_{2n-1}$ .

## Приложение II

(усиление правил правдоподобного вывода)

Правила правдоподобного вывода ДСМ-метода АПГ могут быть усилены посредством добавления дополнительных условий порождения сходства фактов. Приведем два примера усиления п.п.в.-1 (индукции).

К исходному предикату  $M_n^+(V, W)$  добавим условие  $(b)^+$  «запрета на контрпримеры» 33]:

$$(b)^+ \quad \forall X \forall Y ((V \subset X) \& (W \subseteq Y)) \rightarrow (J_{(1, n)}(X \Rightarrow_1 Y) \vee J_{(\tau, n)}(X \Rightarrow_1 Y));$$

$$M_{b, n}^+(V, W) \Rightarrow M_n^+(V, W) \& \forall X \forall Y ((V \subset X) \& (W \subseteq Y)) \rightarrow (J_{(1, n)}(X \Rightarrow_1 Y) \vee J_{(\tau, n)}(X \Rightarrow_1 Y)).$$

Аналогично определяется  $M_{b, n}^-(V, W)$  с использованием условия

$$(b)^- \quad \forall X \forall Y ((V \subset X) \& (W \subseteq Y)) \rightarrow (J_{(-1, n)}(X \Rightarrow_1 Y) \vee J_{(\tau, n)}(X \Rightarrow_1 Y)).$$

Следующим усилением  $M_n^+(V, W)$  является добавление условия  $(e)^+$  – «единственности позитивной причины  $V$ », где

$$(e)^+ \quad \forall Z (M_n^+(Z, W) \rightarrow (Z = V));$$

$$M_{e, n}^+(V, W) \Rightarrow M_n^+(V, W) \& \forall Z (M_n^+(Z, W) \rightarrow (Z = V)).$$

Аналогично определяется  $M_{e, n}^-(V, W)$  с использованием условия  $(e)^-$ .

Различные стратегии ДСМ-метода формулируются посредством комбинирования  $M^\sigma$  – предикатов с усилениями или без них 33].

Во всех стратегиях предикат  $M_n^-(V, W)$ , определяемый посредством  $\tilde{M}_n^-(V, W, k)$  аналогично  $M_n^+(V, W)$ , выражает различие между  $(-)$  – причинами и  $(+)$  – причинами. Это различие представлено изменением условия СФ и условия ЭЗ:

$$\text{СФ} \quad \left( \bigcap_{h=1}^k X_h = V \right) \& V \neq \emptyset \& \left( \bigcap_{h=1}^k Y_h = W \right) \& W \neq \emptyset,$$

$$\text{ЭЗ и УЭ} \quad \forall X \forall Y ((J_{(-1, n)}(X \Rightarrow_1 Y) \& (W \subseteq Y)) \rightarrow ((V \subset X) \& \left( \bigvee_{i=1}^k (X = X_i) \right))).$$

Эмпирическая зависимость (ЭЗ) выражает условие, при котором  $(-)$  – факт или  $(-)$  – гипотеза  $J_{(-1, n)}(X \Rightarrow_1 Y)$  такие, что  $W \subseteq Y$ , содержат  $(-)$  – причину  $V$ , т.е.  $V \subset X$ .

**Арский Юрий Михайлович.** Директор Всероссийского института научной и технической информации РАН. Окончил Московский государственный университет им. Ломоносова, 1959 г., доктор геолого-минералогических наук, профессор Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова (руководит созданной им лабораторией геоинформатики и геоэкономики), Санкт-Петербургского и Московского горных институтов, академик РАН. По результатам научных исследований академиком Ю.М. Арским опубликовано более 300 научных трудов, изданных в России и за рубежом, в том числе 20 монографий и учебников. Награжден Орденом Почета (1999) и Орденом «За заслуги перед Отечеством» IV степени (2007), многочисленными медалями. Область научных интересов: комплексное освоение недр, включая информационные и экологические проблемы, информационные технологии и руководство созданием крупных баз данных по естественным и техническим наукам, государственная экспертиза федеральных программ, отечественных и зарубежных научно-технических проектов. В настоящее время Ю.М. Арский – координатор сегмента «Научно-техническая информация» Федеральной целевой программы «Электронная Россия» и один из координаторов программы фундаментальных исследований Президиума РАН «Разработка фундаментальных основ создания научной распределенной информационно-вычислительной среды на основе технологий GRID» (по направлению «Электронная Земля»).

**Финн Виктор Константинович.** Заведующий сектором интеллектуальных информационных систем ВИНТИ РАН, заведующий Отделением интеллектуальных систем в гуманитарной сфере РГГУ. Окончил философский факультет (1957) и механико-математический (1966) МГУ. Доктор технических наук (1990), профессор (1994). Заслуженный деятель науки РФ (2007). Имеет свыше 200 публикаций, в том числе 3 книги. Область научных интересов – логика, искусственный интеллект, анализ данных, логические основания гуманитарных наук.