

НАУЧНО • ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Серия 2. ИНФОРМАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ И СИСТЕМЫ
ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СБОРНИК

Издается с 1961 г.

№ 9

Москва 2013

ОБЩИЙ РАЗДЕЛ

УДК 165 [004.89 : 510.64]

В.К. Финн

Эпистемологические основания ДСМ-метода автоматического порождения гипотез. Часть I*

Рассматривается так называемая проблема индукции: история её возникновения и её уточнения. Формулируются основные принципы и логические средства ДСМ-метода автоматического порождения гипотез, содержащего ДСМ-рассуждения, а также демонстрируется, что ДСМ-рассуждения являются синтезом трёх познавательных процедур – индукции, аналогии и абдукции. Рассматриваются два возможных вида абдукции. Развиваются формальные средства, которые будут использоваться для решения естественнонаучной проблемы индукции.

Ключевые слова: *проблема индукции, естественнонаучная проблема индукции, ДСМ-метод автоматического порождения гипотез, ДСМ-рассуждения, индукция, аналогия, абдукция*

«Убеждение, что внешние истины по отношению к уму могут познаваться сознательным созерцанием независимо от опыта и наблюдений в наше время, я уверен в этом, служит самой надежной опорой ложных теорий и других заблуждений»

*Д.С. Милль Автобиография (История моей жизни и убеждений)
М., Книжное Дело, 1896, стр. 201.*

§1. ПРОБЛЕМА ИНДУКЦИИ И ЕЁ УТОЧНЕНИЯ

Философская* проблема индукции состоит в том, что данные опыта при любом многократном его повторении не могут иметь рационального оправдания,

а следовательно, **индукция** как способ рассуждения не имеет научной ценности. Впервые категорическое отрицание эвристической ценности индукции как вида рассуждения сформулировал Д. Юм [2]: «Поэтому все заключения из опыта суть следствия привычки, а не рассуждения». Юмовская критика индукции стала

* Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 11-07-0618а) и Президиума РАН (П15, проект № 205)

главным источником эпистемологической доктрины, называемой **антииндуктивизмом**.

К.Р. Поппер завершил доктрину антииндуктивизма, уточнив идеи Д. Юма об индукции посредством объективизации юмовской терминологии (заменой «мнения» на «утверждение» или «объяснительную теорию», «впечатления» на «проверочные высказывания», «оправдание мнения» на «оправдание притязаний на истинность теории»). Философская проблема индукции, сформулированная, по мнению К.Р. Поппера, некорректно [1], состоит в ответе на вопрос, имеется ли оправдание индуктивных выводов и в чем оно заключается.

В доктрине антииндуктивизма Д. Юма фактически имеются две проблемы – логическая (H_L) и психологическая (H_{Ps}), соответственно. H_L и H_{Ps} формулируются в [1] следующим образом:

H_L : Оправдан ли в наших рассуждениях переход от случаев, [повторно] встречающихся в нашем опыте, к другим случаям [заключениям], с которыми мы раньше не встречались?

Ответ Д. Юма: нет, как бы велико ни было число повторений.

H_{Ps} : Почему, несмотря на это, все разумные люди ожидают и **верят**, что случаи, не встречавшиеся раньше в их опыте, будут соответствовать случаям из их опыта? Иначе говоря, почему мы так уверены в некоторых своих ожиданиях?

Ответ Д. Юма: это происходит по «обычаю или по привычке», то есть из-за того, что это обусловлено **повторением** и механизмом ассоциации идей – механизмом, без которого мы вряд ли смогли бы выжить [3].

Уточняя H_L посредством утверждений L_1 и L_2 , К.Р. Поппер предлагает свое решение юмовской проблемы индукции [1].

L_1 : можно ли истинность некоторой объяснительной универсальной теории оправдать «эмпирическими причинами», т. е. предположением истинности определенных проверочных высказываний, или высказываний наблюдения (которые, можно сказать, «основаны на опыте»)?

Ответ К.Р. Поппера: это невозможно, так как любое количество истинных проверочных высказываний не может служить оправданием истинности объяснительной универсальной теории.

L_2 : можно ли истинность или ложность некоторой объяснительной универсальной теории оправдать «эмпирическими причинами», т. е. может ли предположение истинности определенных проверочных высказываний оправдать истинность или ложность универсальной теории?

Ответ К.Р. Поппера: предположение истинности проверочных высказываний иногда позволяет нам оправдать утверждение о ложности объяснительной универсальной теории.

L_1 и L_2 являются уточнением логической проблемы индукции - H_L . В [1] также содержатся два уточнения психологической проблемы H_{Ps} – P_{S1} и P_{S2} .¹

Кроме того, в [1] предлагаются формулировки традиционной философской проблемы индукции T_{r1}

и T_{r2} , которая характерна для представителей обыденного сознания.²

T_{r1} : как можно обосновать индукцию (несмотря на аргументы Юма)?

T_{r2} : как можно обосновать принцип индукции (т. е. не логический принцип, обосновывающий индукцию)?

Отметим, что все перечисленные формулировки проблемы индукции H_L , H_{Ps} , L_1 , L_2 , T_{r1} и T_{r2} игнорируют эвристические процедуры обращения с фактами, включающие планирование эксперимента, расширения массивов фактов при поиске закономерностей (то есть эмпирических закономерностей для обозреваемых данных).

Это означает, что эти формулировки отрицают существование недедуктивных (правдоподобных) рассуждений, используемых для порождения гипотез. Следовательно, с этой точки зрения не существуют рациональные процедуры извлечения из фактов нового знания, которые могут служить их обобщениями и могут использоваться для порождения гипотез вместе с априорным знанием, выразимым посредством понятийного аппарата.

Таким образом, главными тезисами антииндуктивизма являются:

(1) отрицание информативности повторения наблюдаемого эффекта;

(2) убеждение в отсутствии каких-либо правил, формализующих порождение индуктивных обобщений (результатов индуктивных процедур);

(3) признание единственного вида рассуждений в исследовательской практике – дедукции;

(4) игнорирование возможности изучения эвристик, могущих быть подспорьем при возникновении догадок³;

(5) порождение нового знания и эволюция научных теорий происходит в результате проб и ошибок, являющихся основной методологической схемой исследований⁴.

Утверждения (1)-(5), характеризующие антииндуктивизм Юма-Поппера, не рассматривают ни различные типы предметных областей (их онтологии), ни особенности различных наук (в том числе наук о жизни, социальных наук, химических наук, психологии и т.п.), ни необходимости анализа данных для наук, имеющих экспериментальные исследования, ни современные возможности компьютерных технологий, применимых к большим массивам данных и имитирующих познавательные возможности исследователя.

² К.Р. Поппер замечает, что с его точки зрения Д. Юм остался индуктивистом [1, с. 36].

³ В [4] П. Бернайс при рассмотрении критического рационализма К.Р. Поппера высказывает мысль, что догадки связаны с эвристиками. Он замечает, что угадывание может происходить рациональным образом, а рациональность в угадывании – предмет эвристики; из этих соображений П. Бернайса можно вывести предположение о возможности изучения эвристики как проблемы логики рассуждений.

⁴ Это утверждение является важным принципом эволюционной эпистемологии К.Р. Поппера [1].

¹ См. [1, с. 35, 36].

Из этого следует, что антииндуктивизм формулирует и решает (как считают его адепты) проблему индукции как **философскую проблему**, а не как проблему **технологии и логики исследований**.

Индуктивизм же, понимаемый широко, считает, что существует необходимость анализа фактов как средства формирования посылок для дедуктивных выводов вместе с посылками теоретического знания, если такое релевантное цели исследования знание имеется.

Из сказанного следует, что индуктивизм признает возможность метатеоретического исследования эвристики и способов порождения гипотез, использующих массивы фактов и результаты экспериментов. Это означает, что индуктивизм допускает формализацию рассуждений, включающих индуктивные процедуры, если они сформулированы в виде специальных правил. Следовательно, индуктивизм является аспектом методологии науки, сферой проблем эпистемологии и стимулом для развития технологий компьютерной науки (прежде всего искусственного интеллекта).⁵

Следует отметить выдающийся вклад британских мыслителей в развитие идей индуктивизма – Ф. Бэкона, Дж. Гершеля, У. Хьюэлл (Уэвелла) и Д.С. Милля. Имеется прямая связь идей об индукции Ф. Бэкона [6] и Дж. Гершеля [7] с индуктивными методами (канонами) Д.С. Милля [8] и его концепции рассуждений, содержащих как индуктивные, так и дедуктивные выводы. Однако и антииндуктивизм Юма-Поппера является британской традицией.

Таблицы присутствия и отсутствия свойств в [6] были первой попыткой сформулировать процедуры для индуктивных выводов (в связи с этим Д.С. Милль считал себя последователем Ф. Бэкона).

В [7] Дж. Гершель выдвинул идеи методов сходства, различия, остатков и сопутствующих изменений, которые в «Системе логики» [8] Д.С. Милль сформулировал как правила индуктивных выводов, посредством которых можно порождать рассуждения об эмпирических фактах. Эти рассуждения он рассматривал как способ доказательства заключений, полученных индуктивными методами.

Вслед за Ф. Бэконом Дж. Гершель считал, что опыт является единственным источником знаний. Посредством опыта устанавливаются причины и законы природы. Согласно Дж. Гершелю посредством индукции обнаруживаются законы природы.

Индукция, согласно Дж. Гершелю, есть сопоставление и сравнение известных классов предметов и обнаружение их сходства и различия. Ему также принадлежат две важные мысли о роли **отрицательных фактов** и **аналогии** в процессе исследования. Он считал, что отрицательные факты (примеры) так же поучительны для открытия причин, как и положительные. Если имеется сходство между многими фактами и имеется точное знание о причине одного из этих фактов, то можно предположить, что той же

причиной обладают все сходные факты. Это утверждение Дж. Гершеля можно формализовать как вывод по аналогии. Заметим, что роль отрицательных примеров весьма существенна в современном распознавании образов и машинном обучении. В частности, отрицательные примеры используются в ДСМ-методе автоматического порождения гипотез [9]. В ДСМ-методе также реализовано взаимодействие индукции и аналогии, которое не было рассмотрено в [8].

Можно говорить о выделении естественной линии развития индукции у британских мыслителей в лице Ф. Бэкона, Дж. Гершеля и Д.С. Милля, которые внесли существенный вклад в эпистемологию индуктивизма. Однако особая роль в нем принадлежит У. Хьюэллу – современнику Д.С. Милля и его критику, который в двух своих книгах «История индуктивных наук» (1837) и «Философия индуктивных наук» (1840), вышедших в свет до «Системы логики» (1847) Д.С. Милля, систематически описал как историю экспериментального естествознания [10], так и философию естественных наук, понимаемую им как методология и психология **открытия**.⁶

Согласно У. Хьюэллу, индукция есть процесс получения общих истин посредством исследования частных фактов. Обобщения, получаемые в индуктивном процессе, возможны лишь при применении ясных идей, объединяющих факты. Индуктивные истины (результаты индукции) устанавливаются как догадки, которые согласуются с фактами.

Индуктивный вывод, по мнению У. Хьюэлл, не является доказательным, но часто оказывается более интересным, чем доказательные рассуждения, ибо устанавливает промежуточные связи, которые не проявляются в доказательном выводе. В [11] он утверждает, что процесс открытия индуктивных истин нельзя подчинить определенным правилам, так как удачные обобщения зависят от личных дарований исследователя. Однако он фактически приходит к идее индуктивного метода остатков для исследования фактов, представленных с помощью числовых параметров. У. Хьюэлл критически относится к четырем индуктивным методам Д.С. Милля, полагая, что только применение подходящих понятий может быть плодотворным для порождения индуктивных обобщений.⁷

Во втором томе книги «Философия индуктивных наук» [11, с. 47] он утверждает, что все наше знание природы получено посредством индукции. Однако он замечает (там же, с. 49), что в каждом индуктивном выводе вводится некоторое общее понятие (conception), которое представляется не посредством явления реальности, а с помощью **разума**.

Заключения же индуктивного вывода **не содержатся в посылках**, а включают введение нового знания, являющегося обобщением, выраженным посредством понятий. В связи с этим в процессе индук-

⁵ В [5] D. Gillies рассматривает индуктивизм Ф. Бэкона, применение индукции в системах искусственного интеллекта, которое является аргументом против антииндуктивизма.

⁶ Подробное изложение идей Ф. Бэкона, Дж. Гершеля, У. Хьюэлл и Д.С. Милля содержится в [12] (см. также [13]).

⁷ Идея применения ясных абстрактных понятий в процессе индукции близка положениям статьи Ч.С. Пирса «Как сделать наши идеи ясными» [14].

ции случаи (факты) рассматриваются как **экземплификации идеального случая**.

Отрицание У. Хьюэллом возможности введения формальных правил индуктивного вывода связано с одной из его главных мыслей об индукции, состоящей в том, что акт **догадки** есть необходимая характеристика всякого индуктивного вывода. Догадка, согласно У. Хьюэллу, есть шаг в открытии, а её верификация является шагом в его доказательстве [11] (vol. 2., p. 51).

Для У. Хьюэлла индукция является обязательным процессом научного исследования, который он рассмотрел в историческом развитии в [10], проиллюстрировав на многочисленных примерах экспериментального естествознания.⁸ Он, характеризуя индукцию как средство научного исследования, выделяет два её аспекта – (1) отношение к реальности и (2) использование общих идей. Он утверждает, что без (1) нет реального знания, а без (2) нет знания вообще. У. Хьюэлл замечает, что без исследования фактов (т. е. без отношения к реальности – (1)) возникают ложные спекуляции и псевдооткрытия.⁹

Среди понятий, применяемых для порождения индуктивных обобщений, У. Хьюэлл выделяет понятия пространства, времени и числа, продолжая в некотором смысле эпистемологическую традицию И. Канта.

Концепция индукции У. Хьюэлла, представленная в [11], содержит важные методологические идеи относительно природы научного исследования, характеризующие культуру научного исследования и психологические особенности совершения открытия. Как замечает М.И. Владиславлев в [13], У. Хьюэлл формулирует принципы методологии открытия, а не логику рассуждения, включающую индукцию.

Важно отметить, что У. Хьюэлл является историком, философом и методологом экспериментального естествознания, признающим роль индукции в научном исследовании, что, в частности, выразимо в термине «Индуктивные науки», которым он пользовался. В этом смысле У. Хьюэлл не является антииндуктивистом, хотя его концепция индукции не содержит формализации правил индуктивного вывода, а предполагает введение обобщений посредством «аппарата понятий» (термин К. Айдукевича [16]) и методологию подготовки открытия как творческой догадки, но связанной с индуктивным исследованием.

Линия развития методологии индуктивизма Бэкона – Гершеля – Милля достигла максимума в книге Д.С. Милля «Система логики» [8]. Д.С. Милль, развивая идеи Ф. Бэкона и Дж. Гершеля об индукции, сделал главным предметом рассмотрения правила **индуктивного рассуждения**, которые были предложены им в Книге III – это индуктивные методы (каноны) – методы сходства, различия, сходства-различия, остатков и сопутствующих изменений.

Объединяя идеи Ф. Бэкона, Дж. Гершеля, Д.С. Милля и У. Хьюэлла, можно утверждать, что их

понимание индукции и её роли в научном познании относятся к **естественнонаучной проблеме индукции**, которая связана с правилами индуктивного вывода и методологией экспериментального исследования, включающего анализ фактов и порождение обобщений.

Заметим, что **философская проблема индукции** Юма – Поппера не рассматривает строение рассуждений, включающих индуктивные процедуры, а касается эпистемологических трудностей при принятии универсальных высказываний.

Интересно отметить тот факт, что при обсуждении индукции ни Ч.С. Пирс [15], ни К.Р. Поппер [1] не рассматривали структурно определенные правила индуктивных выводов Гершеля – Милля. Однако именно эти правила, конструктивно уточненные, стали средством машинного (индуктивного) обучения в современных интеллектуальных системах [9, 17].

Важным событием в характеристике индуктивных рассуждений стала публикация книги Дж. Ст. Милля «Система логики» [8]¹⁰. В Книге III. «Индукция» и Книге IV. «Вспомогательные для индукции процессы» [8] представлены идеи об индуктивных рассуждениях и методологии экспериментального исследования (Книги III и IV являются центральными разделами [8]).

Книги Дж. Гершеля и У. Хьюэлла [7, 10 и 11] стали обоснованием роли индукции в познании природы посредством экспериментальных исследований, а в книге «Система логики» Д.С. Милль попытался развить учение об индукции как **разделе логики**, сформулировав пять правил индуктивного рассуждения – методы сходства, различия, сходства-различия, остатков и сопутствующих изменений (они представлены в [8] в Книге III).

Основные идеи Д.С. Милля об индукции сформулированы в [18]. Они состоят в следующем.

(1) Индукция есть вид рассуждений, которые посредством установления **сходства** рассматриваемых фактов, порождают утверждения об отношениях «причина - следствие» и «следствие-причина».

(2) Индуктивные рассуждения образованы посредством пяти правил индуктивного вывода (методов сходства, различия, сходства-различия, остатков и сопутствующих изменений), которые имеют специфическое строение и отличны от индукции через простое перечисление.

(3) Применимость этих правил предполагает отсутствие препятствий – других причин, противодействующих рассматриваемым **кандидатом** в гипотезы о причинах.¹¹

(4) **Достаточным основанием** для принятия заключений индуктивных рассуждений является закон **единообразия в природе**, устанавливающий связь индукции и причинности.

(5) Наиболее достоверным выводом является **метод различия** (Второе правило индуктивного вывода [8]).

⁸ Книга [10] явно привлекла благожелательное внимание Ч.С. Пирса к хьюэлловскому рассмотрению процесса индукции, отмеченное в [14].

⁹ См. [11], vol. 2, Chapter V. On certain characteristics of scientific induction, p. 47.

¹⁰ См. также [19].

¹¹ Это условие следует сравнить с принципом Дж. Гершеля: знание отрицательных фактов так же важно, как и знание положительных [7].

(6) В природе и обществе имеет место множественность причин: у следствий могут существовать различные причины.

(7) Индуктивные методы есть средства обнаружения эмпирических законов и эмпирических тенденций.

(8) Индуктивные методы, применяемые к опытным данным, порождают посылки для дедуктивных выводов, что означает **взаимодействие** индукции и дедукции.

(9) Логика есть наука о рассуждениях, включающих взаимодействие индукции и дедукции.

Д.С. Милль рассматривал правила индуктивного вывода как средство **доказательства** при принятии гипотез, порождаемых посредством установления сходства в опытных данных. Эта мысль Д.С. Милля выражает тот факт, что в отличие от У.Хьюэллса, он считает индуктивные процедуры предметом логики, а не только предметом методологии и эпистемологии научного исследования.

Таким образом, в [8] Д.С. Милль, развивая идеи Дж. Гершеля, попытался решать естественнонаучную проблему индукции. Индукция, согласно Д.С. Миллю, является необходимым логическим средством исследования природы. Однако он эту точку зрения не распространил на науки о человеке и обществе – «нравственные науки» ([8], Книга VI. Логика нравственных наук).

§2. ДСМ-МЕТОД АВТОМАТИЧЕСКОГО ПОРОЖДЕНИЯ ГИПОТЕЗ В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

Разделение проблемы индукции на две, различающиеся по смыслу проблемы, – философскую (в том числе и с уточнениями К.Р. Поппера [1]) и естественнонаучную, связано с реалистичным (не спекулятивным) отображением **естественного познавательного цикла** «анализ данных – порождение гипотез – объяснение».

Устранение анализа данных из познавательного процесса означает игнорирование эксперимента и извлечения из него опытного знания, что, согласно Д.С. Миллю, есть «опора ложных теорий и других заблуждений».¹² Такое устранение анализа данных означает игнорирование индуктивных процедур (в частности, их заменяют в [1] методом проб и ошибок), что является интеллектуальными упражнениями, далекими от потребностей науки и возможностей современной логики [20].

Познавательный цикл «анализ данных – порождение гипотез (предсказание) - объяснение» в условиях современной компьютерной цивилизации формализуется средствами логики и реализуется в системах искусственного интеллекта с использованием машинного (индуктивного) обучения для knowledge discovery в базах фактов. Эти базы фактов содержат большие массивы данных, обзор которых и извлечение из них полезных знаний человеком в реальное время невозможны. А следовательно, возникает необходимость **автоматизации** познавательного цикла

«анализ данных – порождение гипотез (предсказание) - объяснение».

Эта автоматизация извлечения знаний из массивов данных осуществляется в интеллектуальных системах, имитирующих и усиливающих познавательную активность человека.

Так как интеллектуальные системы (ИС) [17, 21] имитируют и усиливают познавательную активность человека [22], то следует перечислить способности человека, образующие феноменологию естественного интеллекта, реализуемые в автоматическом или интерактивном режимах. Таковыми являются:

1. способность выделять существенное в наличных данных и знаниях;

2. способность к целеполаганию и планированию поведения – порождение структуры «цель – план – действие»;

3. способность к отбору знаний в качестве посылок для вывода, релевантных цели рассуждения;

4. способность извлекать следствия из имеющихся фактов и знаний, т.е. способность к рассуждению, которое может содержать как правдоподобные выводы, используемые для выдвижения гипотез, так и достоверные выводы;

5. способность к аргументированному принятию решений, использующему представление знаний и результаты рассуждений, соответствующие поставленной цели;

6. способность к рефлексии – оценке знаний и действий;

7. способность находить объяснение, как ответ на вопрос «почему?»;

8. способность к синтезу познавательных процедур, образующих эвристики решения задач, соответствующих рассматриваемой проблеме (например, такой эвристикой является взаимодействие индукции, аналогии и абдукции с возможным последующим применением дедукции);

9. способность к обучению и использованию памяти;

10. способность к созданию целостной картины относительно предмета мышления, объединяющей знания, релевантные поставленной цели (т.е. формирование приближенной «теории» предметной области);

11. способность к адаптации в условиях изменения жизненных ситуаций и знаний, что означает коррекцию «теории» и её изменение.¹³

Способности 1-11 характеризуют продуктивное мышление [23], которое является существенным аспектом феноменологии рационального сознания.

Схема феноменологии рационального сознания ([21], Часть III, Глава IV) была представлена следующим образом:

Феноменология рационального сознания = система знаний + продуктивное мышление + субъективный мир личности (СМЛ).

¹² Милль Д.С. Автобиография. – М.: Книжное Дело, 1896, с. 201 – Эпиграф к данной статье.

¹³ Заметим, что способности 1-11 покрывают характеристики естественного интеллекта, представленные в [22], среди которых имеется способность к индуктивному мышлению.

Интеллектуальные системы (ИС) [17, 21] – главный продукт искусственного интеллекта имеют архитектуру, которая может быть сопоставлена структуре феноменологии рационального сознания (ФРС), а именно:

ИС = (База фактов (БФ) + База знаний (БЗ)) + Решатель задач + Комфортный интерфейс, где Решатель задач = Рассуждатель + Вычислитель + Синтезатор.

Рассуждатель, Вычислитель и Синтезатор, являющиеся модулями Решателя задач, осуществляют, соответственно, правдоподобные выводы (и в том числе индукцию), вычисления, необходимые для решения задачи (они являются **посылками** рассуждения), объединение рассуждений и вычислений, синтезатор также выбирает стратегии решения задач.

БФ содержит представление элементарных высказываний (протокольных предложений в смысле Венского кружка [24]), используемых в качестве посылок правдоподобных рассуждений, включающих индукцию, реализующих машинное обучение; БФ является исходным материалом для машинного обучения, посредством которого извлеченные из неё знания пополняют БЗ. БФ может быть расширена, что, соответственно, приведет к расширению БЗ. Возможным пополнением БЗ являются порожденные посредством Решателя задач гипотезы, выражающие эмпирические закономерности (ЭЗК).

Аналогия между ФРС и ИС такова: системе знаний соответствует БФ и БЗ, продуктивному мышлению – Решатель задач, а СМЛ соответствует комфортный интерфейс, образованный диалогом пользователя с ИС, обзором исходных данных с учетом их графического представления, с предпочтениями при выборе стратегий решения задач и средствами научения работе с ИС.¹⁴

Главный модуль ИС – Решатель задач, который имитирует и реализует в **автоматическом режиме** способности 1, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9. Способности же 2, 10 и 11 могут быть реализованы в **интерактивном режиме**.

Следует выделить одну из главных способностей – синтез познавательных процедур (8), – которая связана со способностями (3) (отбор посылок) и способностью (4) – к реализации рассуждений. Указанные способности, имитируемые в Рассуждателе (модуле Решателя задач), осуществляют автоматизацию в ИС отображения познавательного цикла «анализ данных – порождение гипотез (предсказание) – объяснение».

Очевидно, что начальным этапом реализации естественного познавательного цикла является индукция, которая используется для анализа данных. Таким образом, компьютерные системы и средства современной логики создали условия для решения **естественнонаучной проблемы индукции**, которая может быть охарактеризована следующим образом:

(1) индуктивные процедуры могут быть формализованы в виде **правил вывода** для анализа данных в компьютерных системах искусственного интеллекта (в том числе и в ИС),

(2) эти правила вывода применимы к **массивам данных** (в БФ) в условиях **неполноты** информации,

(3) правила индуктивного вывода, применяемые к последовательностям расширяющихся БФ, являются немонотонными.

(4) обнаружение knowledge discovery в БФ предполагает **амплиативность** правил индуктивного вывода, которая выражена специальными формализованными условиями,

(5) применение правил индуктивного вывода, необходимое для анализа данных в БФ, осуществляется посредством синтеза познавательных процедур, формализуемого правдоподобными рассуждениями,

(6) правила правдоподобного вывода, образующие рассуждения, имеют точно определяемые оценки заключений вывода¹⁵,

(7) познавательный цикл «анализ данных – порождение гипотез (предсказание) – объяснение» естественным образом в ИС может быть формализован правдоподобным рассуждением следующей структуры – «индукция (для анализа данных) – аналогия (для предсказаний) – абдукция (для объяснительного принятия гипотез)»¹⁶, выбор стратегии решения задачи.

Сформулируем теперь пять основных методологических принципов формализации правдоподобных рассуждений, включающих индукцию.

1. Имеются три «мира» (т.е. три типа предметных областей), к которым применяются процедуры анализа данных.

(а) «мир» случайных событий,

(б) «мир» множеств фактов таких, что в них имеются направленные влияния, детерминирующие изучаемые эффекты.

(с) «мир» объединяющий «миры» (а) и (б).

Естественно предположить, что в случае (а) следует применять вероятностный подход к анализу данных и статистические методы. Весьма проблематично считать, что для «мира» (а) нужны какие-то специфические правила индуктивного вывода. Но эти правила индуктивного вывода необходимы для рассуждений относительно фактов «мира» (б), которые отображаются в посылках индуктивного вывода, используемого для порождения гипотез о причинах изучаемых эффектов (обобщений сходства фактов при анализе данных), с последующим предсказанием этих эффектов в условиях неопределенности.

Таким образом, «мир» (б) является типом предметных областей, адекватным для невероятностных правил индукции, использующих отношения «причина – следствие» и «следствие – причина».

«Мир» (с) требует правил правдоподобного вывода, комбинирующих индуктивные правила для «мира» (б) и вероятностные соображения, соответствующие «миру» (а).

2. Правдоподобные рассуждения формализуют эвристики для решения задач посредством синтеза познавательных процедур.

¹⁵ См. в связи с этим [5], в которой D. Gillies характеризует индукцию в системах искусственного интеллекта.

¹⁶ Изложение идей Ч.С. Пирса об абдукции содержится в [25], а современные попытки её формализации представлены в [26].

¹⁴ В идеальном случае это научение должно учитывать особенности личности пользователя, что является проблемой когнитивной психологии.

3. Индукция подчинена принципу: сходства фактов порождает наличие (отсутствие) изучаемого эффекта и его повторяемость.

4. Правила правдоподобного вывода содержат встроенные условия фальсификации предполагаемого заключения.¹⁷

5. Извлечение нового знания из массивов фактов реализуется в согласии с принципом роста знания К.Р. Поппера [1], представляющим схему эволюционной эпистемологии: $P1 - TT - EE - P2$, где $P1$ проблема (цель рассуждения, соответствующая процессу «цель – план – действие», что отвечает способности (2) интеллекта), TT – пробная теория, EE – исправление ошибок и коррекция теории (это соответствует способности интеллекта (11) – коррекции «теории» и её изменение), $P2$ – новая возникшая проблема (т.е. результат knowledge discovery), понимаемая в процессе интерактивного режима ИС, поддерживающего исследование), что является результатом применения информационных технологий, расширяющих возможности обработки экспериментальных данных. Применение этих технологий является новыми цивилизационными условиями современных научных исследований и практики управления.

Примером осуществления перечисленных пяти принципов методологии формализации правдоподобных рассуждений в ИС является ДСМ-метод автоматического порождения гипотез (ДСМ-метод АПГ) [9, 17, 21].

ДСМ-метод АПГ является развитием современными средствами логики и искусственного интеллекта идей Дж. Гершеля и Д.С. Милля об индукции. Все пять индуктивных методов Д.С. Милля получили в нем точные определения средствами бесконечнозначной логики степеней правдоподобия порождаемых гипотез [27, 28], а четыре метода индуктивного вывода (методы сходства, различия, сходства – различия и остатков) реализованы в Рассуждателях интеллектуальных систем типа ДСМ (ИС-ДСМ) [29, 30].

ДСМ-метод АПГ является вариантом **решения естественнонаучной проблемы индукции**, а индукция является начальной процедурой правдоподобного ДСМ-рассуждения типа «индукция – аналогия – абдукция», реализуемой конструктивно в интеллектуальных системах типа ДСМ (ИС-ДСМ). ДСМ-рассуждения являются формализацией и имитацией познавательного цикла «анализ данных – предсказание – объяснение». Следует заметить, что «анализ данных» и «предсказание» осуществляются посредством автоматического порождения гипотез в ИС-ДСМ. А, следовательно, ДСМ-метод АПГ является методом автоматического порождения гипотез [9, 17] и средством машинного обучения в системах искусственного интеллекта [5].

ДСМ-метод состоит из шести компонент – характеристики условий применимости, ДСМ-рассуждений, представления знаний в виде квазиаксиоматических теорий, метатеоретического исследования предметной области, средств распозна-

вания эмпирических закономерностей и интеллектуальных систем типа ДСМ (ИС-ДСМ).

Условиями применимости ДСМ-метода АПГ являются: формализуемость сходства фактов в БФ, наличие позитивных и негативных примеров (соответственно, (+)- и (-)- фактов);¹⁸ существование в массиве фактов (т.е. в БФ) как позитивных, так и негативных причинно-следственных зависимостей ((+)- и (-)-причин). Условия применимости ДСМ-рассуждений полуформально охарактеризованы в [21] (Часть III, Глава 1, §10. Характеризация онтологии для JSM-метода автоматического порождения гипотез, стр. 219-222)¹⁹.

Главной компонентой ДСМ-метода АПГ являются ДСМ-рассуждения, осуществляющие взаимодействие индукции, аналогии и абдукции. Посредством индукции устанавливается сходство фактов и порождаются гипотезы о (+)- и (-)-причинах изучаемых эффектов в БФ.

Очевидно, что ДСМ-рассуждения формализуют естественную эвристику синтеза трех познавательных процедур – индукции, аналогии и абдукции, которая имитирует познавательный процесс «анализ данных – предсказание-объяснение».

Третьей компонентой ДСМ-метода является представление знаний посредством квазиаксиоматических теорий (КАТ).²⁰ КАТ $\mathcal{T}$ состоит из множества аксиом Σ , лишь частично характеризующих предметную область такую, что она соответствует «мирам» типа (b); открытого множества фактов и гипотез Σ' , пополняемого посредством применения ДСМ-рассуждений к исходному множеству (+)- и (-)-фактов (напомним в связи с этим идею Дж. Гершеля о важности (-)-фактов для индукции); множества правил вывода $\mathcal{R}$, где $\mathcal{R} = \mathcal{R}_d \cup \mathcal{R}_p$, $\mathcal{R}_d$ – множество правил достоверного (дедуктивного) вывода, а $\mathcal{R}_p$ – множество правил правдоподобного вывода.

Таким образом, КАТ есть $\mathcal{T} = \langle \Sigma, \Sigma', \mathcal{R} \rangle$.

Заметим, что Σ' и Σ могут пополняться посредством применения правил из $\mathcal{R}$ к Σ' с использованием фонового знания из Σ .²¹ В ИС-ДСМ этот процесс осуществляется Решателем задач, содержащим Рассуждатель.

Четвертой компонентой ДСМ-метода являются метатеоретические исследования ДСМ-рассуждений и соответствующих предметных областей, таковыми являются: дедуктивная имитация ДСМ-рассуждений [9] (Глава 5. О дедуктивной имитации некоторых вариантов ДСМ-метода автоматического порождения гипотез, стр. 240-286), формулирование процедурной

¹⁷ Фальсифицируемость получаемых результатов является необходимой характеристикой научного знания, согласно [1].

¹⁸ Одним из условий применимости индукции Дж. Гершель считал наличие как позитивных, так и негативных примеров. Он отмечал, что отрицательные примеры так же важны, как и положительные [7].

¹⁹ Условие применимости ДСМ-метода АПГ соответствуют природе «мира» (b), содержащего направленные влияния, детерминирующие эффекты, присущие этому «миру».

²⁰ См. определения КАТ в [31] и [9] (глава 1, с. 28-37).

²¹ Это означает, что в ИС используется БФ (для Σ') и БЗ (для Σ и Σ' , содержащего порожденные гипотезы)

семантики для индукции и аналогии [21] (Часть IV. Глава 4. Индуктивный метод соединенного сходства различия и процедурная семантика, стр. 339-376), препроцессинг для анализа предметных областей, представленных в БФ, и выбор адекватной процедурной семантики для стратегий ДСМ-рассуждений.

Так как правила вывода для индукции и аналогии могут быть представлены в качестве декларативных знаний посредством аксиом, то для соответствующего фрагмента КАТ имеют место важные теоремы о непротиворечивости множества порожденных гипотез для заданной БФ, о единственности модели для системы аксиом, представляющей правила вывода (индукции и аналогии), и об обратимости этих правил вывода (т. е. посылок и заключения) [9] (Часть I, Глава 5, стр. 240-286).

Пятой компонентой ДСМ-метода являются средства распознавания эмпирических закономерностей (ЭЗК) в БФ посредством вычисления функционалов степеней противоречивости порождаемых множеств гипотез в расширяемых последовательностях БФ [28,32].

Шестой компонентой ДСМ-метода являются интеллектуальные системы (ИС) с Решателем задач, реализующим ДСМ-рассуждения. Напомним, что ИС = (БФ+БЗ) + Решатель задач + Комфортный интерфейс, а главным модулем Решателя задач является Рассуждатель, который осуществляет синтез трех познавательных процедур – индукции, аналогии и абдукции.²²

Для формализации ДСМ-рассуждений используется специальный язык представления знаний для ИС типа ДСМ, посредством которого выражаются как сходство (+)- и (-)-фактов, отношения «причина – следствие» и «следствие – причина», так и оценки (истинностные значения со степенью правдоподобия фактов и гипотез). Гипотезы же порождаются правилами правдоподобного вывода (индукцией и аналогией).

Сформулируем ниже ДСМ-язык:

X, Z, V (быть может, с нижними индексами) – переменные для объектов и подобъектов (это переменные 1-го сорта);

$C, C_1, C_2, \dots$ – константы (множества некоторых элементов), являющихся значениями переменных 1-го сорта;

Y, U, W (быть может, с нижними индексами) – переменные для эффектов которыми являются множества свойств (это переменные 2-го сорта);

$Q, Q_1, Q_2, \dots$ – константы (множества свойств), являющиеся значениями переменных 2-го сорта;

n, m, l, k, r, s (быть может, с нижними индексами) – переменные, значениями которых являются натуральные числа ($n \in \mathbb{N}$);

$\cap, \cup$ – операции алгебры множеств;
 $=$ – предикаты равенства для переменных трех сортов;

$\leq, \geq$ – предикаты для числовых переменных;

$\subseteq$ – предикат включения для множеств;

$X \Rightarrow_1 Y$ – предикат «объект X имеет множество свойств Y »;

$V \Rightarrow_2 W$ – предикат « V есть причина W »;

$W_3 \Leftarrow V$ – предикат « W есть следствие V »;

$\neg, \&, \vee, \rightarrow$ – логические связки двузначной логики;

$J_{\bar{V}}$ – J -операторы Россера – Тюркетта (Rosser – Turquette) [33], где $\bar{V} = \langle v, n \rangle$ или $\bar{V} = \langle \tau, n \rangle$, $v \in \{1, -1, 0\}$, $n \in \mathbb{N}$ ($\mathbb{N}$ – множество натуральных чисел); а $1, -1, 0, \tau$ – типы истинностных значений: «фактическая истина», «фактическая ложь», «фактическое противоречие» и «неопределенность», соответственно;
 $\forall, \exists$ – кванторы всеобщности и существования (соответственно, для трех приведенных выше сортов переменных).

Термы и формулы ДСМ-языка определяются стандартным образом, но с существенным добавлением формул «переменной длины» и кванторов по кортежам «переменной длины» [9] (Часть I, Глава 3. Д.П. Скворцов «О некоторых способах построения логических языков с кванторами по кортежам», с. 214-232).

При поиске в БФ эмпирических зависимостей причинно-следственного типа требуется обнаружить сходство и различие фактов на конечном, но заранее **неопределенном** множестве примеров. Число таких примеров k , называемое параметром эмпирической индукции, является **переменной** величиной. В силу этого надо расширить выразительные возможности языка логики предикатов 1-го порядка посредством введения формул «переменной длины» и кванторов по кортежам. ДСМ-язык с кванторами по кортежам является языком слабой логики предикатов 2-го порядка [34].

Д.В. Виноградов установил в [9, Часть 1, Глава 6 «Формализация правдоподобных рассуждений в логике предикатов», с. 287-293], что исходные предикаты ДСМ-метода для индукции и аналогии, а также утверждения, характеризующие абдукцию для (+)- и (-)-примеров, выразимы в логике предикатов 1-го порядка для **конечных** моделей, но для моделей произвольной мощности они выразимы в слабой логике предикатов 2-го порядка (т. е. в ДСМ-языке с кванторами по кортежам)²³.

Подформулами «переменной длины» ДСМ-логики с кванторами по кортежам являются формулы вида

$$\exists k \exists X_0 \exists X_1 \dots \exists X_{k-1} \exists Y_0 \dots \exists Y_{k-1} \\ (\dots \&_{i=0}^{k-1} J_{\bar{V}}(X \Rightarrow_r Y_i) \& \dots), T_1 \cap \dots \cap T_k = T,$$

где $r=1,2$; T_i, T – термы, и формулы $\bigvee_{i=1}^k (X=Y_i)$,
 $\bigvee_{i=1}^k (Y=Y_i)$ ²⁴.

²² В силу этого обстоятельства чисто индуктивная машина имеет невысокую познавательную ценность, ибо индукция не является процедурой, изолированной от других познавательных процедур.

²³ См. также Научно-техническая информация. Сер. 2. – 2000. – № 11. – С. 17 – 20.

²⁴ Использование многоточия (...) эвристически удобно для представления формул с кванторами по кортежам.

Рассматриваемая версия ДСМ-метода АПГ имеет процедурную семантику с булевой структурой данных [35].

Пусть $U^{(1)}$ и $U^{(2)}$ – исходные множества объектов и свойств, соответственно, а $\mathfrak{B}_i = \langle 2^{U^{(i)}}, \emptyset, U^{(i)}, -, \cap, \cup \rangle$ – булевы алгебры ($i = 1, 2$), образующие структуру данных²⁵.

Предикаты $X \Rightarrow_1 Y$, $X \Rightarrow_2 Y$ и $X_3 \Leftarrow Y$ определяются посредством отображений:

$$\Rightarrow_i: 2^{U^{(1)}} \times 2^{U^{(2)}} \rightarrow V_{in}, i=1,2;$$

$$\Leftarrow: 2^{U^{(2)}} \times 2^{U^{(1)}} \rightarrow V_{in}, \text{ где}$$

$$V_{in} = \{ \langle v, n \rangle \mid (v \in \{1, -1, 0\}) \& (n \in N) \} \cup \{ \langle \tau, n \rangle \mid n \in N \},$$

$N = \{0, 1, 2, \dots\}$ – множество натуральных чисел; $1, -1, 0, \tau$ – типы истинностных значений; $\langle v, n \rangle$ – истинностные значения (n – степень правдоподобия, выражающая число применений правил правдоподобного вывода);²⁶ а $\langle \tau, n \rangle$ – множество истинностных значений. $\langle \tau, n \rangle$ характеризуется рекуррентным соотношением $\langle \tau, n \rangle = \{ \langle 1, n+1 \rangle, \langle -1, n+1 \rangle, \langle 0, n+1 \rangle \} \cup \langle \tau, n+1 \rangle$, выражающим возможные истинностные значения гипотез, порождаемых правдоподобным ДСМ-рассуждением. V_{in} – множество **внутренних** (эмпирических или фактических) истинностных значений в смысле Д.А. Бочвара [36].

Эти истинностные значения являются оценками **фактов**, если $n=0$, и являются оценками **гипотез**, если $n>0$.

Посредством V_{ex} – обозначим множество **внешних** истинностных значений в смысле Д.А. Бочвара: $V_{ex} = \{t, f\}$, где t и f – истинностные значения двузначной логики «истина» и «ложь», соответственно. Истинностные значения t и f имеют формулы, построенные посредством термов булевых алгебр $\mathcal{B}_1$ и $\mathcal{B}_2$, предикатов $\subseteq, =$ и $\geq, \leq$, а также формул вида $J_{\bar{v}}(T \Rightarrow_i T')$, где $i=1, 2$, а T и T' – термы сорта 1 и сорта 2, соответственно.

J-операторы [33] определяются стандартным образом:

$$J_{\bar{v}} \varphi = \begin{cases} t, & \text{если } V[\varphi] = \bar{v} \\ f, & \text{если } V[\varphi] \neq \bar{v}. \end{cases}$$

Определим также оператор $J_{(v,n)} \varphi = \bigvee_{i=0}^n J_{\langle v,i \rangle} \varphi$.

Начальной процедурой ДСМ-метода АПГ является индукция, формализация которой осуществляется посредством имитации и уточнения индуктивных методов Д.С. Милля. Эта формализация индукции сформулирована в ДСМ-языке таким образом, что правила индуктивного вывода удовлетворяют приведенным выше условиям 1-7. С этой целью определяются исходные предикаты, выражающие механизм извлечения знаний (knowledge discovery) из заданного массива фактов (базы фактов ИС).

²⁵ Возможны усложнения структур данных, сохраняющих выразимость сходства объектов посредством соответствующих алгебраических операций. Например, $U^{(1)}$ может быть множеством графов.

²⁶ Чем больше n , тем меньше степень правдоподобия гипотез с истинностным значением $\bar{v} = \langle v, n \rangle$, где $n > 0$.

Так как ДСМ-метод АПГ применим к «миру» (b) множества фактов (базе фактов – (БФ)) таких, что они разбиваются на положительные ((+)-факты) и отрицательные ((-)-факты), то процедура индукции представима двумя М-предикатами $M^+(V, W)$ и $M^-(V, W)$ такими, что они извлекают из БФ сходства (+) – фактов и (–) – фактов, соответственно.

Минимальные по выразительной силе М-предикаты $M_a^+(V, W)$ и $M_a^-(V, W)$ формализуют Первое правило индукции Д.С. Милля – **метод сходства** [8].

Первое правило. Если два или более случая подлежащего исследованию явления имеют общим лишь одно обстоятельство, то это обстоятельство – в котором только и согласуются все эти случаи – есть причина (или следствие) данного явления [8].

Первое правило Д.С. Милля в ДСМ-языке формализуется и уточняется посредством двух М-предикатов сходства $M_{a,n}^+(V, W)$ и $M_{a,n}^-(V, W)$.

Предикат $M_{a,n}^+(V, W)$ образован пятью условиями – экзистенциальным (ЭУ), сходства (СХ), эмпирической зависимости (ЭЗ), исчерываемости (УИ) и нижней границы числа сходных примеров k ($k \geq x$, где $x \geq 2$).

Экзистенциальное условие (ЭУ) выражает существование позитивных примеров ((+)-примеров) и негативных примеров ((-)-примеров), представимых посредством предиката $X \Rightarrow_1 Y$ («объект X имеет множество свойств Y »).

(ЭУ) выразимо подформулой предиката $M_{a,n}^+(V, W)$:

$(J_{(1,n)}(Z_1 \Rightarrow_1 U_1) \& \dots \& (J_{(1,n)}(Z_k \Rightarrow_1 U_k)))$, где n – параметр для числа применений правил правдоподобного вывода, используемый для задания степени правдоподобия порождаемых гипотез.

Заметим, что оператор $J_{(v,n)}$ выражает итеративность порождения гипотез, так как

$$J_{(v,n)} \varphi = \bigvee_{i=0}^n J_{\langle v,i \rangle} \varphi, \text{ где } v \in \{1, -1, 0\}.$$

(ЭУ) предиката $M_{a,n}^-(V, W)$ выразимо посредством подформулы $(J_{(-1,n)}(Z_1 \Rightarrow_1 U_1) \& \dots \& (J_{(-1,n)}(Z_k \Rightarrow_1 U_k)))$.

(ЭЗ) – эмпирическая зависимость, представляющая причинное вынуждение следствий (эффектов) в предикате $M_{a,n}^+(V, W)$, выразима посредством подформулы

$$\forall X \forall Y ((J_{(1,n)}(X \Rightarrow_1 Y) \& (V \subseteq X)) \rightarrow ((W \subseteq Y) \& (W \neq \emptyset) \& (\bigvee_{i=1}^k (X = Z_i))))).$$

В этой подформуле выразимо и условие исчерываемости (УИ), где (УИ) есть $(\bigvee_{i=1}^k (X = Z_i))$. (УИ) представляет максимальную группировку сходных (+)-примеров.

(ЭЗ) в предикате $M_{a,n}^-(V, W)$ выразима посредством подформулы

$$\forall X \forall Y ((J_{(-1,n)}(X \Rightarrow_1 Y) \& (W \subseteq Y)) \rightarrow ((V \subseteq X) \& (\bigvee_{i=1}^k (X = Z_i))))).$$

(ЭЗ) для $M_{a,n}^-(V,W)$ выражает тот факт, что отсутствие эффекта W , где $W \subseteq Y$, влечёт наличие $(-)$ -причины V , где $V \subseteq X$.

(СХ) – условия сходства $(+)$ -примеров (соответственно, $(-)$ -примеров) представимы посредством подформулы $(Z_1 \cap \dots \cap Z_k = V) \ \& \ (V \neq \emptyset)$ для $M_{a,n}^+(V,W)$, где Z_i – термы, входящие в подформулы $J_{(1,n)}(Z_i \Rightarrow U_i)$ из (ЭУ), $i = 1, \dots, k$.

Аналогичное имеет место для $M_{a,n}^-(V,W)$.

(СХ) – условие, представляющее принцип: сходство фактов порождает наличие (отсутствие) изучаемого эффекта и его повторяемость. Заметим, что «эффекту» соответствует переменная W , а сходству фактов – переменная V .

Нижняя граница числа сходных примеров, представленная параметром k , является варьируемой: $k \geq x$, где $x \geq 2$. Для определённости в определениях $M_{a,n}^+(V,W)$ и $M_{a,n}^-(V,W)$ положим $x = 2$.

Заметим, что в этих определениях имеется два параметра – k и n , – характеризующие исходные данные (множество сходных примеров) и число применения правил правдоподобного вывода, соответственно. Говоря неформально, k является «онтологическим» параметром, а n – «эпистемологическим», характеризующим итеративность имитации познавательного процесса. Это означает представление степени правдоподобия порождаемых гипотез, входящее в их истинностные значения $\bar{v} = \langle v, n \rangle$ или в множество истинностных значений $(\tau, n) = \{ \langle 1, n+1 \rangle, \langle -1, n+1 \rangle, \langle 0, n+1 \rangle \} \cup \langle \tau, n+1 \rangle$ для случаев неопределённости гипотез.

Позитивный предикат сходства $M_{a,n}^+(V,W)$ определяется посредством параметрического предиката $\tilde{M}_{a,n}^+(V, W, k)$, приводимого ниже:

$$\begin{aligned} \tilde{M}_{a,n}^+(V,W,k) = & \exists Z_1 \dots \exists Z_k \exists U_1 \dots \exists U_k ((J_{(1,n)}(Z_1 \Rightarrow U_1) \ \& \\ & \& \dots \& (J_{(1,n)}(Z_k \Rightarrow U_k) \ \& (Z_1 \cap \dots \cap Z_k = V) \ \& (V \neq \emptyset) \ \& \\ & \& \forall i \forall j (((i \neq j) \ \& (1 \leq i, j \leq k)) \rightarrow (Z_i \neq Z_j)) \ \& \\ & \& \forall X \forall Y ((J_{(1,n)}(X \Rightarrow Y) \ \& (V \subseteq X)) \rightarrow ((V \subseteq Y) \ \& (W \neq \emptyset) \ \& \\ & \& (\bigvee_{i=1}^k (X = Z_i)))) \ \& (k \geq 2)). \end{aligned}$$

Подформула $\forall i \forall j (((i \neq j) \ \& (1 \leq i, j \leq k)) \rightarrow (Z_i \neq Z_j))$ является вспомогательной и исключает случаи $J_{(1,n)}(Z_i \Rightarrow U_i)$ и $J_{(1,n)}(Z_j \Rightarrow U_j)$ такие, что $i \neq j$ и $Z_i = Z_j$.

Число сходных примеров неопределённо, поэтому используется параметр k и кванторы по кортежам²⁶. Удобным способом представления формул с кванторами по кортежам является использование многоточия (...).

Это означает, что предикат $\tilde{M}_{a,n}^+(V, W, k)$ выразим в слабой логике предикатов 2-го порядка, в которой выразимо транзитивное замыкание. Д.В. Виноградов показал, что для конечных моделей предикаты ДСМ-метода выразимы в языке логики предикатов 1-го порядка, но для произвольных моделей предикаты

ДСМ-метода, представляющие индукцию, аналогию и абдукцию, выразимы в слабой логике предикатов 2^{го} порядка [9]²⁷.

Позитивный предикат сходства $M_{a,n}^+(V,W)$ определим следующим образом:

$$M_{a,n}^+(V,W) = \exists k \tilde{M}_{a,n}^+(V,W,k).$$

В определении $M_{a,n}^+(V,W)$ используется два параметра – n (для числа применений правил правдоподобного вывода) и k (для числа сходных примеров). Индекс же a является обозначением миллевского метода сходства (“agreement” в его терминологии, хотя точнее было бы употребить термин “similarity”).

Аналогично определяется предикат сходства для отрицательных примеров $M_{a,n}^-(V,W)$:

$$M_{a,n}^-(V,W) = \exists k \tilde{M}_{a,n}^-(V,W,k),$$

где

$$\begin{aligned} \tilde{M}_{a,n}^-(V,W,k) = & \exists Z_1 \dots \exists Z_k \exists U_1 \dots \exists U_k ((J_{(-1,n)}(Z_1 \Rightarrow U_1) \ \& \\ & \& \dots \& (J_{(-1,n)}(Z_k \Rightarrow U_k) \ \& \\ & \& (Z_1 \cap \dots \cap Z_k = V) \ \& (V \neq \emptyset) \ \& \forall i \forall j (((i \neq j) \ \& (1 \leq i, j \leq k)) \rightarrow \\ & \rightarrow (Z_i \neq Z_j)) \ \& \forall X \forall Y ((J_{(-1,n)}(X \Rightarrow Y) \ \& (W \subseteq Y)) \rightarrow \\ & \rightarrow ((V \subseteq X) \ \& (\bigvee_{i=1}^k (X = Z_i)))) \ \& (k \geq 2)). \end{aligned}$$

Правила индуктивного вывода, формализующие Первое правило Д.С. Милля, формулируются посредством двух предикатов $M_{a,n}^+(V,W)$ и $M_{a,n}^-(V,W)$ следующим образом:

$$\begin{aligned} (I)^+ & \frac{J_{(\tau,n)}(V \Rightarrow_2 W), M_{a,n}^+(V,W) \ \& \ \neg M_{a,n}^-(V,W)}{J_{(1,n+1)}(V \Rightarrow_2 W)}, \\ (I)^- & \frac{J_{(\tau,n)}(V \Rightarrow_2 W), \neg M_{a,n}^+(V,W) \ \& \ M_{a,n}^-(V,W)}{J_{(-1,n+1)}(V \Rightarrow_2 W)}, \\ (I)^0 & \frac{J_{(\tau,n)}(V \Rightarrow_2 W), M_{a,n}^+(V,W) \ \& \ M_{a,n}^-(V,W)}{J_{(0,n+1)}(V \Rightarrow_2 W)}, \\ (I)^\tau & \frac{J_{(\tau,n)}(V \Rightarrow_2 W), \neg M_{a,n}^+(V,W) \ \& \ \neg M_{a,n}^-(V,W)}{J_{(\tau,n+1)}(V \Rightarrow_2 W)}. \end{aligned}$$

ДСМ-рассуждения, включающие индукцию, применимы к «мирам» типа (b) таким, что они содержат позитивные и негативные факты (соответственно, $(+)$ - и $(-)$ -примеры). Факты имеют истинностные значения $\langle v, 0 \rangle$ или множество истинностных значений $(\tau, 0)$, где $v \in \{1, -1, 0\}$, а примерами являются факты или гипотезы с истинностными значениями $\langle v, n \rangle$ или (τ, n) , где $n \geq 0$.

Таким образом, (σ) -примеры представимы формулами $J_{(v,n)}(C \Rightarrow_1 Q)$, где $v \in \{1, -1, 0, \tau\}$, а $\sigma \in \{+, -, 0, \tau\}$, соответственно, а C, Q – константы. Предикаты же $M_{a,n}^+(V,W)$ и $M_{a,n}^-(V,W)$, используемые для формализации Первого правила индукции Д.С. Милля, содержат подформулы $J_{(v,n)}(Z_i \Rightarrow_1 U_i)$, где $v \in \{1, -1\}$, а Z_i и U_i – переменные сорта 1 и сорта 2, соответственно.

²⁶ См. [9], Глава 3. Д.П. Скворцов. О некоторых способах построения логических языков.

²⁷ [9]. Глава 6. Виноградов Д.В. Формализация правдоподобных рассуждений в логике предикатов. – С. 287-293.

Правила вывода $(I)^\sigma$, $\sigma \in \{+, -, 0, \tau\}$, будем называть правилами правдоподобного вывода 1-го рода (п.п.в.-1).

П.п.в.-1 удовлетворяет условиям применимости ДСМ-метода АПГ, так как содержит (ЭУ), соответствующие (+)- и (-)-примерам, (СХ) – представляющие сходство этих примеров, а также (ЭЗ) – выражающие эмпирические зависимости причинно-следственного типа.

Следующие важные свойства п.п.в.-1, формализующие процедуру индукции миллевского типа, выраженные в ДСМ-методе АПГ, формулируются ниже.

(1) Предполагается, что задана база (+)- и (-)-примеров (исходной является база фактов, представляемая формулами $J_{(1,0)}(C \Rightarrow_1 Q)$, $J_{(-1,0)}(C \Rightarrow_1 Q)$ и $J_{(\tau,0)}(C \Rightarrow_1 Q)$). Из этой базы примеров (БП) выбираются посылки для п.п.в.-1 посредством условия сходства примеров (СХ), образующие экзистенциальное условие (ЭУ). При этом требуется выполнимость условия $k \geq 2$ для нижней границы числа сходных примеров.

(2) Для выполнимости предиката $M_{a,n}^+(V,W)$ парой $\langle C, Q \rangle$ необходимо установить истинность эмпирической зависимости $(ЭЗ)^+$:

$$\forall X \forall Y ((J_{(1,n)}(X \Rightarrow_1 Y) \& (C \subseteq X)) \rightarrow \rightarrow ((Q \subseteq Y) \& (\bigvee_{i=1}^k (X=Z_i))))$$

с условием исчерпываемости обнаруженного множества сходных (+)-примеров.

Аналогично для выполнимости предиката $M_{a,n}^-(V,W)$ парой $\langle C, Q \rangle$ необходимо установить истинность $(ЭЗ)^-$:

$$\forall X \forall Y ((J_{(-1,n)}(X \Rightarrow_1 Y) \& (Q \subseteq Y)) \rightarrow \rightarrow (((C \subseteq X) \& (\bigvee_{i=1}^k (X=Z_i))))$$

с условием исчерпываемости обнаруженного множества сходных (-)-примеров.

(3) Использование оператора $J_{(v,n)}$, где $J_{(v,n)} = \bigvee_{i=1}^k J_{(v,i)}$, а $v \in \{1, -1\}$, выражает итеративность применения п.п.в.-1 к $(\pm)$ -примерам из базы примеров (БП). БП является расширением базы фактов, она представлена элементарными высказываниями $J_{(v,n)}(C_j \Rightarrow_1 Q_j)$ или $J_{(\tau,n)}(C_j \Rightarrow_1 Q_j)$, где $v \in \{1, -1\}$, $n \geq 0$, а C_j, Q_j – соответствующие индивидуальные термы.

(4) Обозначим посредством Ω_0 множество элементарных формул $J_{(v,0)}(C \Rightarrow_1 Q)$ и $J_{(\tau,0)}(C \Rightarrow_1 Q)$, где $v \in \{1, -1\}$ ²⁸, которые представляют множество фактов исходной (начальной) базы фактов БФ₀. Посредством Δ_0 обозначим множество формул вида $J_{(\tau,0)}(C \Rightarrow_2 Q)$. Пара $\langle \Omega_0, \Delta_0 \rangle$ соответствует началу итеративного процесса ДСМ-рассуждения (его базиса).

(5) Одной из целей итеративного процесса, представляющего ДСМ-рассуждения, является уменьшение неопределённости, что характеризуется рекуррентным соотношением $(\tau, n) = \{ \langle 1, n+1 \rangle,$

$\langle -1, n+1 \rangle, \langle 0, n+1 \rangle \} \cup (\tau, n+1)$, где (τ, n) является множеством возможных истинностных значений порождаемых будущих гипотез.

Отметим, что $\langle \Omega_0, \Delta_0 \rangle$ является частью начальных посылок ДСМ-рассуждений вместе с соответствующей п.п.в.-1 $(I)^\sigma$ комбинацией предикатов $M_{a,0}^+(V,W)$ и $M_{a,0}^-(V,W)$, где $\sigma \in \{+, -, 0, \tau\}$.

(6) Важной характеристикой ДСМ-рассуждений, формализующих когнитивный цикл «анализ данных – предсказание – объяснение» является **амплиативность** правил вывода, т. е. извлечение нового знания (knowledge discovery) из посылок, представляющих данные (факты и примеры).

Амплиативность п.п.в.-1 (индукции) обеспечивается строением предикатов $M_{a,n}^+(V,W)$ и $M_{a,n}^-(V,W)$, применимых к фактам и примерам, выразимым посредством предиката $X \Rightarrow_1 Y$. А именно:

(6.1) Сходство устанавливается посредством $(Z_1 \cap \dots \cap Z_k = V) \& (V \neq \emptyset)$ (СХ);

(6.2) распознаётся наличие эмпирической закономерности (ЭЗ) и условия исчерпываемости сходных примеров, что является **новым знанием**;

(6.3) п.п.в.-1 из предиката $X \Rightarrow_1 Y$, используемого в (ЭУ) и (ЭЗ), порождает новый предикат $V \Rightarrow_2 W$ (V является причиной W);

(6.4) и, наконец, имеет место теорема ДСМ-метода об обратимости правил правдоподобного вывода, и в том числе для п.п.в.-1:

$$\forall V \forall W (J_{(\tau,n)}(V \Rightarrow_2 W) \& M_{a,n}^+(V,W) \& \neg M_{a,n}^-(V,W)) \leftrightarrow \leftrightarrow J_{(1,n+1)}(V \Rightarrow_2 W)) \text{ (аналогичное имеет место для } (I)^-, (I)^0 \text{ и } (I)^\tau \text{), где } \leftrightarrow \text{ – логическая связка эквивалентности, выражающая конструктивность выведения следствия из посылок.}$$

Очевидно, что имеет место

$$\forall V \forall W (J_{(\tau,n)}(V \Rightarrow_2 W) \& M_{a,n}^+(V,W) \& \neg M_{a,n}^-(V,W)) \rightarrow \rightarrow J_{(1,n+1)}(V \Rightarrow_2 W)).$$

Приведённая выше формула в декларативном виде представляет п.п.в.-1 (индукцию) и является процедурной аксиомой квазиаксиоматической теории (КАТ), являющейся составляющей частью ДСМ-метода АПГ.

(7) Следующей особенностью формализации индукции в ДСМ-методе является встроенность фальсификации в п.п.в.-1. Это возможно в силу наличия в БП (+)- и (-)-примеров, что представимо в экзистенциальных условиях (ЭУ) для предикатов $M_{a,n}^+(V,W)$ и $M_{a,n}^-(V,W)$ и комбинирования этих предикатов для $(I)^\sigma$, где $\sigma \in \{+, -, 0, \tau\}$.

Важно отметить экспериментально установленный факт: **ДСМ-метод относительно других процедур машинного обучения имеет наименьший «шум»**, т. е. число ошибочных предсказаний в результате анализа данных посредством правил индукции $(I)^\sigma$.

Каждое из п.п.в.-1 $(I)^\sigma$ имеет посылку, являющуюся комбинацией предикатов $M_{a,n}^+(V,W)$ и $M_{a,n}^-(V,W)$ с наличием или отсутствием отрицания $\neg$. В п.п.в.-1 $(I)^+$ посылка $M_{a,n}^+(V,W) \& \neg M_{a,n}^-(V,W)$ выражает тот факт, что

²⁸ Существуют варианты ДСМ-метода такие, что $v \in \{1, -1, 0\}$. Например, при применении в социологии, где требуется представление конфликтов.

(+)-причина V не может быть результатом сходства (-)-примеров.

Аналогично и в п.п.в.-1 $(I)^-$ имеется посылка $\neg M_{a,n}^+(V, W) \& M_{a,n}^-(V, W)$, которая порождает гипотезу $J_{(-1, n+1)}(V \Rightarrow W)$, являющуюся результатом сходства (-)-примеров в БП, такую, что отсутствует сходство позитивных примеров, являющихся препятствием (-)-гипотезе.

В п.п.в.-1 $(I)^0$ имеется посылка $M_{a,n}^+(V, W) \& M_{a,n}^-(V, W)$, которая порождает гипотезу $J_{(0, n+1)}(V \Rightarrow W)$ с истинностным значением 0 – фактическое противоречие, что означает совпадение сходств (+)- и (-)-примеров, являющихся взаимным препятствием, или **конфликтом**. Это означает, что порождён **фальсификатор** – гипотеза $J_{(0, n+1)}(V \Rightarrow W)$.

В п.п.в.-1 $(I)^+$ имеется посылка $\neg M_{a,n}^+(V, W) \& \neg M_{a,n}^-(V, W)$, выражающая факт отсутствия сходств как (+)-примеров, так и (-)-примеров, что означает сохранение неопределённости в порождаемой гипотезе $J_{(\tau, n+1)}(V \Rightarrow W)$.

Эти условия соответствуют как мысли Дж. Гершеля о роли отрицательных примеров в индуктивных рассуждениях [7], так и соображению Д.С. Милля о том, что применимость пяти его индуктивных правил предполагает отсутствие препятствий – других причин, противодействующих рассматриваемым кандидатам в гипотезы о причинах [8].

Рассмотренная встроенность фальсификации в п.п.в.-1 является практической реализацией идеи К.Р. Поппера [1] о роли **фальсификации** в научных рассуждениях, названной им **критерием демаркации**.

(8) Важной особенностью формализации индукции в ДСМ-методе является условие М-полноты для $M_{a,n}^+(V, W)$ и $M_{a,n}^-(V, W)$, выражающее тот факт, что дизъюнкция комбинаций М-предикатов в посылках $(I)^0$ является общезначимой формулой. Условие М-полноты представимо формулой

$$\begin{aligned} & \forall V \forall W ((M_{a,n}^+(V, W) \& \neg M_{a,n}^-(V, W)) \vee \\ & \vee (\neg M_{a,n}^+(V, W) \& M_{a,n}^-(V, W)) \vee \\ & \vee (M_{a,n}^+(V, W) \& M_{a,n}^-(V, W)) \vee (\neg M_{a,n}^+(V, W) \& \\ & \& \neg M_{a,n}^-(V, W))). \end{aligned}$$

М-полнота п.п.в.-1 обеспечивает применение процедуры индукции во всех возможных случаях состояния базы примеров (БП).

(9) Следующей особенностью формализации индукции в ДСМ-методе АПГ является **эффективная вычислимость** истинностных значений гипотез $\langle v, n \rangle$ или множества истинностных значений (τ, n) для случаев неопределённости, где $v \in \{1, -1, 0\}$ ²⁹.

Истинностное значение $\langle 1, n+1 \rangle$ эффективно порождается в силу выполнимости $M_{a,n}^+(V, W) \& \neg M_{a,n}^-(V, W)$ парой $\langle C, Q \rangle$ на $(n+1)$ -м шаге приме-

нения п.п.в.: если $M_{a,n}^+(C, Q) \& \neg M_{a,n}^-(C, Q)$ истинна, то истинна гипотеза $J_{(1, n+1)}(C \Rightarrow Q)$, степень правдоподобия которой характеризуется $n+1$ – числом применений п.п.в. Аналогичны случаи для правил $(I)^-$, $(I)^0$ и $(I)^+$. Степень правдоподобия гипотез в ДСМ-методе АПГ выражает тот факт, что чем больше число применений правил правдоподобного вывода (п.п.в.), тем меньше степень правдоподобия гипотез.

Заметим, что областью истинности формулы $M_{a,n}^+(V, W) \& \neg M_{a,n}^-(V, W)$ будет множество $\{ \langle V, W \rangle \mid M_{a,n}^+(V, W) \& \neg M_{a,n}^-(V, W) \}$, которое представляет **множественность гипотез о причинах**, идею которой сформулировал Д.С. Милль в [8, Книга III. Индукция, Глава X. Множественность причин и смешение следствий (действий), с. 343-356].

В [27] были сформулированы методологические условия определения предикатов $M_{a,n}^+(V, W)$ и $M_{a,n}^-(V, W)$ (А) – (D).

(А) **Принцип сходства и детерминации**: сходство фактов (примеров) влечёт наличие (отсутствие) эффекта и его повторяемость.

(В) **Отсутствие препятствий (тормозов)**: если существуют сходства, являющиеся условием детерминации (согласно (А)), и отсутствуют препятствия (тормоза) её реализации, то имеет место эффект (следствие причины).

(С) **Наличие множества (+) - примеров и (-) - примеров**: для обнаружения **неявно** заданного отношения «причина – следствие» необходимо существование (+)-примеров (или (-)-примеров) отношения «объект – множество свойств», а число таких примеров k больше или равно 2 ($k \geq 2$ – изменяемый порог множества фактов, необходимый для порождения гипотез о $(\pm)$ -причинах).

(D) **Используемое множество сходных фактов (примеров), представляющих отношение «объект – множество свойств»**, должно быть **максимальным** для порождения **нового** отношения «причина – следствие».

Можно установить соответствие между идеями Д.С. Милля об индукции и принципами ДСМ-метода АПГ (А) – (D), конкретизацией которых являются необходимые компоненты предикатов сходства $M_{a,n}^+(V, W)$ – (ЭУ), (СХ), (ЭЗ) с (УИ) и число рассматриваемых сходных примеров k , а также особенности определения М-предикатов (1) – (9). Эти компоненты $M_{a,n}^+(V, W)$ и особенности (1) – (9) являются механизмом, определяющим индукцию посредством п.п.в.-1 как процедуру knowledge discovery. В силу этого п.п.в.-1 является формализацией начала когнитивного процесса «анализ данных (примеров и фактов) – предсказания - объяснения».

Таким образом, формирование посредством индукции (п.п.в.-1) гипотез о зависимостях «причина – следствие» является имитацией познавательной процедуры анализа фактов.

Следует отметить, что предикаты $M_{a,n}^+(V, W)$, где $\sigma \in \{+, -\}$, являются **минимальными** по выразитель-

²⁹ Ниже будет показано, что эффективно вычислимы и истинностные значения $\langle v, n \rangle$ в выводах по аналогии.

ной силе средствами формализации миллевской индукции, характеризуемой условиями (A) – (D). Они соответствуют Первому правилу Д.С. Милля – индуктивному методу сходства [8]. Этот факт обозначается посредством индекса «a» у предикатов $M_{a,n}^\sigma(V, W)$, ибо он начальная буква термина «agree-ment», который использовал Д.С. Милль³⁰.

Заметим также, что второй индекс «n» предикатов $M_{a,n}^\sigma(V, W)$ представляет параметр числа применений правил правдоподобного вывода. Ранее было сказано, что параметр n выражает степень правдоподобия порождаемых гипотез и входит в качестве компоненты в истинностные значения гипотез $\bar{V} = \langle v, n+1 \rangle$ и в $(\tau, n+1)$ – множества истинностных значений.

Таким образом, п.п.в.-1 представлено семейством предикатов $M_{a,n}^\sigma(V, W)$, где $\sigma \in \{+, -\}$, а $n \in \mathbb{N}$, $\mathbb{N}$ – множество натуральных чисел ($n = 0, 1, \dots, n, \dots$). Следовательно, п.п.в.-1 задано множеством правил $(I)_n^\sigma$, зависящих от параметра n .

Сформулируем теперь несколько возможных добавок к предикатам $M_{a,n}^\sigma(V, W)$, которые являются усилением их выразительной силы [27]. Эти усиления уменьшают множества порождаемых гипотез, но делают эти гипотезы более информативными.

Будем называть $M_{a,n}^\sigma(V, W)$ предикатами **простого сходства**.

Рассмотрим дополнительное условие $(b)^+$, усиливающее предикат простого положительного сходства $M_{a,n}^+(V, W)$:

$$(b)^+ \forall X \forall Y ((V \subset X) \& (W \subseteq Y)) \rightarrow \\ \rightarrow (J_{(1,n)}(X \supset_1 Y) \vee J_{(\tau,n)}(X \supset_1 Y)) .$$

$(b)^+$ выражает тот факт, что предполагаемая причина V и её следствие W не содержатся в $(-)$ -примерах и примерах с истинностным значением $\langle 0, n \rangle$, выражающим фактическое противоречие.

Аналогично определим усиление предиката $M_{a,n}^-(V, W)$ посредством добавки $(b)^-$.

$$(b)^- \forall X \forall Y ((V \subset X) \& (W \subseteq Y)) \rightarrow \\ \rightarrow (J_{(-1,n)}(X \supset_1 Y) \vee J_{(\tau,n)}(X \supset_1 Y)) ,$$

Заметим, что формула

$$\forall X \forall Y (J_{(1,n)}(X \supset_1 Y) \vee J_{(-1,n)}(X \supset_1 Y) \vee \\ \vee J_{(0,n)}(X \supset_1 Y) \vee J_{(\tau,n)}(X \supset_1 Y))$$

является общезначимой.

$(b)^+$ и $(b)^-$ естественно назвать условием **запрета на контрпримеры**.

Соответственно, определим предикаты сходства с запретом на контрпримеры:

$$M_{ab,n}^+(V, W) = M_{a,n}^+(V, W) \& (b)^+ ,$$

$$M_{ab,n}^-(V, W) = M_{a,n}^-(V, W) \& (b)^- .$$

Введём в рассмотрение ещё одно усиление предикатов простого сходства $M_{a,n}^\sigma(V, W)$ – условие **единственности** $(+)$ -причины $(e)^+$.

$$(e)^+ \forall Z (M_{a,n}^+(Z, W) \rightarrow Z=V)$$

$(e)^+$ выражает тот факт, что следствие W имеет единственную причину V .

Аналогично формулируется и

$$(e)^- \forall Z (M_{a,n}^-(Z, W) \rightarrow Z=V) .$$

Следующей добавкой к $M_{a,n}^+(V, W)$ является его усиление посредством условия, соответствующего методу различия Д.С. Милля – его Второму правилу индуктивного вывода ([8]).

Второе правило. Если случай, в котором исследуемое явление наступает и случай, в котором оно не наступает, сходны во всех обстоятельствах, кроме одного, встречающегося лишь в первом случае, то это обстоятельство, в котором одном только и разнятся эти два случая, есть следствие, или причина, или необходимая часть причины явления.

Имеются несколько возможных формализаций метода различия Д.С. Милля посредством языка ДСМ-метода АПГ [27]. Одна из них – почти буквальный перевод Второго правила в язык ДСМ-метода АПГ (ДСМ-язык), представленный предикатами $D^+(V, W)$ и $D^-(V, W)$ и соответствующими правилами правдоподобного вывода $(I)_d^\sigma$, $\sigma \in \{+, -, 0, \tau\}$. Как показала А.Ю. Волкова [29, 30], экспериментальная проверка этих правил не порождает гипотез на тестовых массивах данных. Это объясняется нарушением принципа сходства и детерминации (A): во Втором правиле представлены знания лишь для двух случаев – позитивного и негативного – но не выражено сходство позитивных примеров.

Этот дефект устраняется в Третьем правиле индуктивного вывода Д.С. Милля [8], что отражено в его формализации средствами ДСМ-метода АПГ в [27]. Упрощение этого правила осуществляется посредством добавки d_0^+ , присоединяемой к предикату $M_{a,n}^+(V, W)$:

$$d_0^+ = \forall X \forall Y \forall Z \forall U ((J_{(1,n)}(X \supset_1 Y) \& (W \subseteq Y) \& (V \subset X) \& \\ \& ((X \setminus V) \subset Z) \& ((X \setminus V) \neq \emptyset \& \neg (V \subset Z))) \rightarrow \\ \rightarrow (\neg J_{(1,n)}(Z \supset_1 U) \vee \neg (W \subseteq U))) .$$

Метод различия формализуется посредством предиката $M_{ad_0,n}^+(V, W)$, где

$$M_{ad_0,n}^+(V, W) = M_{a,n}^+(V, W) \& (d_0^+) .$$

Заметим, что стандартные компоненты миллевской индукции (ЭУ), (CX), (ЭЗ) с (УИ) и k – число сходных $(+)$ -примеров ($k \geq 2$) входят в определение $M_{a,n}^+(V, W)$. Однако они отсутствуют в определениях предикатов $D^+(V, W)$ и $D^-(V, W)$ [27].

³⁰ Более естественным, кажется, называть $M_{a,n}^\sigma(V, W)$ предикатами сходства (similarity), а не согласия (agreement).

Рассмотрим два типа добавок к позитивному и негативному предикатам простого сходства, соответственно, A^+ и A^- , где

$$\begin{aligned} A^+ &= \{ \{a^+\}, \{a^+, b^+\}, \{a^+, d_0^+\}, \{a^+, e^+\} \}, \\ A^- &= \{ \{a^-\}, \{a^-, b^-\}, \{a^-, e^-\} \}, \\ 2^{A^+} &= \{ \{a^+\}, \{a^+, b^+\}, \{a^+, d_0^+\}, \{a^+, e^+\}, \\ &\quad \{a^+, b^+, d_0^+\}, \{a^+, b^+, e^+\}, \{a^+, d_0^+, e^+\}, \\ &\quad \{a^+, b^+, d_0^+, e^+\} \}, \\ 2^{A^-} &= \{ \{a^-\}, \{a^-, b^-\}, \{a^-, e^-\}, \{a^-, b^-, e^-\} \}. \end{aligned}$$

Очевидно, что A^+ и A^- являются центрированными множествами, а 2^{A^+} и 2^{A^-} – носителями булевских алгебр

$$\mathcal{B}_+ = \langle 2^{A^+}, \{a^+\}, \{a^+, b^+, d_0^+, e^+\}, -, \cap, \cup \rangle,$$

$$\mathcal{B}_- = \langle 2^{A^-}, \{a^-\}, \{a^-, b^-, e^-\}, -, \cap, \cup \rangle,$$

где $\{a^+\}$ и $\{a^-\}$ – нули соответствующих алгебр.

Так как 2^{A^+} и 2^{A^-} – частично упорядоченные множества отношением $\subseteq$, то им соответствуют диаграммы (рис. 1, рис. 2)

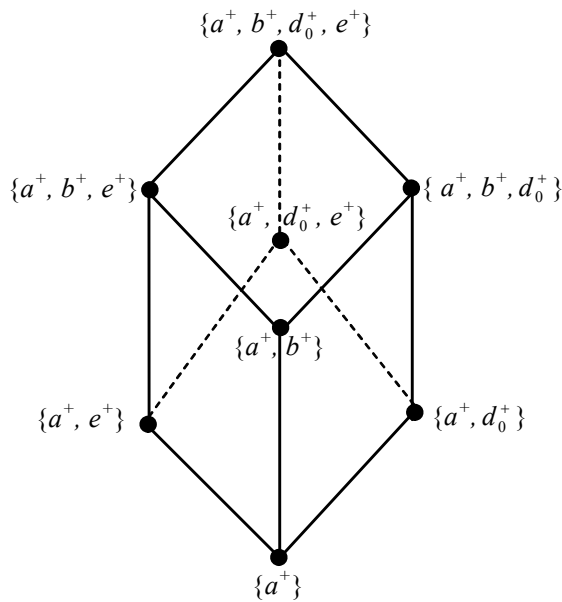


Рис. 1

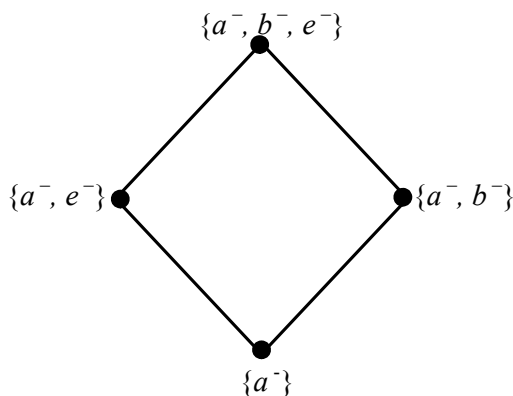


Рис. 2

Пусть $\mathcal{F}^+ = \{a^+, b^+, d_0^+, e^+\}$ и $\mathcal{F}^- = \{a^-, b^-, e^-\}$. Будем рассматривать подмножества x и y такие, что $x \subseteq \mathcal{F}^+$ и $a^+ \in x$, а $y \subseteq \mathcal{F}^-$ и $a^- \in y$. Тогда стратегией ДСМ-метода $\text{Str}_{x,y}$ будем называть множество правил $(I)_n^\sigma$, где $\sigma \in \{+, -, 0, \tau\}$, а $n \in \mathbb{N}$ таких, что они образованы четырьмя возможными комбинациями предикатов $M_{x,n}^+(V, W)$ и $M_{y,n}^-(V, W)$, характеризуемых распределением отрицаний ($\neg$) или их отсутствием (например, $M_{x,n}^+(V, W) \& M_{y,n}^-(V, W)$ для $(I)_n^0$).

Таким образом, в $\text{Str}_{x,y}$ $x \in 2^{A^+}$ и $y \in 2^{A^-}$, где x и y – элементы булевых алгебр $\mathcal{B}_+$ и $\mathcal{B}_-$, соответственно. Следовательно, $\text{Str}_{x,y}$ определяются парой элементов булевых алгебр $\mathcal{B}_+$ и $\mathcal{B}_-$.

Заметим, что минимальными миллевскими индуктивными методами являются позитивный и негативный методы простого сходства [27], которым соответствуют нули булевых алгебр $\mathcal{B}_+$ и $\mathcal{B}_-$ (a^+ и a^-).

Естественно определить множество стратегий $\overline{\text{Str}}$ следующим образом:

$$\overline{\text{Str}} = \{ \text{Str}_{x,y} \mid (x \in 2^{A^+}) \& (y \in 2^{A^-}) \}.$$

Очевидно, что данное определение ограничено заданием A^+ и A^- , что может быть расширено добавлением новых условий к простым методам сходства a^+ и a^- [27, 28].

Заметим, что приведённый выше класс стратегий $\overline{\text{Str}}$ относится только к слабым миллевским индуктивным методам, определённым в [27]. В [27] были определены элементарные (немиллевские) дополнительные условия такие, что они не представимы посредством соединения компонент (ЭУ), (СХ), (ЭЗ) и (УИ) и нижней границы числа сходных примеров k ($k \geq 2$). Примерами элементарных дополнительных условий являются рассмотренные выше b^σ , e^σ , где $\sigma \in \{+, -\}$, и d_0^+ , которым соответствуют $\mathcal{B}_+$ и $\mathcal{B}_-$. Однако имеются неэлементарные (миллевские) дополнительные условия такие, что они содержат компоненты (ЭУ), (СХ), (ЭЗ) и (УИ), а также нижнюю границу сходных примеров. Таковыми являются (d_1) и (d_2) , представляющие метод соединённого сходства – различия [27] и индуктивный метод остатков [28], формализующие Третье и Четвёртое правила Д.С. Милля [8]. К неэлементарным (миллевским) индуктивным методам следует отнести метод сопутствующих изменений, формализованный в [28]. Он является аналогом Пятого правила Д.С. Милля [8].

Таким образом, множество стратегий $\overline{\text{Str}}$, определённое выше, представляет элементарные индуктивные методы, формализованные посредством ДСМ-рассуждений.

Каждой $\text{Str}_{x,y}$ соответствуют п.п.в.-1:

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

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

$$(I)_{x,y}^0 \frac{J_{(\tau,n)}(V \Rightarrow_2 W), M_{x,n}^+(V, W) \& M_{y,n}^-(V, W)}{J_{(0,n+1)}(V \Rightarrow_2 W)}$$

$$(I)_{x,y}^\tau \frac{J_{(\tau,n)}(V \Rightarrow_2 W), \neg M_{x,n}^+(V, W) \& \neg M_{y,n}^-(V, W)}{J_{(\tau,n+1)}(V \Rightarrow_2 W)}.$$

Рассмотрим $\text{Str}_{ab,ab}$ с добавками b^+ и b^- . Имеют место следующие утверждения:

$$\forall V \forall W (M_{ab,n}^+(V, W) \rightarrow \neg M_{ab,n}^-(V, W)),$$

$$\forall V \forall W (M_{ab,n}^-(V, W) \rightarrow \neg M_{ab,n}^+(V, W))$$

([21], Глава 4, с. 355).

Тогда легко получить упрощение для п.п.в.-1:

$$(I)_b^+ \frac{J_{(\tau,n)}(V \Rightarrow_2 W), M_{ab,n}^+(V, W)}{J_{(1,n+1)}(V \Rightarrow_2 W)}$$

$$(I)_b^- \frac{J_{(\tau,n)}(V \Rightarrow_2 W), M_{ab,n}^-(V, W)}{J_{(-1,n+1)}(V \Rightarrow_2 W)}$$

$$(I)_b^\tau \frac{J_{(\tau,n)}(V \Rightarrow_2 W), \neg M_{ab,n}^+(V, W) \& \neg M_{ab,n}^-(V, W)}{J_{(\tau,n+1)}(V \Rightarrow_2 W)}.$$

Условие М-полноты сохраняется, так как

$$\forall V \forall W (M_{ab,n}^-(V, W) \vee M_{ab,n}^+(V, W) \vee \vee$$

$$(\neg M_{ab,n}^+(V, W) \& \neg M_{ab,n}^-(V, W)))$$

является общезначимой формулой.

Если $b^+ \in x$ и $b^- \in y$, то $(I)_{x,y}^\sigma$, где $\sigma \in \{+, -, \tau\}$ и $x \subseteq \mathcal{F}^+$, $y \subseteq \mathcal{F}^-$, также состоит из п.п.в.-1 $(I)_{x,y}^+$, $(I)_{x,y}^-$ и $(I)_{x,y}^\tau$ (без $(I)^0$).

Сделаем важное замечание, уточняющее условие применимости ДСМ-метода АПГ. Рассмотрим следующую схему анализа данных, подобную тем, которые использовал Д.С. Милль при формулировках своих индуктивных методов [8]:

$$\{A, B, C\} \Rightarrow_1 \{a, b, d_1\},$$

$$\{A, B, D\} \Rightarrow_1 \{a, b, d_2\},$$

$$\{A, B, E\} \Rightarrow_1 \{c, e_1\},$$

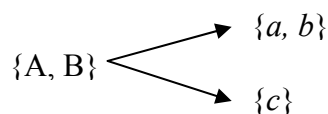
$$\{A, B, F\} \Rightarrow_1 \{c, e_2\},$$

$$\{A, B\} \Rightarrow_2 \{a, b\},$$

$$\{A, B\} \Rightarrow_2 \{c\},$$

которая задана посредством четырёх посылок и двух заключений.

Заключения $\{A, B\} \Rightarrow_2 \{a, b\}$ и $\{A, B\} \Rightarrow_2 \{c\}$ не могут быть получены посредством п.п.в.-1 из-за невыполнимости условия эмпирической зависимости (ЭЗ). Это условие запрещает соответствие



(ЭЗ) с (УИ), входящая в $M_{a,0}^+(V, W)$, выражает тот факт, что заключению п.п.в.-1 $J_{(1,1)}(V \Rightarrow_2 W)$

соответствует отношение R_1^+ , образованное множеством пар $\langle C, Q \rangle$, где C, Q – индивидные константы.

Отношение R_1^+ в БП имеет подмножество KR_1^+ , $KR_1^+ \subseteq R_1^+$ такое, что оно порождено парами $\langle C, Q \rangle$

такими, что $W = \bigcap_{i=1}^k Y_i$, где Q – значение переменной W ,

а C – значение переменной V . Из определения $M_{a,0}^+(V, W)$ следует, что $W \subseteq Y_1, \dots, W \subseteq Y_k$, а Y_i входят в экзистенциальное условие (ЭЗ), $i = 1, \dots, k$.

KR_1^+ соответствует подмножеству гипотез $J_{(1,1)}(V \Rightarrow_2 W)$, порождённых посредством п.п.в.-1.

Отношение KR_1^+ является функциональным, что характеризуется утверждением

$$\forall V \exists! W J_{(1,1)}(V \Rightarrow_2 W),$$

где квантор $\exists! W$ («существует, и притом единственное, W ») определяется следующим образом:

$$\exists! W \varphi(V, W) \equiv \exists W (\varphi(V, W) \&$$

$$\& \forall U (\varphi(V, U) \rightarrow W=U)).$$

Это означает, что соответствующему подмножеству гипотез о (+)-причинах соответствует функциональное отношение KR_1^+ , где $W=f(V)$.

Условие функциональности KR_1^+ можно использовать как тест на применимость ДСМ-рассуждений к заданной БФ.

Функциональность KR_1^+ имеет место и для $\text{Str}_{x,y}$ с предикатами $M_{x,0}^+(V, W)$, где $x \subseteq \mathcal{F}^+$ и $a^+ \in x$.

Заметим также, что функциональность R_1^+ для любого $n \geq 1$ сохраняется, если $|W| = 1$, т. е. множество свойств $Y_i, i = 1, \dots, k$, является одноэлементным.

Ещё раз напомним, что ДСМ-метод АПГ имитирует и формализует естественный познавательный процесс «анализ данных – предсказание – объяснение». Было показано выше, что п.п.в.-1 (индукция) формализует первый шаг ДСМ-рассуждения, имитирующий анализ данных, содержащихся в базе фактов (БФ) интеллектуальной системы (ИС). Вторым же шагом ДСМ-рассуждения, имитирующим **предсказание**, является вывод по **анalogии**, формализуемый посредством правил правдоподобного вывода – $(\Pi)^\sigma$ (п.п.в.-2), определяемых ниже.

Посылки п.п.в.-2 используют предикаты $\Pi_n^\sigma(V, W)$, где $\sigma \in \{+, -, 0, \tau\}$. Предикаты $\Pi_n^+(V, W)$ и $\Pi_n^-(V, W)$ определяются посредством параметрических предикатов $\tilde{\Pi}_n^\sigma(V, W, k)$, где k – параметр, выражающий число порожденных гипотез, представленных формулами $J_{(1,n)}(X_i \Rightarrow_2 Y_i)$ и $J_{(-1,n)}(X_i \Rightarrow_2 Y_i)$, которые являются подформулами $\tilde{\Pi}_n^\sigma(V, W, k)$, где $i = 1, \dots, k$.

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

ми $Y_1, \dots, Y_k$. Следовательно, $W = Y_1 \cup \dots \cup Y_k$, где k – параметр.

Это условие выразимо формулой

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

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

$$(2) \forall U (((U \subseteq W) \& (U \neq \emptyset)) \rightarrow \neg \exists Z ((J_{(-1,n)}(Z \Rightarrow_2 U) \vee J_{(0,n)}(Z \Rightarrow_2 U)) \& (Z \subset V))).$$

Определим теперь предикат, представляющий посылку вывода по **аналогии** для (+)-примеров из БФ:

$$\Pi_n^+(V, W) \Leftarrow \exists k \tilde{\Pi}_n^+(V, W, k),$$

где

$$\tilde{\Pi}_n^+(V, W, k) \Leftarrow \exists Y_1 \dots \exists Y_k (((\bigwedge_{i=1}^k \exists X_i (J_{(1,n)}(X_i \Rightarrow_2 Y_i) \& (X_i \subset V))) \& (\bigcup_{i=1}^k Y_i = W)) \& \forall U (((U \subseteq W) \& (U \neq \emptyset)) \rightarrow \neg \exists Z ((J_{(-1,n)}(Z \Rightarrow_2 U) \vee J_{(0,n)}(Z \Rightarrow_2 U)) \& (Z \subset V))).$$

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

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

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

Из определений $\Pi_n^\sigma(V, W)$, где $\sigma \in \{+, -, 0, \tau\}$, следуют утверждения (а) и (б):

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

Из определения $\Pi_n^\tau(V, W)$ и утверждений (а) и (б) следует противоречивость $\Pi_n^{\sigma_1}(V, W)$ и $\Pi_n^{\sigma_2}(V, W)$ для $\sigma_1 \neq \sigma_2$ и $\sigma_1, \sigma_2 \in \{+, -, 0, \tau\}.$

Правила правдоподобного вывода для аналогии – п.п.в.-2 – формулируются следующим образом:

$$\begin{aligned} (\Pi)^+ & \frac{J_{(\tau,n)}(V \Rightarrow_1 W), \Pi_n^+(V, W)}{J_{\langle 1, n+1 \rangle}(V \Rightarrow_1 W)}, \\ (\Pi)^- & \frac{J_{(\tau,n)}(V \Rightarrow_1 W), \Pi_n^-(V, W)}{J_{\langle -1, n+1 \rangle}(V \Rightarrow_1 W)}, \\ (\Pi)^0 & \frac{J_{(\tau,n)}(V \Rightarrow_1 W), \Pi_n^0(V, W)}{J_{\langle 0, n+1 \rangle}(V \Rightarrow_1 W)}, \\ (\Pi)^\tau & \frac{J_{(\tau,n)}(V \Rightarrow_1 W), \Pi_n^\tau(V, W)}{J_{\langle \tau, n+1 \rangle}(V \Rightarrow_1 W)}. \end{aligned}$$

Так как гипотезы о $(\pm)$ -причинах, входящие в $\Pi_n^\sigma(V, W)$, порождаются посредством предикатов

$M_{x,n}^+(V, W)$ и $M_{y,n}^-(V, W)$, где $x \subseteq \mathcal{F}^+$ и $y \subseteq \mathcal{F}^-$, то $\text{Str}_{x,y}$ – стратегия ДСМ-рассуждения – характеризуется парой $\langle M_{x,n}^+(V, W), M_{y,n}^-(V, W) \rangle$. Поэтому информативным обозначением Π^σ -предикатов будет $\Pi_{(x,y),n}^\sigma(V, W)$, но ради простоты записи индекс (x, y) будем опускать.

Рассмотрим предикат $\Pi_n^+(V, W)$. Из его определения следует, что он содержит условие

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

в которое входят подформулы $J_{(1,n)}(X_i \Rightarrow_2 Y_i)$, представляющие гипотезы о (+)-причинах. Эти гипотезы порождены п.п.в.-1 (индукцией) и являются результатом анализа данных в базе примеров (БП).

Формулы $J_{(1,n)}(X_i \Rightarrow_2 Y_i)$ используются для представления сходства (+)-примеров посредством условия (СХ) из определения $M_{x,n}^+(V, W)$. Поэтому следствие п.п.в.-2 $J_{\langle 1, n+1 \rangle}(V \Rightarrow_1 W)$ имеет сходство с (+)-примерами из БП, выразимое посредством (+)-гипотез $J_{(1,n)}(X_i \Rightarrow_2 Y_i)$ (точнее, их реализаций посредством констант C_i и Q_i в $J_{(1,n)}(C_i \Rightarrow_2 Q_i)$), где $i = 1, \dots, k$.

Таким образом, $J_{\langle 1, n+1 \rangle}(V \Rightarrow_1 W)$ **аналогичен** (+) – примерам, которые породили гипотезы $J_{(1,n)}(X_i \Rightarrow_2 Y_i)$ (эти (+)-примеры представлены посредством предиката $X \Rightarrow_1 Y$). Следовательно, п.п.в.-2 есть **вывод по аналогии**. Подобным образом можно рассмотреть и определение $\Pi_n^-(V, W)$.

Итогом этих рассуждений является **Утверждение A_n** : правила правдоподобного вывода 2-го рода $(\Pi)^+$ и $(\Pi)^-$ являются правилами вывода по аналогии [21] (§7, Вывод по аналогии и индуктивное обобщение в JSM-рассуждении, с. 206-211).

Заметим, что это утверждение основано на теореме обратимости правил ДСМ-метода АПГ ([9], Глава 5, с. 240-286).

$\forall V \forall W (J_{\langle 1, m+1 \rangle}(V \Rightarrow_2 W) \leftrightarrow M_{a,m}^+(V, W) \& \neg M_{a,m}^-(V, W) \& (J_{(\tau,m)}(V \Rightarrow_2 W)))$, где « $\leftrightarrow$ » – логическая связка эквиваленции.

Рассуждения, подобные предыдущим, показывают, что предикат $\Pi_n^0(V, W)$ также представляет посылку вывода по аналогии, так как в определении $\Pi_n^0(V, W)$ содержатся подформулы $J_{(1,n)}(X_1 \Rightarrow_2 Y_1)$, $J_{(-1,n)}(X_2 \Rightarrow_2 Y_2)$, $J_{(0,n)}(X \Rightarrow_2 Y)$, а для $J_{(0,i)}(X \Rightarrow_2 Y)$, где $i = 1, \dots, n$, также имеет место теорема обратимости и для п.п.в.-1 (I)⁰.

Охарактеризуем теперь первый этап ДСМ-рассуждений, формализующий и имитирующий часть познавательного процесса «анализ данных (индукция) – предсказание (аналогия)».

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

Тактом ДСМ-рассуждения будем называть упорядоченное последовательное применение п.п.в.-1 и п.п.в.-2.

Этапом I ДСМ-рассуждения будем называть последовательное применение тактов (п.п.в.-1 $\rightarrow$ п.п.в.-2)₁ $\rightarrow$ (п.п.в.-1 $\rightarrow$ п.п.в.-2)₂ $\rightarrow$... (п.п.в.-1 $\rightarrow$ п.п.в.-2)_n такое, что множество порожденных гипотез на такте n совпадает с множеством гипотез, порожденных на такте $n + 1$, где n – номер первого такого совпадения [21, Глава 2, с. 65].

Так как определение предикатов $\Pi_n^\sigma(V, W)$ зависит от предикатов $M_{x,n}^+(V, W)$ и $M_{y,n}^-(V, W)$, то следует учитывать выбор $\text{Str}_{x,y}$, посредством которых порождаются гипотезы, порождающие предикат $X \Rightarrow_2 Y$.

Возможны два случая применения п.п.в.-2 – предсказаний посредством вывода по аналогии, использующего посылки с $\Pi_n^\sigma(V, W)$. Рассмотрим первый случай такой, что x и y находятся во взаимно-однозначном соответствии, где $x \subseteq \mathcal{F}^+$ и $y \subseteq \mathcal{F}^-$, а x и y характеризуют $\text{Str}_{x,y}$, которые могут быть представлены диаграммами частично упорядоченных множеств 2^{A^+} и 2^{A^-} (см. рис. 1 и рис. 2).

Определим отображение $h: \mathcal{F}^- \rightarrow \mathcal{F}^+$ следующим образом: $h(a^-) = a^+$, $h(b^-) = b^+$, $h(e^-) = e^+$.

Пусть $x = \{x_1, \dots, x_m\}$ и $y = \{y_1, \dots, y_m\}$, тогда $|x| = |y|$, где $|x|$, $|y|$ – числа элементов x и y . Пусть, далее, имеет место условие (*):

$$\forall y_i \exists x_i ((y_i \subseteq \mathcal{F}^-) \& (y_i \subseteq y) \& (x_i \subseteq \mathcal{F}^+) \& |x| = |y|) \rightarrow \rightarrow ((x_i \subseteq x) \& (h(y_i) = x_i)).$$

Тогда $\Pi_n^\sigma(V, W)$ такой, что все его подформулы $J_{(v,n)}(X_j \Rightarrow_2 Y_j)$, где $v \in \{1, -1, 0\}$, а $j = 1, \dots, k$, порождены $\text{Str}_{x,y}$, будем называть **однородными**. Соответствующую $\text{Str}_{x,y}$ будем также называть **однородной** и писать $\text{Str}_{x,x}$.

Неоднородной стратегией $\text{Str}_{x,y}$ и **неоднородным** предикатом $\Pi_n^\sigma(V, W)$ будем называть $\text{Str}_{x,y}$ и $\Pi_n^\sigma(V, W)$ такие, что не выполняется условие (*). Следовательно, найдутся x_i и y_i такие, что $x_i \subseteq x$, $y_i \subseteq y$ и $h(y_i) \neq x_i$.

Наименьшей стратегией будем называть однородную стратегию $\text{Str}_{a,a}$, образованную простыми методами сходства, которые соответствуют методу сходства Д.С. Милля, определяемому его Первым правилом.

Введём обозначения $\Pi_{(x,y),n}^\sigma(V, W)$ для предиката $\Pi_n^\sigma(V, W)$, соответствующего $\text{Str}_{x,y}$, где $\sigma \in \{+, -, 0, \tau\}$.

Тогда можно определить предикат $\bar{\Pi}_n^\sigma(V, W) = \Pi_{(x_1,y_1),n}^\sigma(V, W) \vee \Pi_{(x_2,y_2),n}^\sigma(V, W)$. Информативным является случай, когда пары $\langle x_1, y_1 \rangle$ и $\langle x_2, y_2 \rangle$ являются несравнимыми, где $x_1, x_2 \in 2^{A^+}$, а $y_1, y_2 \in 2^{A^-}$.

Очевидно, что посредством $\bar{\Pi}_n^\sigma(V, W)$ можно увеличить число информативных предсказаний, т. е. (σ) -гипотез, где $\sigma \in \{+, -, 0\}$.

Рассмотрим пары гипотез $J_{\langle v, l \rangle}(C \Rightarrow_1 Q)$, $J_{\langle \mu, m \rangle}(C \Rightarrow_1 Q)$ и $J_{\langle v, l \rangle}(C' \Rightarrow_2 Q)$, $J_{\langle \mu, m \rangle}(C' \Rightarrow_2 Q)$, соответственно, такие, что $v \neq \mu$ и $v, \mu \in \{1, -1, 0\}$. Тогда пары этих гипотез будем называть **противоречивыми**.

Пусть задано исходное множество фактов Ω_0 , образующее базу фактов БФ₀, где $\Omega_0 = \Omega_0^+ \cup \Omega_0^- \cup \Omega_0^\tau$.

Предикаты $\bar{\Pi}_n^\sigma(V, W)$, где $\sigma \in \{+, -, 0, \tau\}$, будем называть **корректными**, если для заданного n не существует пар противоречивых гипотез для $\Rightarrow_1$ или $\Rightarrow_2$.

ДСМ-рассуждение с предикатами $\bar{\Pi}_n^\sigma(V, W)$ будем называть **корректным**, если $\bar{\Pi}_n^\sigma(V, W)$ являются корректными.

Алгоритм распознавания корректности предикатов $\bar{\Pi}_n^\sigma(V, W)$ может быть сформулирован посредством сравнения соответствующих пар гипотез.

В [8] (Книга III. Индукция, Глава XX. Аналогия, с. 428-432) Д.С. Милль рассматривает умозаключения по аналогии, которые характеризуются сходством вещей так, что если утверждение истинно относительно одной вещи, то имеется вероятность, что соответствующее утверждение будет иметь место для сходной вещи. В отличие от Дж. Гершеля [7], он не устанавливал необходимой связи между индукцией и аналогией. Заметим, что в ДСМ-рассуждении формулируется необходимая связь индукции (п.п.в.-1) и аналогии (п.п.в.-2), которая имитирует и формализует познавательный процесс «анализ данных (индукция) – предсказание (аналогия)». Эта необходимая связь выражима посредством использования гипотез $J_{(v,n)}(X_i \Rightarrow_2 Y_i)$, которые входят в $\Pi_n^\sigma(V, W)$ как их подформулы ($\sigma \in \{+, -, 0\}$).

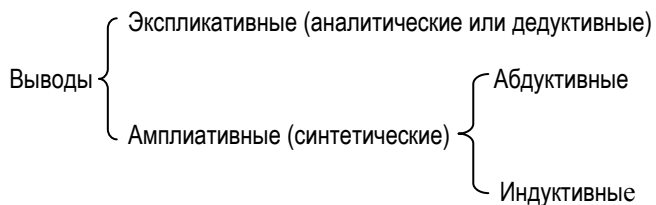
Вхождение гипотез с предикатом причинности $\Rightarrow_2$ в предикаты аналогии $\Pi_n^\sigma(V, W)$ является средством **вынуждения** эффекта W в силу включения X_i в V ($X_i \subset V$) таких, что $J_{(v,n)}(X_i \Rightarrow_2 Y_i)$, $i = 1, \dots, k$, а $\cup Y_i = W$.

Таким образом, п.п.в.-2 (аналогия в ДСМ-рассуждении) представляет каузальное вынуждение эффекта W гипотезами о причинах, порождённых п.п.в.-1 (индукцией в соответствующей $\text{Str}_{x,y}$). Поэтому п.п.в.-2 являются каузальной аналогией, образующей амплиативный вывод с получением **нового знания** (knowledge discovery) такой, что заключение не содержится в явном виде в исходных данных.

Таким образом, взаимодействие п.п.в.-1 (индукции) и п.п.в.-2 (анalogии) образует первый этап ДСМ-рассуждения – Этап I. Этап II имитирует и формализует объяснение результатов, полученных интеллектуальной системой, завершая имитацию познавательного цикла «анализ данных – предсказание – объяснение». Объяснение осуществляется посредством абдукции, которая является специальной процедурой анализа гипотез, порождённых из базы фактов. Идея абдукции была предложена Ч.С. Пирсом (C.S. Peirce). Он полагал, что идея абдукции расширяет возможности логики как науки о рассуждении [38]. Многочисленные исследователи творчества Ч.С. Пирса отличали различные толкования им идеи абдукции, которые, бу-

дучи глубокими и важными, к сожалению, были фрагментарными [39].

Важно отметить, что Ч.С. Пирс впервые в истории логики сформулировал необходимость изучения взаимодействия различных познавательных процедур, включающих амплиативные выводы, для knowledge discovery. Эта новаторская идея представлена в его классификации логических выводов [40]:



В некоторых текстах Ч.С. Пирс процесс взаимодействия познавательных процедур характеризует как последовательное применение трёх шагов – абдукции, дедукции и индукции [41].

Первым шагом является абдукция, которую он также называет ретродукцией [38]. Результатом абдукции является образование объяснённых гипотез. Он характеризует абдукцию двойственным образом. С одной стороны, она является **догадкой** (предположением), инстинктивной формулировкой утверждения о законе; с другой стороны, он утверждает, что абдукция есть **логическая операция**, которая вводит новую идею²⁶.

Первый шаг познавательного процесса (абдукция), согласно Ч.С. Пирсу, предлагает нечто, что **может быть**.

Вторым шагом является **дедукция**, порождающая множество необходимых следствий, которые должны показать, что догадка истинна. Дедукция доказывает, что нечто **должно быть**.

Третий шаг познавательного процесса осуществляет выбор тех следствий, которые экспериментально установлены. Этот шаг называется **индукцией**. Индукция показывает, что нечто **действительно есть**.

Изложенное направление мыслей Ч.С. Пирса является свидетельством его поиска описания познавательного процесса с логической точки зрения, допускающей психологические компоненты, как синтеза познавательных процедур.

Многие исследователи идей Ч.С. Пирса об абдукции [42, 43, 26] обсуждают его очень важный текст [44]:

- (1) The surprising fact C is observed;
- (2) If H were true, C would be a matter of course;
Hence,
- (3) There is a reason to suspect that H is true.

Имеются изменённые формулировки этого текста, в которых указывается, что H более экономичная (или наилучшая) гипотеза [42]. Кроме того, имеется

формулировка в [45], уточняющая схему абдуктивного вывода из [44]:

- (1) D – множество фактов,
- (2) H – множество гипотез,
- (3) H объясняют D

Всякая h, такая, что $h \in H$, является правдоподобной.

Эта структура абдуктивного вывода может быть усилена посредством посылки

- (4) H – множество наилучших гипотез, объясняющих D [45].

Весьма продвинутой и формализованной уточнением идеи абдукции Ч.С. Пирса является конструкция, погружающая абдуктивный вывод формулы ϕ из множества Σ в такую конструкцию, в которой добавленная к Σ формула ψ обеспечивает вывод ϕ из Σ, ψ . При этом предполагается, что Σ, ψ и Σ, ϕ непротиворечивы, соответственно, а ϕ не выводится из Σ и ϕ также не выводится из ψ .

Систематическая формализация такого подхода к пониманию абдукции содержится в книге A. Aliseda [26], в которой также обстоятельно обсуждаются эпистемологические идеи Ч.С. Пирса, имеющие отношение к пониманию абдукции.

Вопрос о том, в какой мере интерпретации и формализации учения Ч.С. Пирса об абдукции соответствуют его замыслам и интуиции, является весьма дискуссионным. Ответы на этот вопрос, по-видимому, могут быть даны не только посредством элегантных и корректных логических конструкций, но также и посредством практических реализаций в системах искусственного интеллекта, что соответствует роли эксперимента в философии прагматизма Ч.С. Пирса.

В [42] имеется, как нам кажется, важная ссылка на одно из определений абдукции Ч.С. Пирса²⁷. Использование идеи абдукции и соответствующей процедуры **принятия** порождённых гипотез в ДСМ-методе АПГ соответствует этой характеристике абдукции. Важно отметить, что абдуктивная процедура ДСМ-метода, определяемая ниже, уточняет схему абдуктивного вывода из [45] и соответствует идее Ч.С. Пирса о взаимодействии индукции, дедукции и абдукции как шагов познавательного процесса.

Применение абдукции в ДСМ-рассуждении образует его Этап II и следует за Этапом I, который состоит из итеративного применения п.в.п.-1 (индукции) и п.п.в.-2 (аналогии).

Сформулируем теперь принципы формализации абдукции в ДСМ-методе АПГ **P1 – P5**.

P1. Определяемая процедура абдукции как средства **принятия** порождённых гипотез на Этапе I ДСМ-рассуждения имеет место при выполнении условий применимости ДСМ-рассуждений, а именно:

- (1) База фактов (БФ₀), к которой применимо ДСМ-рассуждение, должна содержать позитивные и

²⁶ Эта мысль Ч.С. Пирса близка пониманию индукции У. Хьюэллом как догадки, которая вводит новую идею посредством использования общих понятий [11].

²⁷ В десятом комментарии Т. Капитан приводит характеристику абдукции Ч.С. Пирса (эта идея абдукции содержится в Collected Papers, Vol. 6, 1935, p. 525 и Vol. 7, 1958, p.202) прежде всего как **принятия** (adoption) новых гипотез, а не их **порождения**.

негативные факты и случаи неопределённости ((+)- и (-)- и (ф)-факты, соответственно). Они представимы формулами $J_{(1,0)}(X \Rightarrow_1 Y)$, $J_{(-1,0)}(X \Rightarrow_1 Y)$ и $J_{(ф,0)}(X \Rightarrow_1 Y)$. В процессе ДСМ-рассуждения появляются (±)- и (ф)-примеры, выражимые посредством формул $J_{(v,n)}(X \Rightarrow_1 Y)$ и $J_{(τ,n)}(X \Rightarrow_1 Y)$, где $v \in \{1, -1\}$, а $n \geq 2$.

(2) Для (±)-примеров и (τ)-примеров определено их **сходство**.

(3) В БФ₀ в неявном виде содержатся эмпирические зависимости (ЭЗ) причинно-следственного типа, представимые посредством формул $J_{(v,n)}(V \Rightarrow_2 W)$, где $v \in \{1, -1\}$, а $n \geq 1$.

Р2. ДСМ-рассуждение является **синтезом (взаимодействием)** трёх познавательных процедур: индукции и аналогии (они образуют Этап I) и абдукции (Этап II), которые соответствуют познавательному процессу «анализ данных (индукция) + предсказание (аналогия) + объяснение (абдукция)». Это – эпистемологическая характеристика ДСМ-рассуждений, завершающихся абдуктивным принятием порождённых гипотез.

Вернёмся, однако, к важному тексту Ч.С. Пирса об абдукции в [44]. Рассмотрим посылку (2):

If H were true, C would be a matter of course.

Это высказывание в сослагательном наклонении (в логике оно называется **контрфактическим**). Следовательно, его нельзя переводить посредством материальной импликации двузначной логики $H \supset C$, которая используется в некорректном выводе

$$\frac{H \supset C, C}{H}$$

Дело в том, что неявно предполагается «**механизм**» **вынуждения** C посредством условия H. Правда, возникает вопрос: откуда взято H?

В ДСМ-методе АПГ этот «механизм» задан посредством взаимодействия п.п.в.-1 (индукции) и п.п.в.-2 (аналогии). Абдукция же (Этап II ДСМ-рассуждения) реализует принятие гипотез, порождённых «механизмом» Этапа I.

Такова роль синтеза познавательных процедур индукции, аналогии и абдукции.

Р3. Этот принцип фактически сформулирован выше: множество порождённых гипотез H содержит подмножество гипотез о (±)-причинах таких, что они являются средством («механизмом») вынуждения эффектов, представленных в (±)-фактах (в БФ) и (±)-примерах (БП).

Таким образом, Р3 представляет синтез индукции и аналогии (Этап I) и абдукции (Этап II), который соответствует познавательному процессу «анализ данных – предсказание – объяснение». Это означает, что в ДСМ-рассуждении осуществляется **конструктивное порождение и последующее принятие гипотез**.

Р4. Этап I, реализующий п.п.в.-1 (индукцию) и п.п.в.-2 (аналогию), является итеративным процессом $(\text{п.п.в.-1} \rightarrow \text{п.п.в.-2})_1 \rightarrow (\text{п.п.в.-1} \rightarrow \text{п.п.в.-2})_2 \rightarrow \dots (\text{п.п.в.-1} \rightarrow \text{п.п.в.-2})_n$, где $i = 1, \dots, n$ являются номерами тактов применения п.п.в.-1 и п.п.в.-2 до выполнимости условия стабилизации Этапа I ДСМ-рассуждения, когда результаты тактов n и $n+1$ совпадут.

На Этапе I порождаются истинностные значения гипотез $\langle v, n \rangle$ и множества истинностных значений гипотез $\langle \tau, n \rangle$, где $v \in \{1, -1, 0\}$, а $n \geq 1$.

Напомним, что v и τ – типы истинностных значений (фактические истина, ложь, противоречие и неопределённость). Эти истинностные значения являются оценками **правдоподобия** порождаемых гипотез, а не их достоверности, что соответствует природе ДСМ-рассуждений как **правдоподобных** рассуждений, использующих амплиативные (синтетические) выводы в смысле Ч.С. Пирса [40].

Отметим, что итеративность ДСМ-рассуждений предназначена для knowledge discovery, осуществляемого посредством анализа данных и предсказаний.

Р5. Одним из центральных вопросов оправдания индукции является формулирование принципа **достаточного основания** индуктивных выводов. Д.С. Милль считал, что таким принципом является закон единообразия природы, который он понимал как «закон причинной связи»: «Все следствия связаны – посредством закона причинности – с некоторыми рядами положительных условий, хотя, правда, почти всегда кроме этих условий бывают необходимы и условия отрицательные» [8] (Книга III. Индукция, Глава V. Закон всеобщей причинной связи).

Идея Д.С. Милля о законе всеобщей причинной связи, которая имела исключительно философский характер, в ДСМ-методе АПГ уточняется современными логическими средствами и подтверждается экспериментально в интеллектуальных системах типа ДСМ (ИС-ДСМ).

Ранее было сформулировано, что условиями применимости ДСМ-метода АПГ являются наличие (+)- и (-)-фактов в исследуемом массиве данных (для их анализа и предсказания), а также существование в неявном виде в этом массиве причинно-следственных зависимостей. Этим условиям в определениях предикатов схождения $M_n^\sigma(V, W)$, где $u \in \{+, -\}$, соответствуют условия (ЭУ) и (ЭЗ).

Можно сказать, что (ЭУ) и (ЭЗ) являются **эпистемологическими** средствами ДСМ-рассуждений, тогда как **онтологической** характеристикой ДСМ-рассуждений и формализацией условий их применимости являются аксиомы каузальной полноты АКП⁽⁺⁾ и АКП⁽⁻⁾, формулируемые ниже.

Рассмотрим сначала частную формулировку аксиом каузальной полноты АКП^(σ), где $\sigma \in \{+, -\}$:

$\text{АКП}_*^{(+)} \forall X \forall Y \exists V (J_{(1,0)}(X \Rightarrow_1 Y) \rightarrow \exists n (J_{(1,n)}(V \Rightarrow_2 Y) \& (V \subset X) \& (V \neq \emptyset)))$,

$\text{АКП}_*^{(-)} \forall X \forall Y \exists V (J_{(-1,0)}(X \Rightarrow_1 Y) \rightarrow \exists n (J_{(-1,n)}(V \Rightarrow_2 Y) \& (V \subset X) \& (V \neq \emptyset)))$.

АКП⁽⁺⁾ выражает следующее утверждение: для всякого позитивного факта, представимого формулой $J_{(1,0)}(X \Rightarrow_1 Y)$, найдётся гипотеза ДСМ-рассуждения, порождённая на шаге n и представимая формулой $J_{(1,n)}(V \Rightarrow_2 Y)$ такая, что $(V \subset X)$ и $\neg(V = \emptyset)$.

Заметим, что АКП⁽⁺⁾ является формальным аналогом и уточнением идеи Д.С. Милля ([8], Книга III, Глава V) о законе причинности, приведённой выше. Он замечает, что кроме положительных условий,

представляющих причину, почти всегда бывают и отрицательные условия ((-)–причины, согласно терминологии ДСМ-метода). Это обстоятельство выражает АКП_{*}⁽⁻⁾, утверждающая, что всякий отрицательный факт имеет (-)–причину.

Более общими формулировками аксиом каузальной полноты являются АКП⁽⁺⁾ и АКП⁽⁻⁾, где

$$\text{АКП}^{(+)} \forall X \forall Y \exists k \exists V_1 \dots \exists V_k \exists W_1 \dots \exists W_k (J_{\langle 1,0 \rangle}(X \Rightarrow_1 Y) \rightarrow \rightarrow \exists n_1 \dots \exists n_k ((\bigwedge_{i=1}^k J_{\langle 1, n_i \rangle}(V_i \Rightarrow_2 W_i) \& (V_i \subset X) \& (V_i \neq \emptyset) \& (W_i \neq \emptyset)) \& (\bigcup_{i=1}^k W_i = Y))).$$

Аналогично формулируется АКП⁽⁻⁾ с заменой $J_{\langle 1,0 \rangle}$ на $J_{\langle -1,0 \rangle}$ и $J_{\langle 1, n_i \rangle}$ на $J_{\langle -1, n_i \rangle}$.

АКП^(σ) и АКП_{*}^(σ), где $\sigma \in \{+, -\}$, являются условиями, выражающими **достаточное основание** правдоподобного вывода посредством п.п.в.-1 (индукции) и п.п.в.-2 (анalogии).

Очевидно, что АКП^(σ) и АКП_{*}^(σ) принадлежат квазиаксиоматическим теориям, характеризующим предметную область ДСМ-метода и выражающим условия его применимости. Это означает, что аксиомы каузальной полноты принадлежат квазиаксиоматическим теориям (КАТ) и соответствующим им базам знаний ИС-ДСМ. Этим КАТ соответствуют каузальные модели, рассмотренные в [46]²⁸.

Так как в настоящей статье абдукция понимается как принятие гипотез посредством объяснения исходной (начальной) базы фактов БФ₀, то АКП^(σ) и АКП_{*}^(σ) выражают достаточное основание для принятия множества гипотез, порождённого посредством п.п.в.-1 (индукции) и п.п.в.-2 (анalogии). Итеративные такты применения (п.п.в.-1 + п.п.в.-2)_i, $i = 1, \dots, n$, до стабилизации на такте n являются, как это было отмечено выше, **механизмом** конструктивного порождения гипотез, по-видимому, конкретизирующим строение абдукции в [44] и [45]. Разумеется, что это уточнение и формализация абдукции ограничены условиями применимости ДСМ-метода АПГ и логическими средствами ДСМ-рассуждений Этапа I.

Напомним схему абдуктивного вывода (абдукции) в [45]:

- (1) БФ₀ – множество фактов,
- (2) Н – множество гипотез,
- (3) Н объясняют БФ₀

Следовательно, все $h, h \in N$, правдоподобны.

Эта схема абдукции [45] усиливается посредством введения условия для принятия только тех гипотез, которые имеют в некотором смысле наилучшее объяснение.

ДСМ-рассуждение состоит из последовательно применяемых Этапов I и II. Этап I был рассмотрен

ранее, а Этап II является завершением процесса порождения гипотез посредством их **принятия**. В [42] было приведено одно из пониманий Ч.С. Пирсом абдукции как средства принятия гипотез, отличающегося от процедур их порождения. Формализация принятия гипотез, порождённых ранее посредством индукции и аналогии на Этапе I, на Этапе II завершается абдуктивным выводом, определяемым ниже. Эта формализация конкретизирует схему абдукции из [45] средствами ДСМ-рассуждений для применения в интеллектуальных системах типа ДСМ.

Предлагаемое ниже уточнение идеи абдукции средствами ДСМ-рассуждений требует введения ряда определений.

Обозначим посредством Ω_0 множество формул вида $J_{\langle v, 0 \rangle}(C \Rightarrow_1 Q)$ и $J_{\langle \tau, 0 \rangle}(C \Rightarrow_1 Q)$, где $v \in \{1, -1, 0\}$. Посредством Δ_0 обозначим множество формул вида $J_{\langle \tau, 0 \rangle}(C' \Rightarrow_2 Q)$. Пара $\langle \Omega_0, \Delta_0 \rangle$ соответствует началу итеративного процесса ДСМ-рассуждения, образуя его базис.

$\Omega_0 = \Omega_0^+ \cup \Omega_0^- \cup \Omega_0^\tau$ представляет факты посредством формул $J_{\langle v, 0 \rangle}(X \Rightarrow_1 Y)$ и $J_{\langle \tau, 0 \rangle}(X \Rightarrow_1 Y)$ таких, что $v \in \{1, -1\}$, а X, Y заменимы соответствующими константами²⁹. $\Omega_0, \Omega_0^\sigma$, где $\sigma \in \{+, -, \tau\}$, соответствуют БФ₀ и БФ₀^σ, где

$$\text{БФ}_0^+ = \{ \langle X, Y \rangle \mid (J_{\langle 1,0 \rangle}(X \Rightarrow_1 Y)) \},$$

$$\text{БФ}_0^- = \{ \langle X, Y \rangle \mid (J_{\langle -1,0 \rangle}(X \Rightarrow_1 Y)) \},$$

$$\text{БФ}_0^\tau = \{ \langle X, Y \rangle \mid (J_{\langle \tau,0 \rangle}(X \Rightarrow_1 Y)) \},$$

$$\text{а } \text{БФ}_0 = \text{БФ}_0^+ \cup \text{БФ}_0^- \cup \text{БФ}_0^\tau.$$

БФ₀ будем называть **базой фактов** ИС-ДСМ, а БФ₀^σ – (σ)–фрагментами БФ₀. Соответственно, Ω_0 и Ω_0^σ будем называть описаниями БФ₀ и её (σ)–фрагментов БФ₀^σ.

Аналогично определим

$$\text{R}_0^\tau = \{ \langle X, Y \rangle \mid (J_{\langle \tau,0 \rangle}(X \Rightarrow_2 Y)) \}.$$

Посредством Ω_{2n} и Δ_{2n-1} , где $n \geq 1$, обозначим множество формул вида $J_{\langle v, 2n \rangle}(C \Rightarrow_1 Q)$ и $J_{\langle v, 2n-1 \rangle}(C' \Rightarrow_2 Q)$, где $v \in \{1, -1, 0, \tau\}$, $J_{\langle v, m \rangle} \varphi = \bigvee_{i=0}^m J_{\langle v, i \rangle} \varphi$, а $(\tau, n) = \{\langle 1, n+1 \rangle, \langle -1, n+1 \rangle, \langle 0, n+1 \rangle\} \cup (\tau, n+1)$ – множество возможных истинностных значений порождаемых гипотез, n – номер шага правдоподобного рассуждения, выражающий степень правдоподобия гипотез (чем больше шаг, тем меньше степень правдоподобия).

Ω_{2n} и Δ_{2n-1} представляют множества гипотез, порождённых на такте n Этапа I ДСМ-рассуждения. Эти гипотезы, очевидно, являются гипотетическим **знанием**, извлечённым из фактов БФ₀. **Состоянием ИС-ДСМ** будем называть пару $\Delta_{2i-1}, \Omega_{2i-2}$, соответствующую такту i ДСМ-рассуждения, где $i = 1, \dots, n$, а n – номер такта стабилизации ДСМ-

²⁸ Неформальное рассмотрение каузальных моделей содержится в [47], где они характеризуются как D^(±)-множества.

²⁹ В ИС-ДСМ для анализа социологических данных возможно представление $\Omega_0 = \Omega_0^+ \cup \Omega_0^- \cup \Omega_0^0 \cup \Omega_0^\tau$, где Ω_0^0 выражает факты с оценкой «фактически противоречиво».

рассуждения. Приведём таблицу смены состояний итеративного процесса ДСМ-рассуждения, началом которого является базис Δ_0, Ω_0 .

Последовательность смены состояний ИС-ДСМ такова:

№ такта	№ и шаг п.п.в.-1	№ и шаг п.п.в.-2
1	0 Δ_0, Ω_0	1 Δ_1, Ω_0
	1 Δ_1, Ω_0	2 Δ_1, Ω_2
2	2 Δ_1, Ω_2	3 Δ_3, Ω_2
	3 Δ_3, Ω_2	4 Δ_3, Ω_4
3	4 Δ_3, Ω_4	1 Δ_5, Ω_4
	5 Δ_5, Ω_4	2 Δ_5, Ω_6
...	...	...
i	2i-2 $\Delta_{2i-3}, \Omega_{2i-2}$	2i-1 $\Delta_{2i-1}, \Omega_{2i-2}$
	2i-1 $\Delta_{2i-1}, \Omega_{2i-2}$	2i $\Delta_{2i-1}, \Omega_{2i}$
...	...	...
n	2n-2 $\Delta_{2n-3}, \Omega_{2n-2}$	2n-1 $\Delta_{2n-1}, \Omega_{2n-2}$
	2n-1 $\Delta_{2n-1}, \Omega_{2n-2}$	2n $\Delta_{2n-1}, \Omega_{2n}$

n – такт стабилизации ДСМ-рассуждения: $\Delta_{2n-1} = \Delta_{2n+1}$. Такт стабилизации является первым тактом с выполнением условия равенства порождённых гипотез.

В соответствии с последовательностью смены состояний сформулируем теперь ДСМ-рассуждение на Этапе I, который начинается с применения п.п.в.-1 к базисному состоянию Ω_0, Δ_0 . Заметим, что теперь добавляются в **явном виде** посылки, представленные состояниями $\Delta_{2i-1}, \Omega_{2i-2}$ и Ω_0, Δ_0 , где $i = 1, \dots, n$. Это добавление соответствует природе анализа данных и порождённых знаний, которое имитирует и формализует ДСМ-рассуждение.

Такт 1:

$$(I)_1^+ \frac{\Omega_0, \Delta_0, J_{(\tau,0)}(V \Rightarrow_2 W), M_{x,0}^+(V, W) \& \neg M_{y,0}^-(V, W)}{J_{(1,1)}(V \Rightarrow_2 W)},$$

$$(II)_1^+ \frac{\Omega_0, \Delta_1, J_{(\tau,1)}(X \Rightarrow_1 Y), \Pi_1^+(X, Y)}{J_{(1,2)}(X \Rightarrow_1 Y)}.$$

Такт 2:

$$(I)_2^+ \frac{\Omega_2, \Delta_1, J_{(\tau,2)}(V \Rightarrow_2 W), M_{x,2}^+(V, W) \& \neg M_{y,2}^-(V, W)}{J_{(1,3)}(V \Rightarrow_2 W)},$$

$$(II)_2^+ \frac{\Omega_2, \Delta_3, J_{(\tau,3)}(X \Rightarrow_1 Y), \Pi_2^+(X, Y)}{J_{(1,4)}(X \Rightarrow_1 Y)}.$$

Такт n:

$$(I)_n^+ \frac{\Omega_{2n-2}, \Delta_{2n-3}, J_{(\tau,2n-3)}(V \Rightarrow_2 W), M_{x,n}^+(V, W) \& \neg M_{y,2n-3}^-(V, W)}{J_{(1,2n-1)}(V \Rightarrow_2 W)},$$

$$(II)_n^+ \frac{\Omega_{2n-2}, \Delta_{2n-1}, J_{(\tau,2n-1)}(X \Rightarrow_1 Y), \Pi_n^+(X, Y)}{J_{(1,2n)}(X \Rightarrow_1 Y)}.$$

Аналогично формулируются п.п.в.-1 $(I)_i^\sigma$ и п.п.в.-2 $(II)_i^\sigma$ для $\sigma \in \{0, -, \tau\}$, где $i = 1, \dots, n$, а n – номер такта стабилизации ДСМ-рассуждения.

Обозначим посредством Δ_{2i-1}^+ множество всех гипотез $J_{(1,2i-1)}(C' \Rightarrow_2 Q)$, порождённых на шаге $2i-1$ Этапа I ДСМ-рассуждения. Аналогично введём в рассмотрение $\Delta_{2i-1}^-, \Delta_{2i-1}^0$ и Δ_{2i-1}^τ . Тогда

$$\Delta_{2i-1} = \Delta_{2i-1}^+ \cup \Delta_{2i-1}^- \cup \Delta_{2i-1}^0 \cup \Delta_{2i-1}^\tau,$$

$$\bar{\Delta}_{2n-1}^\sigma = \bigcup_{i=1}^n \Delta_{2i-1}^\sigma, \sigma \in \{+, -, 0, \tau\},$$

где $\bar{\Delta}_{2n-1}^\sigma = \bar{\Delta}_{2n+1}^\sigma$ (n – такт стабилизации ДСМ-рассуждения).

Посредством $\tilde{\Delta}_{2i-1}^\sigma$ обозначим множество формул вида $J_{(v,2i-1)}(C' \Rightarrow_2 Q)$, где

$$v = \begin{cases} 1, & \text{если } \sigma = + \\ -1, & \text{если } \sigma = - \\ 0, & \text{если } \sigma = 0 \\ \tau, & \text{если } \sigma = \tau. \end{cases}$$

Напомним, что $J_{(v,m)}\varphi = \bigvee_{i=0}^m J_{(v,i)}\varphi$. Оператор $J_{(v,m)}$

выражает процесс порождения гипотез в соответствии с шагами применения п.п.в.

Очевидно, что имеет место

$\tilde{\Delta}_{2i-1}^\sigma = \bar{\Delta}_{2i-1}^\sigma$, где $\sigma \in \{+, -, 0, \tau\}$, а $2i-1$ – шаг применения п.п.в.

Рассмотрим теперь

$$\bar{R}_{2i-1}^+ = \{\langle V, W \rangle \mid J_{(1,2i-1)}(V \Rightarrow_2 W)\},$$

которые представляют отношение «гипотезы (+)-причины», взаимно однозначно соответствующее множеству $\bar{\Delta}_{2i-1}^+$. Будем называть $\bar{\Delta}_{2i-1}^+$ представлением отношения «гипотезы (+)-причины».

Аналогично определяются отношения $\bar{R}_{2i-1}^\sigma$, где $\sigma \in \{+, -, 0, \tau\}$, а $\bar{R}_{2i-1}^\sigma$ представляет отношение «гипотезы (σ)-причины».

Определим $R_{2i-1}^+ = \{\langle V, W \rangle \mid J_{(1,2i-1)}(V \Rightarrow_2 W)\}$, $R_{2i-1}^+ \subseteq \bar{R}_{2i-1}^+$. Аналогично определим R_{2i-1}^σ , где $\sigma \in \{-, 0, \tau\}$.

Заметим, что $B\Phi_0^\sigma$, которые есть подмножества базы фактов $B\Phi_0$, являются отношением «(σ) - факт», где $\sigma \in \{+, -, 0, \tau\}$.

Ω_0 есть множество фактов (точнее, описаний фактов), где $\Omega_0 = \Omega_0^+ \cup \Omega_0^- \cup \Omega_0^\tau$ ³⁰.

³⁰ ИС-ДСМ для анализа социологических данных имеют $\Omega_0 = \Omega_0^+ \cup \Omega_0^- \cup \Omega_0^0 \cup \Omega_0^\tau$, где Ω_0^0 представляют факты конфликта

$$\overline{\Omega}_{2n}^\sigma = \bigcup_{i=1}^n \Omega_{2i}^\sigma, \text{ где } \Omega_{2n} = \Omega_{2n+2}.$$

$\tilde{\Omega}_{2i}^\sigma$ является множеством всех $J_{(v,2i)}(C \Rightarrow_1 Q)$ та-
ких, что

$$v = \begin{cases} 1, & \text{если } \sigma = + \\ -1, & \text{если } \sigma = - \\ 0, & \text{если } \sigma = 0 \\ \tau, & \text{если } \sigma = \tau; \end{cases}$$

$$\overline{\Omega}_{2n} = \overline{\Omega}_{2n}^+ \cup \overline{\Omega}_{2n}^- \cup \overline{\Omega}_{2n}^0 \cup \overline{\Omega}_{2n}^\tau.$$

Очевидно, что $\overline{\Omega}_{2i}^\sigma = \tilde{\Omega}_{2i}^\sigma$.

Определим соответствующие отношения, поро-
ждённые предикатом $H \Rightarrow_1 Y$:

$$P_{2i}^+ = \{ \langle X, Y \rangle \mid J_{(1,2i)}(X \Rightarrow_1 Y) \},$$

$$P_{2n}^+ = \{ \langle X, Y \rangle \mid J_{(1,2n)}(X \Rightarrow_1 Y) \},$$

$$\overline{P}_{2n}^+ = \{ \langle X, Y \rangle \mid J_{(1,2n)}(X \Rightarrow_1 Y) \};$$

при $i = 0$ $P_0^+ = B\Phi_0^+$.

Аналогично определимы P_{2i}^σ , $\overline{P}_{2n}^\sigma$ и P_0^σ .

Определим также отношения

$$P_{2n} = P_{2n}^+ \cup P_{2n}^- \cup P_{2n}^0 \cup P_{2n}^\tau,$$

$$\overline{P}_{2n} = \overline{P}_{2n}^+ \cup \overline{P}_{2n}^- \cup \overline{P}_{2n}^0 \cup \overline{P}_{2n}^\tau.$$

Введём метапредикаты $E_*(\Delta, \Omega)$ и $E^*(\Delta, \Omega)$ – ги-
потезы Δ объясняют Ω :

$E_*(\overline{\Delta}_{2n-1}^+, \Omega_0^+)$, если и только если имеет место
АКП $^{(+)}$;

$E_*(\overline{\Delta}_{2n-1}^-, \Omega_0^-)$, если и только если имеет место
АКП $^{(-)}$.

Тогда схема абдуктивного принятия гипотез (аб-
дукции), уточняющая представления о ней [42, 43,
45], выразима следующим образом:

- (1) $\Omega_0^+ \cup \Omega_0^-$ – множество фактов,
- (2) $\overline{\Delta}_{2n-1}^+ \cup \overline{\Delta}_{2n-1}^-$, $\overline{\Omega}_{2n}^+ \cup \overline{\Omega}_{2n}^-$ – множества гипотез,
где $\overline{\Delta}_{2n-1} = \overline{\Delta}_{2n+1}$, $\overline{\Omega}_{2n} = \overline{\Omega}_{2n+2}$;
- (3) $E_*(\overline{\Delta}_{2n-1}^+, \Omega_0^+)$, $E_*(\overline{\Delta}_{2n-1}^-, \Omega_0^-)$

$$\overline{\Delta}_{2n-1}^+ \cup \overline{\Delta}_{2n-1}^-, Ad(\overline{\Omega}_{2n}^+ \cup \overline{\Omega}_{2n}^-),$$

где Ad – метапредикат **принятия** порождённых ги-
потез. Заметим, что данное уточнение абдукции со-
гласуется с идеей Ч.С. Пирса [42] о том, что абдук-
ция есть средство **принятия** порождённых гипотез, а
не средство их формирования.

Гипотеза h принимается, если и только если $h \in$
 $\overline{\Delta}_{2n-1}^+ \cup \overline{\Delta}_{2n-1}^-$ или $h \in \overline{\Omega}_{2n-1}^+ \cup \overline{\Omega}_{2n-1}^-$, тогда $Ad(h)$ ис-
тинно.

Очевидно следующее

Утверждение 1-2. АКП $^{(+)}$ и АКП $^{(-)}$ истинны от-
носительно $B\Phi_0$, если и только если $|\widetilde{B\Phi_{2n}^+}| = |B\Phi_0^+|$ и
 $|\widetilde{B\Phi_{2n}^-}| = |B\Phi_0^-|$, соответственно.

Рассмотрим подмножества базы фактов $B\Phi_0$ –
 $B\Phi_0^+$ и $B\Phi_0^-$, состоящие из фактов таких, что они
имеют «объяснения», т. е. существуют гипотезы о
(+)- и (-)-причинах этих фактов. Это означает,
что $\widetilde{B\Phi_0^+} = \{ \langle X, Y \rangle \mid \exists n \exists V (J_{(1,0)}(X \Rightarrow_1 Y) \ \& \ J_{(1,2n-1)}(V \Rightarrow_2 Y)) \ \& \ (V \subset X) \}$; аналогично определяется и $\widetilde{B\Phi_0^-}$. Оче-
видно, что $\widetilde{B\Phi_0^+}$ и $\widetilde{B\Phi_0^-}$ образуют отношения $\hat{P}_0^+$ и
 $\hat{P}_0^-$, соответствующие АКП $^{(\sigma)}$.

$\widetilde{B\Phi_0^+} \subseteq B\Phi_0^+$, $\widetilde{B\Phi_0^-} \subseteq B\Phi_0^-$, а если $\widetilde{B\Phi_0^\sigma} = B\Phi_0^\sigma$,
где $\sigma \in \{+, -\}$, то АКП $^{(\sigma)}$ истинны относительно
 $B\Phi_0$; если же $\widetilde{B\Phi_0^\sigma} \subset B\Phi_0^\sigma$, то имеет место частичная
выполнимость АКП $^{(\sigma)}$ относительно $B\Phi_0$.

Сформулируем теперь схему абдуктивного при-
нятия гипотез, порождённых посредством ДСМ-
рассуждения, следующим образом:

- (1) $\Omega_0^+ \cup \Omega_0^-$ – множество фактов,
- (2) $\overline{\Delta}_{2n-1}^+ \cup \overline{\Delta}_{2n-1}^-$, $\overline{\Omega}_{2n}^+ \cup \overline{\Omega}_{2n}^-$ – множества гипотез,
где $\overline{\Delta}_{2n-1} = \overline{\Delta}_{2n+1}$, $\overline{\Omega}_{2n} = \overline{\Omega}_{2n+2}$;
- (3) $|\hat{P}_0^+| = |\Omega_0^+|$, $|\hat{P}_0^-| = |\Omega_0^-|$

$$Ad(\overline{\Delta}_{2n-1}^+ \cup \overline{\Delta}_{2n-1}^-), Ad(\overline{\Omega}_{2n}^+ \cup \overline{\Omega}_{2n}^-).$$

Абдуктивная схема принятия гипотез может быть
расширена и для случаев АКП $^{(\sigma)}$ для покрытия эф-
фекта Y множеством гипотез о (σ) - причинах. В ча-
стности, для АКП $^{(+)}$:

$$\begin{aligned} & \forall X \forall Y \exists k \exists V_1 \dots \exists V_k \exists W_1 \dots \exists W_k (J_{(1,0)}(X \Rightarrow_1 Y) \rightarrow \\ & \rightarrow \exists n_1 \dots \exists n_k ((\bigwedge_{i=1}^k J_{(1,n_i)}(V_i \Rightarrow_2 W_i) \ \& \ (V_i \subset X) \ \& \\ & \ \& \ (\bigcup_{i=1}^k W_i = Y))) \end{aligned}$$

Напомним, что третьей компонентой ДСМ-метода
АПГ является представление знаний посредством
квазиаксиоматических теорий (КАТ) $\mathfrak{Z} = \langle \Sigma, \Sigma', \mathfrak{R} \rangle$, где
 $\mathfrak{R}$ – множество правил вывода – правдоподобного и
достоверного с п.п.в.-1 и п.п.в.-2.

Рассмотрим КАТ $\mathfrak{Z}$ такую, что она содержит
процедурные аксиомы

$$\begin{aligned} & \forall V \forall W ((J_{(\tau,n)}(V \Rightarrow_2 W) \ \& \ M_{x,n}^+(V, W) \ \& \ \neg M_{y,n}^-(V, W)) \rightarrow \\ & \rightarrow J_{(1,n+1)}(V \Rightarrow_2 W)), \\ & \forall V \forall W ((J_{(\tau,n)}(V \Rightarrow_2 W) \ \& \ \neg M_{x,n}^+(V, W) \ \& \ M_{y,n}^-(V, W)) \rightarrow \\ & \rightarrow J_{(-1,n+1)}(V \Rightarrow_2 W)); \end{aligned}$$

АКП⁽⁺⁾ и АКП⁽⁻⁾, которые принадлежат множеству аксиом Σ , а также $\Sigma' = \Omega_0 \cup \Delta_0 \cup \bar{\Omega}_{2n} \cup \bar{\Delta}_{2n-1}$, где n – такт стабилизации ДСМ-рассуждения.

В схеме абдуктивного принятия порождённых гипотез посредством ДСМ-рассуждения $\bar{\Delta}_{2n-1}^+ = \bar{\Delta}_{2n-1}^+ \cup \bar{\Delta}_{2n-1}^-$ и $\bar{\Omega}_{2n}^+ = \bar{\Omega}_{2n}^+ \cup \bar{\Omega}_{2n}^-$ рассмотрим условие (1): $\Omega_0^+ \cup \Omega_0^-$, которое содержится в КАТ $\mathfrak{Z} = \langle \Sigma, \Sigma', \mathfrak{R} \rangle$, где $\Omega_0^+ \cup \Omega_0^- \subseteq \Sigma'$.

Ω_0^σ состоят из элементарных формул $J_{(1,0)}(C_j \Rightarrow_1 Q_j)$ и $J_{(-1,0)}(C_j \Rightarrow_1 Q_j)$, которым соответствуют множества термов $\{C_1, \dots, C_s\}$ и $\{Q_1, \dots, Q_s\}$ и множество пар $\langle C_l, Q_l \rangle$, где $l = 1, \dots, s$. Для каждой пары $\langle C_l, Q_l \rangle$ рассмотрим экзemplификацию АКП^(σ), $\sigma \in \{+, -\}$.

В силу конечности исходных множеств $U^{(1)}$ и $U^{(2)}$ булевых алгебр $\mathfrak{B}_i = \langle 2^{U^{(i)}}, \emptyset, U^{(i)}, -, \cap, \cup \rangle$, образующих структуру данных ИС-ДСМ и семантику ДСМ-рассуждений, АКП⁽⁺⁾ эквивалентно конъюнкции высказываний

$$J_{(1,0)}(C_j \Rightarrow_1 Q_j) \rightarrow \exists m \exists V (J_{(1,m)}(V \Rightarrow_2 Q_j) \& (V \subset C_j)), \text{ где } j = 1, \dots, s_1.$$

Так как $J_{(1,0)}(C_j \Rightarrow_1 Q_j) \subseteq \Sigma'$, то в КАТ $\mathfrak{Z}$ **доказуемы** экзистенциальные формулы $\exists m \exists V (J_{(1,m)}(V \Rightarrow_2 Q_j) \& (V \subset C_j))$. Именно:

$$\begin{aligned} & J_{(1,0)}(C_j \Rightarrow_1 Q_j) \rightarrow \exists m \exists V (J_{(1,m)}(V \Rightarrow_2 Q_j) \& \\ & \& (V \subset C_j)), J_{(1,0)}(C_j \Rightarrow_1 Q_j) \\ \hline & \exists m \exists V (J_{(1,m)}(V \Rightarrow_2 Q_j) \& (V \subset C_j)). \end{aligned}$$

Аналогично рассмотрим экзemplификацию АКП⁽⁻⁾, заменив X на C_h и Y на Q_h , где $h = 1, \dots, s_2$. Применяя modus ponens, получим доказуемые экзистенциальные формулы $\exists m \exists V (J_{(-1,m)}(V \Rightarrow_2 Q_h) \& (V \subset C_h))$, $h = 1, \dots, s_2$.²⁶

Рассмотрим экзистенциальные формулы $\exists m \exists V (J_{(1,m)}(V \Rightarrow_2 Q_j) \& (V \subset C_j))$, $j = 1, \dots, s_1$, соответствующие парам $\langle C_j, Q_j \rangle$. Так как процедурная аксиома $\forall V \forall W ((J_{(\tau,l)}(V \Rightarrow_2 W) \& M_{x,l}^+(V, W) \& \neg M_{y,l}^-(V, W)) \rightarrow J_{(1,l+1)}(V \Rightarrow_2 W))$ принадлежит Σ из КАТ $\mathfrak{Z} = \langle \Sigma, \Sigma', \mathfrak{R} \rangle$, то получаем её пример заменой W на Q_j :

$$\forall V ((J_{(\tau,l)}(V \Rightarrow_2 Q_j) \& M_{x,l}^+(V, Q_j) \& \neg M_{y,l}^-(V, Q_j)) \rightarrow J_{(1,l+1)}(V \Rightarrow_2 Q_j)).$$

Реализуя процедуру выполнимости, найдём множество $\Gamma_j = \{V \mid M_{x,l}^+(V, Q_j) \& \neg M_{y,l}^-(V, Q_j)\}$.

Пусть $\Gamma_j = \{C'_{1j}, \dots, C'_{qj}\}$, тогда положим $m = l$, а $V \in \Gamma_j$. Следовательно, определим **конструктивно** множество гипотез

$$J_{(1,l)}(C'_{1j} \Rightarrow_2 Q_j), \dots, J_{(1,l)}(C'_{qj} \Rightarrow_2 Q_j) \text{ таких, что } C'_{1j} \subset C_j, \dots, C'_{qj} \subset C_j, \text{ где } j = 1, \dots, s_1.$$

Так как для пар $\langle C'_{ij}, Q_j \rangle$, где $i = 1, \dots, q$, $1 \leq l \leq 2n-1$, а $1 \leq j \leq |\bar{\Delta}_{2n-1}^+|$, истинна

$$(J_{(\tau,l)}(C'_{ij} \Rightarrow_2 Q_j) \& M_{x,l}^+(C'_{ij}, Q_j) \& \neg M_{y,l}^-(C'_{ij}, Q_j)),$$

то из

$$\left((J_{(\tau,l)}(C'_{ij} \Rightarrow_2 Q_j) \& M_{x,l}^+(C'_{ij}, Q_j) \& \neg M_{y,l}^-(C'_{ij}, Q_j)) \rightarrow \right. \\ \left. \rightarrow J_{(1,l+1)}(C'_{ij}, Q_j) \right),$$

применяя modus ponens, получим $J_{(1,l+1)}(C'_{ij}, Q_j)$, где $i = 1, \dots, q$.

Замечание 1.2. Так как Q_j может соответствовать множеству причин Γ_j такое, что $|\Gamma_j| \geq 1$, то решается проблема Д.С. Милля о существовании множественности причин [8] (Книга III, Глава X. Множественность причин и смешение следствий (действий), с. 343- 356).

Замечание 2.2. Аналогичные рассуждения имеют место для АКП^(σ), где $\sigma \in \{+, -\}$.

Замечание 3.2. Выше было рассмотрено **достаточное основание** принятия гипотез $\bar{\Delta}_{2n-1}^+ \cup \bar{\Delta}_{2n-1}^-$. Охарактеризуем теперь достаточное основание принятия гипотез $\bar{\Omega}_{2n}^+ \cup \bar{\Omega}_{2n}^-$, т. е. реализацию метепредиката Ad для этих гипотез: $Ad(\bar{\Omega}_{2n}^+ \cup \bar{\Omega}_{2n}^-)$.

$Ad(\bar{\Delta}_{2n-1}^+ \cup \bar{\Delta}_{2n-1}^-)$ имеет место, а следовательно, мы располагаем принятыми на достаточном основании гипотезами $J_{(1,2n-1)}(C'_j \Rightarrow_2 Q_j) \in \bar{\Delta}_{2n-1}^+$ и $J_{(-1,2n-1)}(C'_k \Rightarrow_2 Q_k) \in \bar{\Delta}_{2n-1}^-$. Следовательно, реализуется выполнимость предикатов $\Pi_n^+(X, Y)$ и $\Pi_n^-(X, Y)$ в силу их определения. Рассмотрим случай $\Pi_n^+(X, Y)$, содержащего подформулы

$$((\bigwedge_{i=1}^k \exists X_i (J_{(1,2n-1)}(X_i \Rightarrow_2 Y_i) \& (X_i \subset X))) \& (\bigcup_{i=1}^k Y_i = Y))$$

и

$$\forall U (((U \subseteq Y) \& (U \neq \emptyset)) \rightarrow \neg \exists Z ((J_{(-1,2n-1)}(Z \Rightarrow_2 U) \vee J_{(0,2n-1)}(Z \Rightarrow_2 U) \& (Z \subset V))).$$

Заметим, что имеются и гипотезы из Ω_{2n-1}^0 .

Таким образом, имеем декларативные аксиомы ($\pm$) - предсказания (ДАП^(σ), $\sigma \in \{+, -\}$), соответствующие п.п.в.-2:

$$\forall X \forall Y ((J_{(\tau,2n-1)}(X \Rightarrow_1 Y) \& \Pi_n^+(X, Y)) \rightarrow J_{(1,2n)}(X \Rightarrow_1 Y)).$$

Для пар $\langle C, Q \rangle$ из Ω_{2n}^+ подбираем $J_{(1,2n-1)}(C'_i \Rightarrow_2 Q_i)$ из принятых гипотез $Ad(\bar{\Omega}_{2n-1}^+ \cup \bar{\Omega}_{2n-1}^-)$, удовлетворяющих условиям $\bigcup_{i=1}^k Q_i = Q$ и $C'_i \subset C$, где $i = 1, \dots, k$.

Аналогичное имеет место и для ДАП⁽⁻⁾. Согласно [48] имеем антецедентное условие $(AY_1)^{(+)}$

$$\Pi_n^+(C, Q) \& J_{(\tau,2n-1)}(C \Rightarrow_1 Q).$$

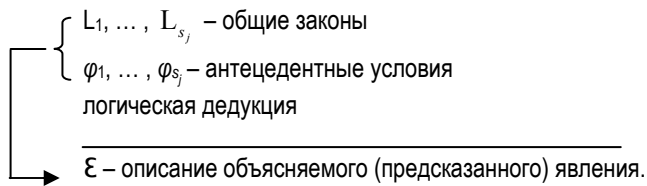
²⁶ Modus ponens принадлежит множеству правил вывода $\mathfrak{R}$.

Тогда получим реализацию ДАП⁽⁺⁾ и (АУ₁)⁽⁺⁾:

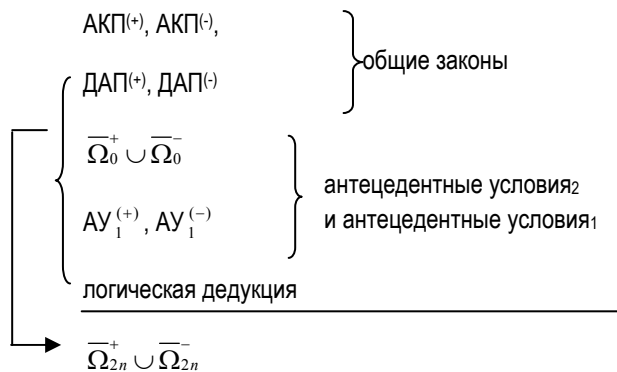
$$((J_{(\tau, 2n-1)}(C \Rightarrow_1 Q) \& \Pi_{2n-1}^+(C, Q)) \rightarrow J_{\langle 1, 2n \rangle}(C \Rightarrow_1 Q)) \\ \frac{J_{(\tau, 2n-1)}(C \Rightarrow_1 Q) \& \Pi_n^+(C, Q)}{J_{\langle 1, 2n \rangle}(C \Rightarrow_1 Q)}.$$

Посредством modus ponens образуем $\bar{\Omega}_{2n}^+$ и аналогично, используя ДАП⁽⁻⁾, $\bar{\Omega}_{2n}^-$. Напомним, что истинность $\Pi_{2n-1}^+(C, Q)$ обеспечивается подбором гипотез о (±)-причинах и соответствующих гипотез для формул $J_{(0, 2n-1)}(Z \Rightarrow_2 U)$, использующих $\bar{\Delta}_{2n-1}^0$.

Таким образом, согласно схеме предсказания (объяснения) [48],



В нашем случае схема предсказания имеет вид



Эта схема является логической структурой абдуктивного принятия гипотез (предсказаний): $Ad(\bar{\Omega}_{2n}^+ \cup \bar{\Omega}_{2n}^-)$.

Заметим, что выше было рассмотрено принятие гипотез для случая (a), когда истинны АКП⁽⁺⁾ и АКП⁽⁻⁾.

Рассмотрим теперь практически важный случай применения ДСМ-рассуждений на Этапе II таким, что АКП^(σ) (и АКП^(σ)) не являются истинными относительно БФ₀. Тогда для БФ₀ имеет место $|\hat{P}_0^+| < |\Omega_0^+|$ или $|\hat{P}_0^-| < |\Omega_0^-|$, где $\hat{P}_0^+ = \{ \langle X, Y \rangle \mid \exists n \exists V (J_{\langle 1, 0 \rangle}(X \Rightarrow_1 Y) \& J_{\langle 1, 2n-1 \rangle}(V \Rightarrow_2 Y) \& (V \subset X)) \}$, а

$\hat{P}_0^- = \{ \langle X, Y \rangle \mid \exists n \exists V (J_{\langle -1, 0 \rangle}(X \Rightarrow_1 Y) \& J_{\langle -1, 2n-1 \rangle}(V \Rightarrow_2 Y) \& (V \subset X)) \}$.

Определим процесс расширения БФ₀^σ, представляющий абдуктивную сходимость ДСМ-рассуждения к заданному порогу ρ^σ (σ ∈ {+, -}) [21] (Часть I, Глава 2, с. 57).

Построим последовательность вложенных БФ таких, что

$$(1) \quad \text{БФ}_0^\sigma \subset \text{БФ}_{0,1}^\sigma \subset \dots \subset \text{БФ}_{0,r}^\sigma, \sigma \in \{+, -\};$$

$$(2) \quad \rho_i^\sigma = \frac{|\widetilde{\text{БФ}}_{0,i}^\sigma|}{|\text{БФ}_{0,i}^\sigma|}$$

где $\widetilde{\text{БФ}}_{0,i}^\sigma = \{ \langle X, Y \rangle \mid \exists n \exists V (J_{\langle v, 0 \rangle}(X \Rightarrow_1 Y) \& J_{\langle 1, 2n-1 \rangle}(V \Rightarrow_2 Y) \& (V \subset X)) \}$, т. е. $\widetilde{\text{БФ}}_{0,i}^\sigma$ есть $\hat{P}_{0,i}^\sigma$.

$$v = \begin{cases} 1, & \text{если } \sigma = +, \\ -1, & \text{если } \sigma = -, \end{cases}$$

а n – номер такта стабилизации ДСМ-рассуждения;

$$(3) \quad \rho_0^\sigma \leq \rho_1^\sigma \leq \dots \leq \rho_r^\sigma, \quad \rho^\sigma \leq \rho_r^\sigma < 1, \quad \text{где порог } \rho^\sigma \geq 0,8^{27}.$$

Таким образом, имеются два случая принятия гипотез, порождённых ДСМ-рассуждением:

$$(a) \quad |\hat{P}_0^+| = |\Omega_0^+|, \quad |\hat{P}_0^-| = |\Omega_0^-|;$$

$$(b) \quad |\hat{P}_0^+| < |\Omega_0^+|, \quad |\hat{P}_0^-| < |\Omega_0^-|,$$

$\rho^\sigma \leq \rho_r^\sigma < 1$, где σ ∈ {+, -}, и существует Этап I_r расширения БФ₀ такой, что достигим порог ρ^σ.

Пусть

$$\rho_{0,r}^\sigma = \frac{|\widetilde{\text{БФ}}_{0,r}^\sigma|}{|\text{БФ}_{0,r}^\sigma|} \geq \rho^\sigma$$

где ρ^σ – выбранные пороги абдуктивной сходимости (σ ∈ {+, -}). Тогда принимаются те и только те порождённые ДСМ-рассуждением гипотезы о (±)-причинах, которые «объясняют» БФ_{0,r}^σ. Это означает

следующее. $\widetilde{\text{БФ}}_{0,r}^\sigma$ взаимно-однозначно соответствуют своим описаниям $\widetilde{\Omega}_{0,r}^\sigma$. Эти множества характеризуются высказываниями вида $J_{\langle v, i \rangle}(C' \Rightarrow_2 Q)$, так как

$$\widetilde{\text{БФ}}_{0,r}^\sigma = \{ \langle X, Y \rangle \mid \exists n \exists V (J_{\langle v, 0 \rangle}(X \Rightarrow_1 Y) \& J_{\langle 1, 2n-1 \rangle}(V \Rightarrow_2 Y) \& (V \subset X)) \},$$

где $1 \leq i \leq 2n-1$,

$$v = \begin{cases} 1, & \text{если } \sigma = +, \\ -1, & \text{если } \sigma = -, \end{cases}$$

а n – такт стабилизации ДСМ-рассуждения.

²⁷ Порог абдуктивной сходимости ДСМ-рассуждения $\rho^\sigma \geq 0,8$ аналогичен порогу распознавания образов, обычно равному 0,8.

Таким образом, принимаются гипотезы о $(\pm)$ -причинах, соответствующие (объясняющие) $\widetilde{БФ}_{0,r}^\sigma$, такие, что $\widetilde{БФ}_{0,r}^\sigma \subset БФ_{0,r}^\sigma$, и образующие множества $\tilde{\Delta}_{2n-1}^\sigma$, где $\tilde{\Delta}_{2n-1}^\sigma \subset \Delta_{2n-1}^\sigma$. Это означает, что истинен метаязык-предикат Ad для $\tilde{\Delta}_{2n-1}^+ \cup \tilde{\Delta}_{2n-1}^-$: $Ad(\tilde{\Delta}_{2n-1}^+ \cup \tilde{\Delta}_{2n-1}^-)$ – истинно.

Рассмотрим также множество предсказаний – $(\pm)$ – гипотез, полученных посредством п.п.в.-2 (анalogии) $\tilde{\Omega}_{2n}^+ \cup \tilde{\Omega}_{2n}^-$, таких, что $\tilde{\Omega}_{2n}^\sigma$ взаимно-однозначно соответствуют

$$\begin{aligned} \tilde{P}_{2n}^\sigma &= \{ \langle X, Y \rangle \mid \exists k \exists V_1 \dots \exists V_k \exists W_1 \dots \exists W_k (J_{(v,2n)}(X \Rightarrow_1 Y) \& \\ & \& J_{(v,2n)}(V_i \Rightarrow_2 W_i) \& (V_i \subset X) \& (\bigcup_{i=1}^k W_i = Y)) \& \\ & \& \forall U ((U \subseteq Y) \& (U \neq \emptyset)) \rightarrow \\ & \rightarrow \neg \exists Z ((J_{(\mu,2n-1)}(Z \Rightarrow_2 U) \vee J_{(0,2n-1)}(Z \Rightarrow_2 U)) \& (Z \subset X)) \}, \end{aligned}$$

где $v = \begin{cases} 1, & \text{если } \sigma = +, \\ -1, & \text{если } \sigma = -, \end{cases}$

а $\mu = \begin{cases} -1, & \text{если } \sigma = +, \\ 1, & \text{если } \sigma = -. \end{cases}$

Очевидно, что

$$\begin{aligned} \tilde{P}_{2n}^\sigma &= \{ \langle X, Y \rangle \mid J_{(v,2n)}(X \Rightarrow_1 Y) \& \Pi_n^\sigma(X, Y) \}, \\ \text{где } v &= \begin{cases} 1, & \text{если } \sigma = +, \\ -1, & \text{если } \sigma = -, \end{cases} \end{aligned}$$

а n – такт стабилизации ДСМ-рассуждения.

Ясно, что $\tilde{P}_{2n}^\sigma \subset P_{2n}^\sigma$, а описания $\tilde{P}_{2n}^\sigma$ есть $\tilde{\Omega}_{2n}^\sigma$ такие, что они взаимно-однозначно соответствуют $\tilde{P}_{2n}^\sigma$ и принимаются на достаточном основании. Это означает, что истинно $Ad(\tilde{\Omega}_{2n}^+ \cup \tilde{\Omega}_{2n}^-)$.

Сформулированная конструкция принятия гипотез распространяется на случай абдуктивной сходимости степени объясняемости (или абдуктивности) ρ_i^σ .

Рассматриваем случай (b): $|\hat{P}_0^+| < |\Omega_0^+|$, $|\hat{P}_0^-| < |\Omega_0^-|$ с $\rho^\sigma \leq \rho_r^\sigma < 1$, где $\sigma \in \{+, -\}$ и существует Этап I_r расширения $БФ_0$ такой, что достижимы пороги абдуктивной сходимости ρ^σ .

Сформулируем схему абдуктивного принятия гипотез для случая (b).

$$(1)' \quad \Omega_0^+ \cup \Omega_0^- \text{ – множество фактов,}$$

- (2)' $\bar{\Delta}_{2n-1}^+ \cup \bar{\Delta}_{2n-1}^- \cup \bar{\Delta}_{2n-1}^0$, $\bar{\Omega}_0^+ \cup \bar{\Omega}_0^-$ – множество гипотез, где $\bar{\Delta}_{2n-1} = \bar{\Delta}_{2n+1}$, $\bar{\Omega}_{2n} = \bar{\Omega}_{2n+2}$;
- (3)' $|P_0^+| < |\Omega_0^+|$, $|P_0^-| < |\Omega_0^-|$;
- (4)' существуют последовательности расширений $БФ_i$: $БФ_0 \subseteq БФ_{0,1} \subseteq \dots \subseteq БФ_{0,r}$ и соответствующая последовательность Этапов I_i , $i = 1, \dots, r$, ДСМ-рассуждений такие, что $\rho_0^\sigma \leq \rho_{0,1}^\sigma \leq \dots \leq \rho_{0,r}^\sigma$ и $\rho^\sigma \leq \rho_r^\sigma < 1$, где $\sigma \in \{+, -\}$, а ρ^σ – пороги абдуктивной сходимости ДСМ-рассуждений ($\sigma \in \{+, -\}$)

$$Ad(\tilde{\Delta}_{2n-1,r}^+ \cup \tilde{\Delta}_{2n-1,r}^-), Ad(\tilde{\Omega}_{2n,r}^+ \cup \tilde{\Omega}_{2n,r}^-).$$

Сделаем некоторые уточнения относительно схемы абдуктивного принятия гипотез. Равенства $\bar{\Delta}_{2n-1} = \bar{\Delta}_{2n+1}$ и $\bar{\Omega}_{2n} = \bar{\Omega}_{2n+2}$, выражающие условия стабилизации ДСМ-рассуждения на Этапе I будем понимать, во-первых, как покомпонентные равенства подмножеств Δ_{2n-1}^σ и Δ_{2n+1}^σ , Ω_{2n}^σ и Ω_{2n+2}^σ , соответственно, где $\sigma \in \{+, -, 0, \tau\}$; и, во-вторых, как совпадение «тел» гипотез и типов их истинностных значений. Так, например, $J_{(\mu,2n-1)}(C' \Rightarrow_2 Q)$ и $J_{(\nu,2n+1)}(C' \Rightarrow_2 Q)$ «равны», ибо $\mu = \nu$, а $(C' \Rightarrow_2 Q)$ – их общее тело и т.д.

Поэтому предикат “ $\Rightarrow$ ” в схеме абдуктивного принятия гипотез, рассмотренной выше, следует заменить на предикат “ $\approx$ ”, выражающий равенства «тел» гипотез и типов истинностных значений ν и μ , входящих в истинностные значения $\bar{\nu} = \langle \nu, 2n-1 \rangle$ и $\bar{\mu} = \langle \mu, 2n+1 \rangle$, где $\nu, \mu \in \{1, -1, 0, \tau\}$, соответственно. Аналогичное имеет место для гипотез с предикатом $\Rightarrow_1$ и истинностными значениями $\langle \nu, 2n \rangle$ и $\langle \mu, 2n+2 \rangle$.

Таким образом, условие (2)' из схемы абдуктивного принятия гипотез следует заменить на $\bar{\Delta}_{2n-1} \approx \bar{\Delta}_{2n+1}$, $\bar{\Omega}_{2n} \approx \bar{\Omega}_{2n+2}$.

Заметим, что, следовательно, $\Delta_{2n-1}^\sigma \approx \Delta_{2n+1}^\sigma$ и $\Omega_{2n}^\sigma \approx \Omega_{2n+2}^\sigma$.

Замечание 4-2. Принятие гипотез о причинах и гипотез о предсказаниях посредством индукции (п.п.в.-1) и аналогии (п.п.в.-2) таких, что они имеют объяснительную силу, установленную абдуктивной процедурой (a) или (b), означает, что ДСМ-гипотезы принимаются на достаточном основании. Это принятие сокращает число используемых гипотез и делает принимаемые гипотезы интересными в смысле П. Гаека и Т. Гавранека [49].

В случае (b) ДСМ-рассуждение состоит из последовательности Этапов I_i , $i = 1, \dots, r$, таких, что им соответствуют $БФ_{0,i}$ и состояния $\langle \Delta_{2n-1}, \Omega_{2n} \rangle$ такие, что достижимы пороги ρ_r^σ . Последовательность Этапов I_i образует Этап II, завершаю-

щий ДСМ-рассуждение принятием на достаточном основании гипотез –

$$Ad(\tilde{\Delta}_{2n-1,r}^+ \cup \tilde{\Delta}_{2n-1,r}^-) \text{ и } Ad(\tilde{\Omega}_{2n,r}^+ \cup \tilde{\Omega}_{2n,r}^-).$$

Замечание 5-2. Следует обратить внимание на различный эпистемологический статус утверждений $J_{\langle \pm 1, 0 \rangle}(C \Rightarrow_1 Q)$, представляющих факты из $\Omega_0^+ \cup \Omega_0^-$, и гипотез $J_{\langle v, 2i-1 \rangle}(C' \Rightarrow_2 Q)$ и $J_{\langle v, 2i \rangle}(C \Rightarrow_1 Q)$, соответственно, где $v \in \{1, -1\}$, а $1 \leq i \leq n$, n – такт стабилизации ДСМ-рассуждений. Истинностные значения $\langle 1, 0 \rangle$ и $\langle -1, 0 \rangle$ – фактические «истина» и «ложь» – являются **оценками фактов**. А следовательно, их эпистемологический статус относится к **теории соответствия**. Истинностные значения гипотез $\langle v, 2i-1 \rangle$ и $\langle v, 2i \rangle$ имеют другой эпистемологический статус, относящийся к **теории когерентности**, так как эти гипотезы порождаются конструктивно посредством п.п.в.-1 (индукцией) и п.п.в.-2 (аналогией). Эти истинностные значения присваиваются «телам» гипотез $C' \Rightarrow_2 Q$ и $C \Rightarrow_1 Q$ не в силу соответствия фактам, а посредством порождающих их процедур – п.п.в.-2 и п.п.в.-1, соответственно.

Из сказанного выше следует, что $\langle 1, 0 \rangle$ и $\langle -1, 0 \rangle$ могут быть заменены на логические истинностные значения t и f , принадлежащие теории соответствия; тогда как

$$\hat{v} [J_{\langle 1, 2i-1 \rangle}(C' \Rightarrow_2 Q)] = \begin{cases} t, & \text{если } v [C' \Rightarrow_2 Q] = \langle 1, 2i-1 \rangle, \\ f, & \text{иначе.} \end{cases}$$

t и f здесь выражают соответствие (несоответствие) «тела» гипотезы ($C' \Rightarrow_2 Q$) оценке $\langle 1, 2i-1 \rangle$, где «1» – тип истинностного значения «фактически истинно», а $2i-1$ – конструктивно определяемая степень правдоподобия этого типа истинностного значения. Аналогичное имеет место для $\langle 1, 2i \rangle$ и «тела» гипотезы ($C \Rightarrow_1 Q$).

Из сказанного следует неравноценность истинностных значений $\langle v, 2i-1 \rangle$, $\langle v, 2i \rangle$ и $\langle v, 0 \rangle$, где $v \in \{1, -1\}$, принадлежащих посылкам абдуктивной схемы.

Абдуктивная схема (b) из-за неистинности АКП^(σ) вызывает естественным образом пересмотр истинностных значений, превращая абдуктивное принятие гипотез в defeasible reasoning – рассуждение с пересматриваемыми истинностными значениями [50].

Рассмотрим разности множеств гипотез $\overline{\Omega}^\sigma = \overline{\Omega}_{2n}^\sigma - \tilde{\Omega}_{2n}^\sigma$ и $\overline{\Delta}^\sigma = \overline{\Delta}_{2n-1}^\sigma - \tilde{\Delta}_{2n-1}^\sigma$, где $\sigma \in \{+, -\}$.

Совершим следующий пересмотр истинностных значений:

1° Истинностные значения всех гипотез, принадлежащих $\tilde{\Delta}_{2n-1}^\sigma$ и $\tilde{\Omega}_{2n}^\sigma$, **сохраним**, а истинностные значения $\langle v, 2n-1 \rangle$ и $\langle \mu, 2n \rangle$, где $v, \mu \in \{1, -1\}$, заменим, соответственно, на множества истинностных значений $\langle \tau, 2n-1 \rangle$ и $\langle \tau, 2n \rangle$.

Эта замена является «экологически» аккуратной, так как последующее расширение БФ может уточнить эти оценки, превратив их в истинностные значения с типами v, μ , равными «1» или «-1».

Этот пересмотр истинностных значений сохраняет **принцип принятия гипотез на достаточном основании посредством выполнимости АКП^(σ)**, где $\sigma \in \{+, -\}$, абсолютной для случая (a) или частичной для случая (b) абдуктивной схемы принятия гипотез.

В заключение §2 заметим, что ДСМ-рассуждение есть познавательный процесс, образованный последовательностью Этапов I_i, $i = 1, \dots, r$, где $r \geq 1$, и завершающийся Этапом II, на котором посредством абдукции осуществляется принятие порождённых гипотез в случаях (a) или (b) – с абсолютной выполнимостью АКП^(σ) или их частичной выполнимостью, соответственно.

В случае (a) принятие гипотез является **дедуктивно обоснованным**. Однако подбор термов C_i , представляющих причины, реализуется конструктивно посредством индукции (п.п.в.-1), а подбор термов C , представляющих «тело» изучаемого эффекта Q , реализуется конструктивно посредством аналогии (п.п.в.-2).

Сказанное означает, что ДСМ-метод реализует синтез трёх познавательных процедур: индукции (для анализа данных), аналогии (для предсказания изучаемых эффектов) и абдукции (для принятия порождённых (±)-гипотез с использованием объяснения). Принятие же порождённых (±)-гипотез осуществляется на достаточном основании посредством АКП^(σ), где $\sigma \in \{+, -\}$, с использованием дедукции.

Следует отметить, что ДСМ-рассуждения, являющиеся синтезом индукции, аналогии и абдукции, реализуемые на достаточном основании с использованием дедукции, образуют класс **когнитивных рассуждений** [51], применяемых в интеллектуальных системах (ИС) с целью извлечения новых знаний (knowledge discovery) из баз фактов [17, 9, 30].

Применимость ДСМ-рассуждений к различным областям в ИС возможна лишь тогда, когда эти предметные области могут быть представлены как каузальные модели, т.е. системы отношений причина – следствие, среди которых имеются как (+)-причины, так и (–)-причины ([46]; [9], Глава 4. Синтез познавательных процедур и проблема индукции. §9. Характеризация онтологии для JSM-метода автоматического порождения гипотез, с. 147-149).

В этих предметных областях («мирах») $W^{(\pm)}$, как было сказано ранее, имеются (+)- и (–)-факты и неявно заданные зависимости причинно-следственного типа – как позитивные, вызывающие эффект, так и негативные, тормозящие появление этого эффекта. Характеризация абсолютной и частичной выполнимости аксиом каузальной полноты (АКП^(σ)) соответствует случаям (a) и (b) абдуктивного принятия гипотез в ДСМ-методе АПГ.

АКП^(σ) и процедурная семантика ДСМ-метода АПГ являются средствами квазиаксиоматических теорий (КАТ), необходимых в качестве средств представления знаний – декларативных и процедурных – в ИС, реализующих ДСМ-метод АПГ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Поппер К.Р. Объективное знание. Эволюционный подход. Гл. 1. – М.: Эдиториал УРСС, 2002. – С. 12-39; Popper K.R. Objective Knowledge: An evolutionary approach. – Oxford: At the Clarendon Press, 1979.
2. Юм Д. Исследование о человеческом разумении. – М.: Прогресс, 1995. – С. 58.; Hume D. A. An Enquiry concerning Human Understanding. – London: A. Millar, 1748.
3. Юм Д. Трактат о человеческой природе. Кн. 1, Часть III, гл. 6.; Hume D.A. Treatise of Human Nature. John Noon, 1739.
4. Бернайс П. О рациональности. В кн.: Эволюционная эпистемология и логика социальных наук (Карл Поппер и его критики). – М.: Эдиториал УРСС, 2000. – С. 154-162;
- Bernays Paul. Concerning Rationality // The Philosophy of Karl Popper / ed. by Schilpp P.A. The Library of living Philosophers, vol. 14, I. Open Court Publishing Co., La Salle, Illinois, 1974. – P. 597-605.
5. Gillies D. Artificial Intelligence and Scientific Method. – Oxford: University Press, 2008.
6. Бэкон Ф. Новый Органон. ОГИЗ-СОЦЭГИЗ. Ленинградское отделение, 1935;
- Bacon F. The Novum Organon, or a True Guide to the Interpretation of Nature. – Oxford: Oxford University Press, 1855.
7. Гершель Дж. Философия естествознания. Издание второе. – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2011; Herschel J.F.W. Preliminary Discourse on the Study of Natural Philosophy. – London, 1851.
8. Милль Д.С. Система логики силлогистической и индуктивной. Издание пятое. – М.: ЛЕНАНД, 2011; Mill J.S. A System of Logic Ratiocinative and Inductive, Being a Connected View of the Principles of Evidence and The Methods of Scientific Investigation. – London: Parker, Son and Bowin, 1843.
9. ДСМ-метод автоматического порождения гипотез: логические и эпистемологические основания / под общей ред. О.М. Аншакова. – М.: ЛИБРОКОМ, 2009.
10. Whewell W. History of the Inductive Sciences. Vols. 1-3. – London, 1837;
- Уэвелл У. История индуктивных наук от древностей и до настоящего времени. В 3 т. – СПб.: Русская книжная торговля, 1867-1869.
11. Whewell W. Philosophy of the Inductive Sciences. Vols. 1-2. – London, 1840.
12. Лейкфельд П. Логическое учение об индукции. – СПб.: Русская книжная торговля, 1868.
13. Владиславлев М.И. Логика. – СПб., 1881. – Приложение, с. 223-233.
14. Пирс Ч.С. Как сделать наши идеи ясными. В кн.: Пирс Ч.С. Избранные произведения. – М.: ЛОГОС, 2000; Peirce C.S. How to make Our Ideas Clear // Popular Science Monthly. – Vol. 12. – P. 286-302.
15. Лахути Д.Г. Милль, Пирс и Поппер. О логике научного открытия // Вопросы философии. – 2012. – № 3. – С. 101-109.
16. Ajdukiewicz the Scientific world-perspective and other essays 1931-1963 // Synthese Library. – 1978. – Vol. 108, §3. The World-Picture and the Conceptual Apparatus. – P. 67-89. (Dordrecht-Holland, Boston, U.S.A.).
17. Автоматическое порождение гипотез в интеллектуальных системах. – М.: ЛИБРОКОМ, 2009.
18. Финн В.К. Д.С. Милль и его идеи об индукции и «логике нравственных наук». В кн.: Д.С. Милль Система логики силлогистической и индуктивной. – М.: ЛЕНАНД, 2011. – С. 7-14.
19. Финн В.К. Система логики силлогистической и индуктивной // Энциклопедия эпистемологии и философии науки. – М.: «Канон⁺», 2009. – С. 867-868.
20. ван. Бентем Й. Логика и рассуждения: много ли значат факты? // Вопросы философии. – 2011. – № 2. – С. 63-76; Van Benthem J. Logic and Reasoning: Do the Facts Matter? // Studia Logica. – 2008. – Vol. 88, №1. – P.67-84.
21. Финн В.К. Искусственный интеллект: методология, применения, философия. Часть I, Часть III. – М.: КРАСАНД, 2011.
22. Nickerson R.S., Perkins D.N., Smith E.E. The teaching of thinking. Hillsdale. №7: Erlbaum, 1985.
23. Wertheimer M. Productive thinking. – New York: Harper and Bros, 1954.
24. Крафт В. Венский кружок. Возникновение неопозитивизма. Глава новейшей истории философии. – М.: Идея-Пресс, 2003; Kraft V. Der Wiener Kreis. Der Ursprung des Neopositivismus. Ein Kapitel der jungsten Philosophiegeschichte. – Wien: Springer - Verlag, 1950.
25. Fann K.T. Peirce's Theory of abduction // Martinus Nijhoff. – The Hague, 1970.
26. Aliseda A. Abductive Reasoning // Synthese Library. – 2006. – Vol. 330.
27. Финн В.К. Индуктивные методы Д.С. Милля в системах искусственного интеллекта. Часть I. // Искусственный интеллект и принятие решений. – 2010. – № 3. – С. 3-21; Finn V.K. J.S. Mill's Inductive Methods in Artificial Intelligence Systems, Part I // Scientific and Technical Information Processing. – 2011. – Vol. 38, № 6. – P. 385-402;

28. Финн В.К. Индуктивные методы Д.С. Милля в системах искусственного интеллекта. Часть II. // Искусственный интеллект и принятие решений. – 2010. – № 4. – С. 14-40; Finn V.K. J.S. Mill's Inductive Methods in Artificial Intelligence Systems. Part II // Scientific and Technical Information processing. – 2012. – Vol. 39, № 5. – P. 241-261.
29. Волкова А.Ю. Алгоритмизация процедур ДСМ-метода автоматического порождения гипотез // Научно-техническая информация. Сер. 2. – 2011. – № 5. – С. 6-12; Volkova A.Y. Algorithmization Procedures of JSM Method for Automatic Hypothesis Generation // Automatic Documentation and Mathematical Linguistics. – 2011. – Vol. 45, № 3. – P. 113-120.
30. Волкова А.Ю. Анализ данных различных предметных областей с помощью процедур ДСМ-метода автоматического порождения гипотез // Научно-техническая информация. Сер. 2. – 2011. – № 6. – С. 9-18; Volkova A.Y. Analyzing the Data of Different Subject Fields Using the Procedures of JSM Method for Automatic Hypothesis Generation // Automatic Documentation and Mathematical Linguistics. – 2011. – Vol. 45, № 3. – P. 127-139.
31. Финн В.К. Правдоподобные выводы и правдоподобные рассуждения. Итоги науки и техники. Т. 28, Теория вероятностей. Математическая статистика. Теоретическая кибернетика. – М., 1988. – С. 3-84; Finn V.K. The plausible inferences and the plausible reasonings // Journal of Soviet Mathematics. Plenum Publ. Co. – 1991. – Vol. 56, № 1.
32. Финн В.К. Об определении эмпирических закономерностей посредством ДСМ-метода автоматического порождения гипотез // Искусственный интеллект и принятие решений. – 2010. – № 4. – С. 41-48; Finn V.K. On the Definition of Empirical Regularities by the JSM Method for the Automatic Generation of Hypotheses // Scientific and Technical Information Processing. – 2012. – Vol. 39, № 5. – P. 261-267.
33. Rosser J.B., Turquette A.R. Many-Valued Logics. – North-Holland Publishing Company, Amsterdam, 1958.
34. Барвайс Д. Введение в логику первого порядка. Справочная книга по математической логике. Часть I. Теория моделей. – М.: Наука, 1982. – С. 51-52; Handbook of mathematical logic / ed J. Barwise. – North-Holland Publishing Company, Amsterdam, New York, Oxford, 1977.
35. Финн В.К. Индуктивный метод соединенного сходства-различия и процедурная семантика ДСМ-метода // Научно-техническая информация. Сер. 2. – 2010. – № 4. – С.1-17; Finn V.K. Inductive Method of Joint Agreement-Difference and Procedural Semantics of the JSM Method // Automatic Documentation and Mathematical Linguistics. – 2010. – Vol. 44, № 2. – P. 68-88.
36. Бочвар Д.А. Об одном трехзначном исчислении и его применении к анализу парадоксов классического расширенного функционального исчисления // Математический сборник. – Т. 4, Выпуск 2, 1938. – С. 287-308.
37. Финн В.К. О суперстратегиях интеллектуальных систем типа ДСМ для evidence based medicine // Научно-техническая информация. Сер. 2. – 2011. – № 11. – С. 2-9; Finn V.K. On Super Strategies of Intelligent Systems of the JSM Type for Evidence-Based Medicine // Automatic Documentation and Mathematical Linguistics. – 2011. – Vol. 45, № 6. – P. 267-277.
38. Пирс Ч.С. Рассуждения и логика вещей. – М.: РГГУ, 2005; Peirce C.S. Reasoning and the Logic of Things // The Cambridge conferences Lectures of 1898. – Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts, London, 1992.
39. Burks A.W. Peirce's theory of abduction // Philosophy of Science. – 1946. – Vol. 13, № 4. – P. 301-306.
40. Fann K.T. Peirce's theory of abduction // Martinus Nijhoff. – The Hague, 1970. – P.7.
41. Eisele C. Studies in the Scientific and Mathematical Philosophy of Charles S. Peirce // Essays by Carolyn Eisele. – The Hague-Paris-New York: Mouton Publishers 1979.
42. Kapitan T. Peirce and the Autonomy of Abductive Reasoning // Erkenntnis. – 1992. – Vol. 37/
43. Paul G. AI Approaches to Abduction // Handbook of Defeasible Reasoning and Uncertainty Management Systems / eds. D.M. Gabbay, P. Smets. – Vol. 4. Abductive Reasoning and Uncertainty Management Systems. – Dordrecht-Boston-London: Kluwer Academic Publishers, 2000.
44. Peirce C.S. Collected papers, vol.5. – Harvard University Press, Cambridge, MA, 1934. – P. 189.
45. Abductive Inference: Computation, Philosophy, Technology / eds. J.R. Josephson, S.G. Josephson. – Cambridge: University Press, 1994.
46. Аншаков О.М. Каузальные модели предметных областей // Научно-техническая информация. Сер.2. – 2000. – № 3. – С. 45-53.
47. Финн В.К. Синтез познавательных процедур и проблема индукции // Научно-техническая информация. Сер.2. – 1999. – № 1-2. – С. 8-454; Finn V.K. The Synthesis of Cognitive Procedures and the Problem of induction // Automatic Documentation and Mathematical Linguistics. – 2009. – Vol. 43, № 3. – P.149-195.
48. Гемпель К.Г. Логика объяснения. Дом интеллектуальной книги, М., 1998, стр. 89-146; Hempel C.G., Oppenheim P. The Logic of Explanation Philosophy of Science, 1948, N 15, pp. 130-175
49. Гаек П., Гавранек Т. Автоматическое образование гипотез. – М.: Наука, Главная редакция физ.-мат. литературы, 1984; Hájek P., Havráněk T. Mechanizing Hypothesis Formation. Mathematical Foundations for a General Theory. – Berlin-Heidelberg-New York: Springer-Verlag, 1978.

50. Prakken H., Vreeswijk G. Logics for defeasible argumentation // Handbook of Philosophical Logic. Vol. 4. – Dordrecht-Boston-London: Kluwer Academic Publishers, 2001.
51. Anshakov O., Gergely T. Cognitive Reasoning. A Formal Approach. – Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, 2010.

Материал поступил в редакцию 10.07.13

Сведения об авторе

ФИНН Виктор Константинович – доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки Российской Федерации, зав. сектором интеллектуальных информационных систем ВИНТИ РАН, зав. Отделением интеллектуальных систем в гуманитарной сфере РГГУ, Москва.
e-mail: finn@viniti.ru

Ситуационные центры: методика грамматического обучения интеллектуальной аналитической системы*

Предложен метод автоматического формирования грамматических правил в информационно-аналитической системе ситуационного центра по функциональным моделям и описывающим их обучающим текстам.

Ключевые слова: компьютерное понимание текста, автоматическое обучение грамматике, извлечение знаний из текстов, сеть функциональных нейронов, ФН-сеть

Ключевое требование, предъявляемое к современным ситуационным центрам, – скорость адаптации при изменении внешних условий и параметров моделируемой ситуации. Эта скорость определяется временем коррекции математических моделей и алгоритмов в системе поддержки принятия решений (СППР), обеспечивающей лицо, принимающее решение необходимой информацией. Одним из способов ее повышения является реализация концепции управления на основе знаний [1, 2], предполагающая автоматический синтез алгоритмов оптимизации и автоматическую коррекцию математических моделей, используемых для прогнозов при принятии решений. Подобные системы известны как интеллектуальные СППР (ИСППР) [3, 4]. К сожалению, они пока находятся на стадии экспериментов, что обусловлено сложностью их обучения и недостаточным объемом базы знаний (БЗ), а также недостаточной эффективностью механизмов автоматической коррекции и автоматического синтеза алгоритмов управления. Однако, успехи в области создания и эксплуатации систем понимания текста на естественном языке, успехи в области разработки систем использования знаний [5, 6] свидетельствуют о перспективности этого направления и необходимости поиска новых способов его реализации. Одним из возможных подходов к созданию ИСППР является формализм сетей функциональных нейронов (ФН) [7, 8], позволяющий существенно снижать время поиска решения благодаря сжатию пространства реше-

ний [9] и сокращения объема БЗ ее автоматическим обобщением [10]. Следующий шаг в повышении устойчивости ИСППР к изменениям окружающего мира – это переход от ручного формирования базы знаний к ее автоматическому наполнению по текстам на естественном языке. В работах [11, 12] представлен механизм преобразования текстов в функциональные модели в виде сети ФН, с помощью грамматических правил, сформированных вручную. В настоящей работе рассматривались процессы автоматического формирования этих правил.

Формализуем задачу грамматического обучения, для этого напомним основные определения и термины. Прежде всего, заметим, что любая предметная деятельность – это совокупность взаимосвязанных в пространстве и времени **операций**. Независимо от природы, в каждой операции присутствует **субъект**, осуществляющий операцию, и **объекты** на входе и выходе, над которыми осуществляется операция. Объект – это неделимый элемент на уровне рассмотрения операции. Однако на других уровнях детализации объект может иметь сложную структуру и обозначать совокупность взаимодействующих субъектов, выполняющих операции над более мелкими объектами. Далее такие произвольные совокупности взаимодействующих субъектов назовем **ситуациями**, оставляя за собой право, именовать их объектами, когда они, как неделимое целое, участвуют в операциях. Заметим, что операция также может быть подвергнута декомпозиции, и играть роль объекта для другой операции. Каждый субъект, объект и операция имеет характеристику – список параметров, которые позволяют выделять их из окружающего мира и различать между собой. Учитывая, что взгляд аналитика на одну и ту же сущность (субъект, объект, операция, параметр) зависит от контекста, для

* Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России по государственному контракту от 07.06.2012 г. № 07.514.11.4132 в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2013 годы».

их представления используются одни те же формальные структуры, дающие представление о классе сущностей и конкретной сущности некоторой предметной области. Пусть $\aleph$ -множество имен классов, тогда описание класса $F \in \aleph$ однотипных сущностей (операций) примет вид:

$$\langle F, \bar{X}, \bar{Y}, \bar{P} \rangle, \quad (1)$$

где $\bar{X} = [X_1, X_2, \dots, X_n] (X_i \in \aleph, i = \overline{1, n})$ – n -мерный вход операции в виде упорядоченного списка классов объектов, к которым применима операция типа F ;

$\bar{Y} = [Y_1, Y_2, \dots, Y_m] (Y_i \in \aleph, i = \overline{1, m})$ – m -мерный выход операции – упорядоченный список классов объектов, которые могут быть получены после ее применения.

$\bar{P} = [P_1, P_2, \dots, P_l] (P_i \in \aleph, i = \overline{1, l})$ – l -мерный список классов объектов, которые выступают в роли параметров.

Если класс F описывает сущности, которые не являются операциями, то списки, определяющие вход/выход, являются пустыми множествами $\bar{X} = \bar{Y} = \emptyset$.

Пусть $\mathfrak{F}$ – множество имен конкретных сущностей ($\mathfrak{F} \cap \aleph = \emptyset$). Тогда конкретная операция $f \in \mathfrak{F}$ класса F описывается во времени кортежем:

$$\langle F, f, \bar{x}, \bar{y}, \bar{p} \rangle, \quad (2)$$

где $\bar{x} = [(X_1, x_1, T^{X_1}), \dots, (X_n, x_n, T^{X_n})]$, описание связей, характеризующих объекты на входе операции $f (x_i \in \mathfrak{F}$ – объект, на i -м входе $X_i (X_i \in \aleph), T^{X_i}$ – интервал времени, в течение которого действует связь (x_i, X_i));

$\bar{y} = [(Y_1, y_1, T^{Y_1}), \dots, (Y_m, y_m, T^{Y_m})]$ – описание связей на выходе f , где $y_j \in \mathfrak{F}$ объект, на j -м выходе $Y_j (Y_j \in \aleph), T^{Y_j}$ – интервал действия связи (Y_j, y_j) ;

$\bar{p} = [(P_1, p_1, T^{P_1}), \dots, (P_l, p_l, T^{P_l})]$ – параметрическая характеристика, где $p_j \in \mathfrak{F}$ объект, являющийся значением параметра класса $P_j (P_j \in \aleph)$ на интервале T^{P_j} .

Если сущность f не является операцией, то списки, характеризующие вход и выход в (2), являются пустыми множествами ($\bar{x} = \bar{y} = \emptyset$).

Структуру (2), наделенную функциональностью, обеспечивающей поиск решения, назовем **функциональным нейроном (ФН)**, а множество определяемых структур (2), описывающих произвольную ситуацию, – **сетью ФН**. Подробно эта функциональность описана в [7, 8]. Решение задачи ищется в виде схемы операций, увязанных в пространстве и времени, исполнение которой трансформирует некоторую исходную ситуацию, представленную в виде сети ФН, в желаемую. По-

иск схемы осуществляется двухуровневым автоматом, который пытается выделить искомую схему выполнения операций из текущей конфигурации ФН сети, уже существующей к определенному шагу решения. И если это сделать не удастся, то текущая сцена расширяется **сценами** из БЗ. Сценами называются именованные ситуации (сети ФН), хранимые в БЗ. Подробное описание механизма поиска решения можно найти в [7-10].

Сцена в БЗ – это пара, состоящая из сети ФН $B = \{\langle F, f, \bar{x}, \bar{y}, \bar{p} \rangle\}$ (тела) и внешнего представления, которое содержит имена классов объектов, операций, субъектов и параметров, определенных посредством B (Определить сущность – это значит назвать ее и указать ее параметрические и функциональные связи с другими сущностями в сцене). Внешнее представление, описывается структурой

$$\langle B, \{O\}, \{P\}, \{F\} \rangle \quad (3)$$

Это представление выполняет функцию ассоциативного ключа, по которому по элементам, входящим в сцены, из базы знаний можно извлечь тело B с функциональными и параметрическими связями, определяющими соответствующие классы субъектов/объектов $\{O\}, (O \in \aleph)$, операций $\{F\}$ и параметров $\{P\}$. Формирование БЗ осуществляется с помощью редактора онтологий, включающего средство ведения каталога и графический редактор, предназначенный для отображения и построения функциональных схем (сцен) из ранее определенных понятий. Иерархии сцен строятся по правилам, близким к стандарту IDEF0 [13], поддерживающим функциональную декомпозицию и формирование моделей «сверху - вниз». Однако, как показала практика, ручное формирование функциональных моделей предметных областей, со степенью детализации, необходимой для автоматического синтеза решения, предъявляет повышенные требования к квалификации системных аналитиков и является крайне трудоемкой задачей. Поэтому в работе [11] был разработан механизм, позволяющий пополнять БЗ по текстам на естественном языке.

Построение сцены из текста для БЗ начинается с лексико-морфологического анализа. Его цель – заменить слова (строки) и знаки препинания входного текста единообразной последовательностью лексем в форме, удобной для последующего анализа. Такое преобразование выполняется в модуле лексико-морфологического разбора [14], на вход которого поступает исходный текст T , преобразуемый в упорядоченную последовательность лексем

$$T = \langle \bar{W}_i \rangle, i = \overline{1, I}, \quad (4)$$

где I – длина текста. Лексема W_i соответствует i -ому слову или знаку препинания в тексте и представляет собой массив лексических единиц $\bar{W}_i = [w_1^i, w_2^i, \dots, w_{r_i}^i]$. Лексическая единица (ЛЕ) обозначает знак препинания, либо представляет семантическую интерпретацию слова (омоним), которых у слова может быть несколько. Пусть для определенности i -ое слово имеет r_i интерпретаций, каждая из

которых имеет свое описание в БЗ (Например, у слова «коса» имеются интерпретации прически, инструмента и географического объекта, каждой интерпретации соответствует своя сцена и внешнее представление). Соответственно ЛЕ конкретной интерпретации слова имеет вид:

$$w = \langle G, e, \bar{Q} \rangle, \quad (5)$$

где $G, (G \in \aleph)$ имя класса понятия (инфинитив) в БЗ, определяемого данным словом, e – часть речи, $\bar{Q}$ – набор грамматических параметров (род, число, падеж и т.д.) слова в тексте. Если в тексте встретился знак препинания или предлог, в ЛЕ указывается лишь код этого знака или предлога, а остальные параметры лексической единицы не используются.

Теперь, двигаясь по тексту (4) и отбирая из каждой лексемы по одной ЛЕ, можно получать различные омонимические варианты интерпретации текста. Не все эти интерпретации могут иметь смысл, а некоторые из них могут противоречить контексту. Собственно задача грамматического разбора, который в рассматриваемой системе [11, 12] совмещен с семантическим анализом, заключается в выборе наиболее правильного варианта интерпретации с учетом контекста сцены, который будет к этому моменту сформирован. Процесс формирования сцены, интерпретирующей текст, выполняется автоматом грамматического разбора. На его вход поступает последовательность ЛЕ, соответствующая некоторому омонимическому варианту интерпретации. Сам автомат определяется множеством состояний $\{S_1, \dots, S_i, \dots, S_I\}$ и функцией перехода

$$\varphi : (S_i, \tilde{w}_i) \rightarrow S_{i+1} \quad (6)$$

где

$$\tilde{w}_i = \langle \tilde{G}_i, \tilde{g}_i, \tilde{e}_i, \tilde{\bar{Q}}_i \rangle \quad (7)$$

– шаблон лексической единицы, определяющий переход в очередное состояние автомата. Он содержит следующие атрибуты:

$\tilde{G}_i$ – идентификатор инфинитива из БЗ, либо неопределенное значение ‘?’;

$\tilde{g}_i$ – локальное имя, с помощью которого объект, соответствующий инфинитиву, встраивается в сцену;

$\tilde{e}_i$ – часть речи, либо неопределенное значение ‘?’;

$\tilde{\bar{Q}}$ – вектор грамматических параметров, в котором любой из грамматических параметров может принимать неопределенное значение ‘?’.

С автоматом грамматического разбора (6,7) связана сцена H . После согласования она будет встраиваться в контекст. Эту сцену можно представить в виде множества структур (2):

$$H = \{ \langle \tilde{G}_i, \tilde{g}_i, \bar{x}_i, \bar{y}_i, \bar{p}_i \rangle \} \quad (8)$$

В этих структурах идентификаторы классов и имена объектов взяты из шаблонов (7). Сцена H может быть не полностью определенной. Это значит, что имена классов $\tilde{G}_i$ и локальные имена

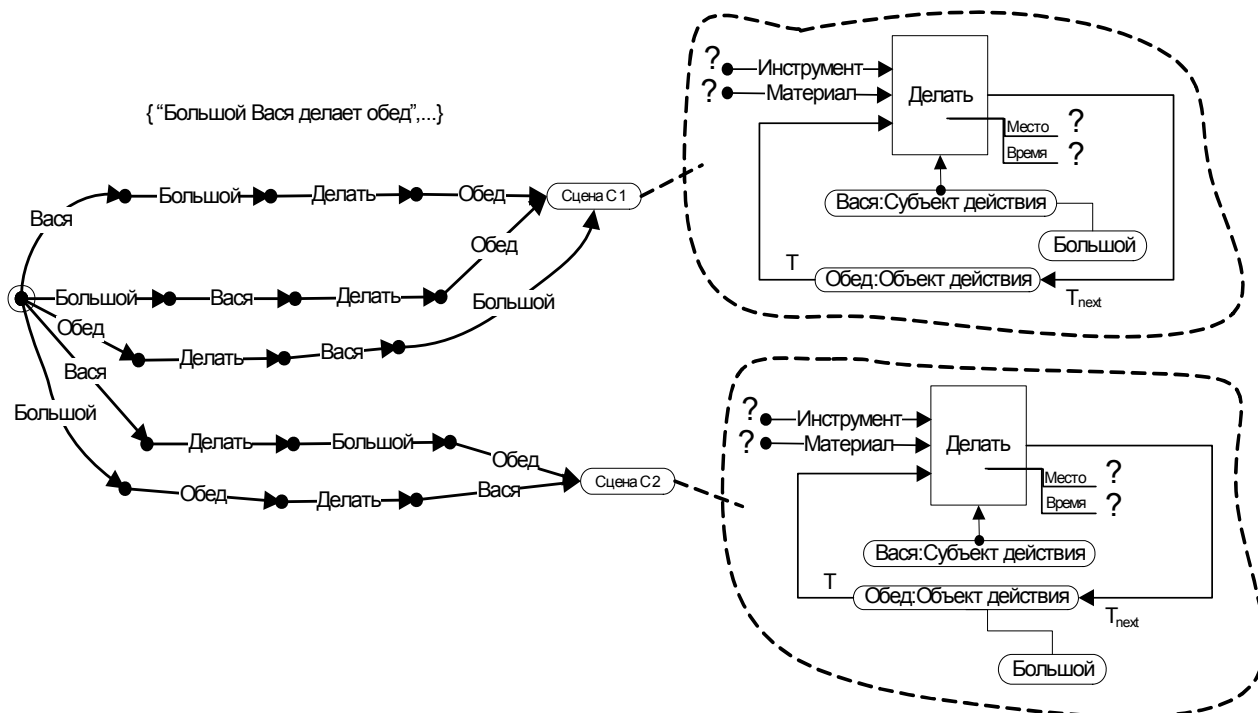
p_l, x_n, y_m в характеристиках параметров $\bar{P}_{g_i}$, входа $\bar{X}_{g_i}$ и выхода $\bar{Y}_{g_i}$ (2) могут принимать неопределенные значения, уточняемые при встраивании в контекст.

При разборе одного из омонимических вариантов исходного текста атрибуты входной ЛЕ w_i (5) сопоставляются с атрибутами шаблона $\tilde{w}_i$ (7). Они считаются совпадающими, если у них совпадают все определенные параметры, а класс G является производным от $\tilde{G}_i$ [10], либо $G_i = \tilde{G}_i$. При совпадении ЛЕ и шаблона осуществляется переход (6) в следующее состояние, а в сцене (8) с помощью соответствия локальных имен объектов в сцене и в шаблоне вместо неопределенных имен классов $\tilde{G}_i$ подставляются инфинитивы из входной ЛЕ. При этом из БЗ по инфинитиву G_i извлекается описание класса (1), и осуществляется контроль на предмет совместимости связей, допустимых для данного класса, и связей в сцене (8). Варианты, не прошедшие такой контроль, отбрасываются. После перехода в конечное состояние, варианты омонимической интерпретации, прошедшие проверку, встраиваются в контекст. Процесс формирования множества вариантов контекста и последующее их усечение проверкой на эквивалентность и противоречивость изложен в [11].

Теперь мы можем строго определить задачу грамматического обучения как построение функции перехода φ (6), определением числа состояний, формированием шаблонов $\tilde{w}_i$ (7), и назначением в (8) локальных имен $\tilde{g}_i$, определяющих место ЛЕ в сцене по ее месту в последовательности ЛЕ, получаемых из анализируемого текста T (4).

Исходными данными для автоматического формирования грамматических правил служат заранее подготовленная сцена, построенная вручную, и соответствующие ей семантически эквивалентные тексты из одних и тех же слов, но с разной грамматической структурой в виде одного или нескольких предложений. Примеры таких сцен и текстов можно найти на рисунке, где представлены семантически эквивалентные, но разные по грамматической структуре тексты: «Большой Вася делает обед», «Вася большой делает обед» и так далее – сцена C_1 , и «Вася делает большой обед», «Большой обед делает Вася» и так далее – сцена C_2 (см. рисунок).

Пусть $\{T_k^C\}, k = \overline{1, K}$ – множество текстов с разной грамматической структурой, описывающих сцену C . На первом шаге обучения каждый такой текст



Примеры обучающих сцен и текстов

преобразуется в последовательность лексем, из которых вручную отбирается правильная ономимическая интерпретация $W_k^C = \langle w_j^{C,k} \rangle, j = \overline{1, J}$ в виде последовательности ЛЕ (5) (J – длина текста), допускающая однозначное толкование сцены. Каждая такая интерпретация определяет предварительную структуру автомата грамматического разбора, число состояний которого равно длине текста J , а шаблон (7), определяющий j -й переход, совпадает с лексической единицей на j -ом месте последовательности. Далее для каждого инфинитива из ЛЕ определяется его место в сцене S и, соответственно, в шаблон (7) заносится имя элемента из сцены $\tilde{g}_i$. На следующем шаге сцена S сравнивается с другими сценами, для которых ранее уже были построены распознающие автоматы. Рассматриваются сцены (8), имеющие изоморфные графы параметрических и функциональных связей с точностью до имен классов в узлах графов (они могут различаться). Изоморфным узлом, в которых стоят разные инфинитивы, ставятся в соответствие неопределенные имена $\tilde{G}_i = ?$. Соответствующие неопределенные имена заменяют имена классов объектов в грамматических характеристиках (7). На этом процедура формирования грамматических правил заканчивается, и они могут быть использованы для автоматического пополнения БЗ с помощью специальных текстов на естественном языке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Поспелов Д.А. Ситуационное управление: теория и практика. – М.: Наука, 1986.
- Клыков Ю.И. Ситуационное управление большими системами. – М.: Энергия, 1974
- Филиппович А.Ю. Интеграция систем ситуационного, имитационного и экспертного моделирования. – М.: Изд-во "ООО Эликс+", 2003. – 300 с.
- Богданов Ю.М., Луганский В.Э., Марков А.А., Селиванов С.А. Комплексная технология создания и развития ведомственных ситуационных центров // Информатизация и связь. – 2011. – № 6.
- Богатырев М.Ю., Тюхтин В.В. Решение некоторых задач Text Mining при помощи концептуальных графов // Труды 10-й Всероссийской научной конференции «Электронные библиотеки». – Дубна, 2008
- Андреев А.М., Березкин Д.В., Симаков К.В. Модель извлечения знаний из естественно-языковых текстов // Информационные технологии. – 2007. – № 12. – С. 57–63.
- Бетин В.Н., Лукьянов С.Э., Супрун А.П. Использование элементов искусственного интеллекта в ситуационных центрах // Информатика и связь. – 2009. – № 2.
- Бетин В.Н. Дедуктивный вывод в системах автоматизированного проектирования и машинного перевода // Научно-техническая информация. Сер.2. – 2004. – № 7. – С. 20-27.
- Бетин В.Н., Лукьянов С.Э., Супрун А.П. Повышение эффективности подсистемы принятия решений в ситуационных центрах путем сжатия пространства решений // Информация и связь. – 2012. – № 8.
- Бетин В.Н., Супрун А.П. Некоторые методы обработки и обобщения знаний в интеллектуальной системе поддержки принятия решений

ситуационного центра, построенной на базе сетей функциональных нейронов // Информация и связь. – 2013. – № 12 (в печати).

11. Бетин В. Н., Лукьянов С. Э., Супрун А. П. Выделение знаний из текстов на естественном языке в интеллектуальной аналитической системе // Информатизация и связь. – 2011. – № 6.
12. Бетин В.Н. Семантический процессор для машинного перевода // Научно-техническая информация. Сер.2. – 2001. – № 8. – С. 20-27.
13. Марка Д., Мак-Гоуэн К. Методология структурного анализа и проектирования SADT. – М.: Метатехнология, 1993. – 311 с.
14. Большакова Е.И., Клышинский Э.С., Ландэ Д.В., Носков А.А., Пескова О.В., Ягунова Е.В. Автоматическая обработка текстов на естественном языке и компьютерная линг-

вистика: учеб. пособие. – М.: Московский государственный институт электроники и математики, 2011.

Материал поступил в редакцию 20.06.13.

Сведения об авторах

БЕТИН Владимир Николаевич – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник Центра информационных технологий и систем, Москва
e-mail: betin_v@mail.ru и служебный betin@inevm.ru

СУПРУН Антон Павлович – начальник отдела Центра информационных технологий и систем, Москва
e-mail: suprun@inevm.ru

Прогнозирование свойств химических соединений на основе структурно-неаддитивных моделей с учетом парциальных вкладов структурных элементов

Описываются структурно-неаддитивные модели с учетом парциальных вкладов структурных элементов, положенные в основу функционирования информационной системы прогнозирования свойств химических соединений и ориентированные на решение задачи отбора потенциально опасных химических веществ. Приводятся результаты оценки эффективности предлагаемого подхода на выборках из широкого спектра химических веществ.

Ключевые слова: информационные системы, химические вещества, структурно-неаддитивные модели, физико-химические свойства, адиабатическая температура, прогнозирование

ВВЕДЕНИЕ

Использованию моделей статистического распознавания в системе виртуального скрининга химических веществ посвящена работа [1], где показано, что, несмотря на наличие большого числа алгоритмов и программ для проведения виртуального скрининга, проблема еще далеко не закрыта, поскольку для процедур как виртуального, так и традиционного скрининга большое значение имеют эффективность, стоимость и время, потраченное на операцию. Исходя из этого, мы предложили использовать классические модели статистического распознавания образов в задачах виртуального скрининга химических веществ, что дает результаты, не уступающие, а в ряде случаев превосходящие показатели существующих промышленных информационных систем отбора соединений-кандидатов для их последующих испытаний.

Еще одним важным критерием отбора химических веществ являются такие физико-химические показатели, как адиабатическая температура горения, температура самовоспламенения, верхний и нижний концентрационные пределы воспламенения [2, 3]. При этом в случае виртуального скрининга, целесообразно применять вычислительные методы, поскольку экспериментальное определение показателей часто затруднительно как по объективным обстоятельствам, так и ввиду существенной трудоемкости и дороговизны.

Развитые программные средства ввода молекулярных структур в ЭВМ и автоматическое порождение структурных элементов заданной степени

сложности позволяют работать в следующих направлениях:

- 1) осуществлять полную автоматизацию расчетов по описанным в литературе моделям;
- 2) выполнять ревизию структурно-аддитивных моделей с использованием новых структурных элементов;
- 3) разрабатывать новые структурно-неаддитивные модели.

Первое направление характеризуется тем, что к настоящему времени уже создан ряд банков данных и систем расчета для описанных показателей органических соединений по приведенным в литературе моделям [4]. Деятельность по второму направлению ограничена тем, что с усложнением структурных элементов резко растет число подлежащих определению параметров моделей. К тому же, в силу ограниченности объема доступных экспериментальных данных (обучающих выборок), на практике возможно использование лишь простейших структурных элементов.

Далее на конкретных примерах (корреляции структуры – физико-химические свойства) будет показана возможность прогресса по третьему направлению, когда используется понятие парциальных вкладов структурных элементов.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АДИАБАТИЧЕСКОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ

В основу вычислительных методов часто закладывается допущение об адиабатичности процессов, протекающих при горении [5]. Поэтому многие расчетные методы, связанные с вычислением такого

важного показателя, как нижний концентрационный предел воспламенения, требуют знания адиабатической температуры горения. В этих расчетах исходят из энергетического баланса системы в виде равенства энергии, поставляемой горючим, и энергии, которую система затрачивает на необходимый нагрев до адиабатической температуры горения (обычно принимаемой равной 1550 К) флегматизатора, присутствующего в предельной смеси. Точность расчета нижнего концентрационного предела воспламенения по потенциалу горючести определяется степенью близости адиабатической температуры горения к 1550 К. Это приводит к необходимости моделирования адиабатической температуры горения на нижнем уровне T_f в зависимости от структурной формулы химического вещества. Центральный момент при нахождении зависимости адиабатической температуры горения на нижнем уровне от структуры вещества – это решение вопроса о том, от каких структурных элементов молекулы зависит процесс горения на нижнем пределе.

Для моделирования зависимости T_f от структуры вещества используем простейший выбор парциальных структурных инкрементов, в котором в качестве структурных элементов взяты пары непосредственно связанных атомов с учетом того, каким химическим элементам принадлежат эти связи, а также атомы с учетом валентного состояния.

Мы использовали структурно-неаддитивные модели, которые имеют следующий вид:

$$T_f = \sum_k T_k x_k, \quad (1)$$

где T_k – парциальный вклад k -го структурного элемента в параметр T_f ,

x_k – доля k -го структурного элемента в молекуле и

$$x_k = \frac{n_k}{\sum_{i=1}^m n_i},$$

где m – число структурных элементов (молекулярных фрагментов),

n_k – число структурных элементов k -го типа в молекуле.

Модель (1) учитывает зависимость параметров от качественного (относительного) состава молекул, в отличие от структурно-аддитивных моделей, учитывающих зависимость от количественного состава.

Для уточнения структурно-неаддитивных моделей вида (1) необходимо учесть взаимовлияние структурных фрагментов (зависимость одних компонентов горючего химического вещества от наличия других), а точнее – зависимость инкрементов T_k от структуры молекулы, определяющей изменения распределения электронной плотности на фрагментах, а также геометрические характеристики молекулы. Данная модель позволяет это учитывать путем рассмотрения следующих иерархий регулярно усложняющихся структурных элементов:

- атомы без учета окружения (учитывается химический вид атома и распределение связей, обра-

зуемых этими атомами с другими атомами, т. е. валентное состояние или гибридизация);

- атом – связь – атом;
- атомы с учетом первого окружения (к элементам описания атома без учета окружения добавляется перечень непосредственно связанных с ним атомов с указанием или без указания их валентного состояния);
- атомы с учетом первого и второго окружения (т. е. с указанием совокупности атомов, удаленных от центрального атома не менее чем на две связи).

Иерархия может быть продолжена дальше вплоть до максимального учета окружения, при котором для каждого атома, рассматриваемого в качестве центрального, учитываются в качестве окружения все остальные атомы молекулы.

Аналогичным образом строится и иерархия связей. Для этого в иерархии атомов, приведенной выше, достаточно заменить центральный атом на связь, т. е. на пару химически связанных атомов с учетом их валентного состояния.

Наиболее существенными факторами, определяющими величину T_f , являются относительные характеристики молекулы химического вещества. Введем понятие адиабатической температуры горения T_k гипотетического вещества, имеющего структурные элементы только k -го типа. Если рассматривать молекулы реального вещества как комплексы, образованные из молекул гипотетических веществ, и предположить аддитивность вкладов этих гипотетических веществ в адиабатическую температуру горения на нижнем пределе реального вещества, то это приводит к модели (1).

Дадим физико-химическую интерпретацию этой формальной модели (см. также [6]).

Согласно современной тепловой теории распространения пламени [7], уравнение для нормальной скорости пламени u_n можно представить в виде:

$$u_n^2 = F \exp\left(-\frac{E}{RT}\right),$$

где: E и T – энергия активации и температура ведущей стадии процесса, соответственно;

F – функция физико-химических параметров горючей смеси (коэффициентов диффузии, теплоемкостей, концентраций, теплотер, кинетических параметров стадий химического превращения и т.д.);

R – газовая постоянная.

Для нашего случая, когда T совпадает с адиабатической температурой горения T_f , а E рассматривается как эффективная энергия активации, имеем:

$$T_f = \frac{E}{R} \frac{1}{\ln\left(\frac{F}{u_n^2}\right)}.$$

Энергия активации хорошо моделируется уравнением вида $E = \sum_k E_k x_k$.

Учитывая, что на нижнем пределе значения u_n слабо зависят от вида химического вещества и что

величина $\frac{F}{u_n^2}$ есть аргумент логарифмической функции, можно предположить достаточную гладкость

функции $\ln(\frac{F}{u_n^2})$ и использовать для ее аппроксимации выражение следующего вида:

$$\ln(\frac{F}{u_n^2}) = \sum_i f_i x_i.$$

Тогда для T_r получаем дробнолинейную модель вида:

$$T_r = \frac{\sum_i E_i x_i}{\sum_i f_i x_i}.$$

Разложив дробнолинейную функцию в ряд и ограничившись линейными членами, получим выражение:

$$T_r = \sum_k T_k x_k,$$

т. е. структурно-неаддитивную модель вида (1).

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ АДИАБАТИЧЕСКОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ

Эффективность нашего подхода исследовалась на выборке в 1000 органических соединений, представляющих широкий класс химических веществ. Результаты исследований представлены в табл. 1 относительными среднеквадратическими погрешностями для двух типов структурных элементов.

Таблица 1

Эффективность использования структурно-неаддитивной модели вида $T_r = \sum_k T_k x_k$,

Структурные элементы	Относительные среднеквадратичные погрешности	
	На обучении	На экзамене (скользящий контроль)
Атом – связь - атом	1,44	2,45
Атомы с валентным окружением	1,56	2,68

Для сравнения хотелось бы отметить, что относительная среднеквадратическая погрешность по адиабатической температуре горения T_r в работе [6] составила 2,86 при обучении структурной модели на выборке из 83 химических веществ, при этом экзамен не проводился.

Из химических веществ, приведенных в работе [6], была сформирована экзаменационная выборка для структурной неаддитивной модели, включающая вещества, не входившие в обучающую выборку. Результаты экзамена (относительные среднеквадратические погрешности) иллюстрирует второй столбец табл. 2. При этом с практической точки зрения очень важен вопрос о надежности расчетов [6], которые определяются максимальной относительной ошибкой (см. третий столбец табл. 2).

Результаты экзамена и надежность расчетов

Структурные элементы	Результат экзамена	Оценка надежности
Атом – связь - атом	3,46	18,54
Атомы с валентным окружением	1,67	6,2

Следует отметить, что при использовании дескрипторов типа «атом – связь – атом» резко выделяется на экзамене ацетальдегид, который дает большую относительную ошибку, что уменьшает надежность прогноза. При включении этого химического вещества в обучающую выборку надежность метода значительно повысилась, и стала равной 9,43, а среднеквадратическая погрешность составила 2,36.

Математическое моделирование нижнего концентрационного предела воспламенения с учетом адиабатической температуры горения

Нижний концентрационный предел воспламенения φ определяется соотношением [6]:

$$\varphi = \frac{100}{1 + \nu},$$

где ν – число молей воздуха, приходящихся на один моль горючего химического вещества в его бедной предельной смеси с воздухом, которое вычисляется из баланса абсолютных энтальпий:

$$\nu = \frac{H_r(T_0) - \sum_k m_k H_k(T_r) + \beta H_{O_2}(T_r)}{H_e(T_r) - H_e(T_0)},$$

где: H_r, H_e, H_k, H_{O_2} – соответственно абсолютные энтальпии одного моля горючего химического вещества, воздуха, k -го продукта горения и кислорода, m_k – число молей k -го продукта горения, образующегося при сгорании одного моля горючего, β – число молей кислорода, необходимого для полного сгорания одного моля горючего.

В качестве аргумента у соответствующих энтальпий выступают исходная температура T_0 и конечная адиабатическая температура T_r смеси горючего с воздухом.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ НИЖНЕГО КОНЦЕНТРАЦИОННОГО ПРЕДЕЛА ВОСПЛАМЕНЕНИЯ

Для оценки эффективности приведенной модели, используемой для определения нижнего концентрационного предела воспламенения, как и в предыдущем случае, была сделана выборка объемом 1000 органических соединений из широкого класса химических веществ. Результаты исследований представлены относительными среднеквадратическими погрешностями для двух типов структурных элементов (табл. 3).

Таблица 3

Относительные среднеквадратические погрешности при обучении и на экзамене

Структурные элементы	На обучении	На экзамене (скользящий контроль)
Атом – связь – атом	3,15	4,37
Атомы с валентным окружением	3,48	4,42

Хотелось бы отметить, что относительная среднеквадратическая погрешность по расчету нижнего концентрационного предела воспламенения в работе [6] составила 4,0% при обучении на выборке из 83 химических веществ (экзамен не проводился).

Из химических веществ, приведенных в работе [6], была сформирована экзаменационная выборка, в которую были взяты вещества, не входящие в обучающую выборку. Полученные результаты экзамена (относительные среднеквадратические погрешности) и оценку надежности расчетов (по максимальной относительной ошибке) отражает табл. 4.

Таблица 4

Результаты экзамена и надежность расчетов

Структурные элементы	На экзамене	Оценка надежности
Атом – связь – атом	4,89	18
Атомы с валентным окружением	4,26	8,16

Было замечено, что при использовании дескрипторов типа «атом – связь – атом» на экзамене, как и в предыдущем случае – при моделировании адиабатической температуры, резко выделяется ацетальдегид, который дает большую относительную ошибку, что ведет к уменьшению надежности прогноза. При включении этого химического вещества в обучающую выборку надежность метода значительно повысилась – стала равной 10,2, а среднеквадратическая погрешность составила 4,58.

Таким образом, предложенный метод расчета нижнего концентрационного предела воспламенения дает точность, близкую к точности эксперимента (5%), а надежность характеризуется максимальными отклонениями в 10,2% и 8,16% в зависимости от типа дескрипторов.

СИСТЕМА КОМПЬЮТЕРНОЙ ПОДДЕРЖКИ

Разработанная автоматизированная информационно-поисковая система включает запрограммированные процедуры статистического моделирования физико-химических свойств органических веществ, и состоит из двух подсистем:

- поддержки профессиональных структурно-химических баз данных и знаний с использованием

графического интерфейса по манипулированию структурными формулами молекул;

- прогнозирования физико-химических характеристик органических молекул на основе графов структурных формул, позволяющей создавать обучающие и экзаменационные выборки из баз данных, задавать или выбирать из меню различные описания химической структуры, выбирать структурно-аддитивные и неаддитивные модели, которые используются для нахождения корреляции между структурами и свойствами.

Созданная нами информационно-поисковая система представляет собой работающий в режиме диалога инструмент для оперативного прогноза физико-химических характеристик органических веществ, который также может использоваться для анализа сравнительной информативной ценности различных групп факторов при изучении механизмов горения.

Полученные результаты обеспечивают хорошую точность и высокую эффективность предложенных методов при расчете адиабатической температуры горения и нижнего концентрационного предела воспламенения на основе дескрипторов графов структурных формул органических молекул. Компьютерный расчет этих параметров позволяет отбраковывать особо опасные химические соединения. Доля отбраковки таких соединений в настоящее время колеблется от 15% до 20%, что проверено на экспериментальных данных по показателям, связанным с адиабатической температурой горения и нижним концентрационным пределом воспламенения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В сегодняшней ситуации, характеризуемой ориентацией на инновационную экономику [8], становятся все более востребованными на практике вычислительные методы в приложении к анализу химических веществ. Развивая эти методы, было бы нерационально не базироваться на наработках прежних периодов [4, 6], не пытаться расширить сферу приложения этих наработок и не использовать полученные результаты и технологии в сфере образования [9]. Разработанная информационная система, в совокупности с комплексом программ, реализующих модели, описанные в настоящей работе и работе [1], может быть использована для проведения лабораторных занятий со студентами соответствующих направлений, а заложенные в ней алгоритмы статистической классификации [10-12] предоставляют возможность альтернативного решения задач оценки рисков [13] при выборе стратегий управления информационными продуктами и услугами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Осипов А.Л., Бобров Л.К. Об использовании моделей статистического распознавания в системе виртуального скрининга химических веществ // Научно-техническая информация. Сер. 2. – 2012. – № 7. – С. 1-6.
2. Осипов А.Л. Метод моделирования адиабатической температуры горения химических веществ на основе дескрипторов графов структур-

- ных формул // Автометрия. – 2004. – № 1. – С. 74-83.
3. Осипов А.Л. Компьютерное моделирование нижнего концентрационного предела воспламенения химических веществ на основе дескрипторов графов структурных формул // Материалы VII Международная научной конференции "Наука и образование". – Беловский институт (филиал) КемГУ, Белово 14-15 марта 2008. – С. 86-97.
 4. Осипов А.Л., Нигматуллин Р.С., Зацепин В.М. Пакет программ для анализа и прогнозирования связи молекулярная структура – свойства // Информационный бюллетень по химической промышленности. – 1988. – № 2 (119). – С. 80-81.
 5. Розловский А.И. Основы техники взрывоопасности при работе с горючими газами и парами. – М.: Химия, 1980. – 366 с.
 6. Зацепин В.М., Сороко Ю.М., Степачев О.А. Парциальные структурные инкременты и их применение к расчету нижнего концентрационного предела воспламенения органических соединений // Журнал физической химии. – 1984. – Т. LVIII, № 9. – С. 2158-2162.
 7. Зельдович Я. Б. Математическая теория горения и взрыва. – М.: Наука, 1980. – С. 478.
 8. Шокин Ю.И., Гришняков Б.Ю., Бобров Л.К. Технопарк «Новосибирск» как звено инновационной инфраструктуры региона // Вестник НГУЭУ. – 2012. – № 2. – С. 10-20.
 9. Бобров Л.К. В контексте интернационализации образования // Высшее образование в России. – 2009. – № 10. – С. 49-56.
 10. Осипов А.Л., Александров В.В. Методы статистической классификации химических веществ по степени токсичности // Автометрия. – 2003. – Т. 39, № 1. – С. 114-125.
 11. Осипов А.Л., Семенов Р.Д., Зацепин В.М. Система компьютерного предсказания физико-химических и биологических свойств веществ // Автометрия. – 1995. – № 5. – С. 86.
 12. Осипов А.Л., Семенов Р.Д. Модели прогнозирования токсикологических свойств химических веществ // Автометрия. – 1995. – № 6. – С. 101.
 13. Бобров Л.К., Щеглов Ю.А. Учет рисков при выборе стратегий управления информационными продуктами и услугами // Вестник НГУЭУ. – 2012. – № 2. – С. 233-243.

Материал поступил в редакцию 30.01.13

Сведения об авторах

ОСИПОВ Александр Леонидович – кандидат технических наук, доцент, зав. кафедрой прикладных информационных технологий Новосибирского государственного университета экономики и управления «НИНХ»
e-mail: osipov@nsuem.ru

БОБРОВ Леонид Куприянович – доктор технических наук, профессор кафедры экономической информатики, первый проректор Новосибирского государственного университета экономики и управления «НИНХ»
e-mail: bobrov@nsuem.ru

УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ!

ЦЕНТР НАУЧНО-ИНФОРМАЦИОННОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ ВИНИТИ РАН

ПРЕДОСТАВЛЯЕТ КОПИИ ПЕРВОИСТОЧНИКОВ

ВИНИТИ РАН осуществляет обслуживание копиями первоисточников, хранящихся в фонде научно-технической литературы ВИНИТИ, в фондах других библиотек, а также в доступных ВИНИТИ электронных ресурсах.

Фонд научно-технической литературы ВИНИТИ включает более 2 млн изданий по точным, естественным и техническим наукам, в т.ч.:

- отечественные и иностранные периодические и продолжающиеся издания – с 1987 г.;
- отечественные книги – с 1987 г.;
- иностранные книги – с 1991 г.;
- рукописи, депонированные в ВИНИТИ, – с 1962 г.

Заказы на бумажные или электронные копии первоисточников принимает Центр научно-информационного обслуживания (ЦНИО) ВИНИТИ. ЦНИО ВИНИТИ обслуживает коллективных (организации и учреждения) и индивидуальных пользователей.

Формы обслуживания:

- абонементная (на основе договоров и предоплаты);
- разовые заказы (с предоплатой заказа по счету);
- индивидуальная форма обслуживания в читальном зале ЦНИО ВИНИТИ.

На сайте ВИНИТИ (<http://www.viniti.ru>) представлен полный Электронный каталог научно-технической литературы (<http://catalog.viniti.ru>), зарегистрированной в ВИНИТИ с 1994 г. Доступ для просмотра и поиска по Каталогу свободный. Постоянные абоненты ЦНИО ВИНИТИ, имеющие логин и пароль для работы с Каталогом, могут делать заказ копий непосредственно через Каталог.

Услуги по изготовлению копий первоисточников из фондов других библиотек предоставляются только постоянным абонентам. Место хранения первоисточников указывается в Электронном каталоге.

За подробной информацией обращаться по адресу:

125190, Россия, Москва, ул. Усиевича, 20, ВИНИТИ РАН. ЦНИО

Телефоны: 8 (499) 155-42-43, 155-42-09, 152-54-59

Факс: 8 (499) 943-00-60

E-mail: cnio@viniti.ru; **URL:** <http://www.viniti.ru>