

НАУЧНО • ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ

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

Издается с 1961 г.

№ 10

Москва 2022

ОБЩИЙ РАЗДЕЛ

УДК 001.102:001.5

Н.Л. Мусхелишвили, М.М. Базлев

Феномен инсайта в свете теории информации

Памяти Юлия Анатольевича Шрейдера

На основании семантической теории информации, разработанной Ю.А. Шрейдером, рассматривается феномен инсайта. Показано, что инсайт является расширением тезауруса, при котором в рамках автокоммуникации возникает новая информация. Представленная схема иллюстрируется на материале озарения, постигшего Игнатия Лойолу на берегу реки Кардонер в августе 1523 г.

Ключевые слова: инсайт, автокоммуникация, тезаурус, информация, фасцинация

DOI: 10.36535/0548-0027-2022-10-1

В проблематике порождения знания особый исследовательский интерес представляет феномен инсайта. По всей видимости, это достаточно распространенное как в английском, так и в немецком языке (*Einsicht*) слово в рамках развития психологической и философской наук в XX в. оказалось поднятым до статуса технического термина. Так, новая философская энциклопедия определяет инсайт как «внезапное

понимание, схватывание тех или иных отношений и структуры ситуации в целом, не выводимое из прошлого опыта»¹. Одна из первых научных моделей

¹ Инсайт // Новая философская энциклопедия. В 4-х томах / Ин-т философии РАН. Научно-ред. совет: В.С. Степин, А.А. Гусейнов, Г.Ю. Семигин. Т. II, Е-М. – Москва: Мысль, 2010. – С. 123.

осмысления этого феномена была предложена выдающимся математиком, физиком и философом Анри Пуанкаре. Исходя из наблюдений за собственным опытом процесса математической мысли, он замечает, что наступающее его *внутреннее озарение (инсайт)*, является «результатом длительной неосознанной работы»². Однако совершенно непроясненным остается процесс перехода информации из неосознаваемой, не имеющей строгой кодовой структуры в бессознательном субъекта, в *знание*. Каким образом информация формируется в сознании субъекта? Как происходит влияние на субъект при получении информации и ее обработке?

Обращаясь к этим вопросам с позиций теории информации, нужно учесть, что уже во второй половине XX в.³ сложилось несколько фундаментальных векторов исследовательской мысли, в частности, синтаксический (К. Шенон, Л. Бриллюэн, У.Р. Эшби и др.), семантический (Ю.А. Шрейдер, У. Шрамм и др.) и прагматический (У. Майлс, Р. Акоф, А.А. Харкевич, Р.С. Гиляревский, А.И. Михайлов и др.). Но если в рамках первого подхода ограничение устанавливается в вопросах количественных характеристик информации, то в двух последних информация рассматривается относительно качественного аспекта, ее смыслового содержания, ее ценности и влияния на дальнейшую жизнь субъекта – ту сторону, что и отмечает Пуанкаре, а в дальнейшем Ж. Адамар, в попытках систематизировать роль инсайта в процессе математических открытий⁴. Таким образом именно два последних направления представляют для нас ключевой интерес.

Одним из переломных моментов перехода от синтаксического подхода к семантическому можно считать вышедшую в 1965 г. статью Ю.А. Шрейдера «Об одной модели семантической теории информации»⁵, в которой автор указывает, что смысловой

анализ текста можно описывать с точки зрения различных наблюдателей, обладающих различным «представлением о мире». Поэтому модель анализа должна содержать описание «представлений о внешнем мире» некоторого наблюдателя, которое он обозначил в качестве *тезауруса*. Сам же процесс смыслового анализа информации в этом случае интерпретируется как изменение тезауруса под влиянием новой информации. Выстроенный Ю.А. Шрейдером алгоритм анализа в дальнейшем был положен им, совместно с Н.Л. Мухелишвили, в развитие идеи Ю.М. Лотмана о двух коммуникационных каналах в культуре, в которой прием адресатом сообщения извне рассматривается как инициация этим сообщением автокоммуникации адресата со своим иным Я, в рамках внутренней речи. Анализируя роль фасцинации в ассимиляции адресатом содержащейся в сообщении информации с помощью внутренней речи и возникновения в последней фасцинации и контр-фасцинации, этим коллективом ученых была предложена модель, показывающая, что изменение тезауруса адресата под воздействием принятого сообщения связано не только с освоением информации, содержащейся в сообщении, но и с *порождением новой*. Настоящая статья, являясь продолжением этих исследований, применяет данную концептуальную модель для анализа непосредственного материала, описывающего момент порождения новой информации, ее последующей символизации, а также возможности анализа ее значения в дальнейшей судьбе субъекта. В качестве материала выступают *переживание и озарение*, наступающие Игнатия Лойолу на берегу реки Кардонер в августе 1523 г.⁶

Описания этого момента в жизни основателя Общества Иисуса крайне скудны. Основой выступает краткий рассказ самого Игнатия, зафиксированный в надиктованной им автобиографии «Рассказ паломника о своей жизни»:

«Как-то раз он шел на поклонение в одну церковь, отстоявшую от Манресы чуть более чем на милю (называлась она, как мне кажется, церковью святого Павла). Дорога <туда> идет вдоль реки. Так шел он, погруженный в свои благочестивые думы [курсив наш], и присел ненадолго лицом к реке, протекавшей в глубине. И вот, когда он там сидел, у него стали открываться очи разумения. Не то чтобы ему было какое-то видение, однако он понял и узнал множество вещей – как духовных, так и относящихся к вере и к наукам, – и притом с таким великим *озарением*, что все это показалось ему новым. Невозможно разъяс-

² Пуанкаре А. Математическое творчество. Психологический этюд. – Юрьев: Типография Эд. Бергмана, 1909. – С. 14.

³ Несмотря на более позднее раскрытие этих направлений, теоретически на них указал еще в 1949 г. У. Уивер. Подробнее см.: Weaver W. Recent contributions to the mathematical theory of communication // Shannon C. The Mathematical Theory of Communication. – Urbana: University of Illinois Press, 1949. – P. 1-29.

⁴ При анализе непосредственно опыта Пуанкаре ряд исследователей проводит различие между феноменом инсайта и феноменом инкубации. При последнем нахождение решения протекает путем бессознательной рекомбинации уже имеющейся информации. Однако, поскольку наш интерес лежит в плоскости анализа ситуации порождения информации, в данной статье мы сосредоточимся именно на феномене инсайта. Подробнее о различии феноменов см.: Валуева Е.А., Ушаков Д.В. Инсайт и инкубация в мышлении: роль процессов осознания // Сибирский психологический журнал. – 2017. – № 63. – С. 19-35.

⁵ Шрейдер Ю.А. Об одной модели семантической теории информации // Проблемы кибернетики. Вып. 13 / под ред. А.А. Ляпунова. – М.: Наука, 1965. – С. 233-240.

Помимо данной работы Ю.А. Шрейдером были изданы: О количественных характеристиках семиотической информации // НТИ. – 1963. – №10. – С. 33-38; О семантических аспектах теории информации // Информация и кибернетика. – М.: Советское радио, 1967. – С. 15-47; Тезаурусы

в информатике и теоретической семантике // НТИ. Сер. 2. – 1971. – № 3 – С. 21-24; Семиотические основы информатики. – М.: ИПКИР, 1974. – 128 с.

⁶ Среди исследователей биографии Лойолы существуют разногласия относительно времени переживаний у реки Кардонер. Мы, вслед за Ж. де Гибером, склонны предполагать, что оно произошло сразу по истечении первых шести месяцев пребывания Игнатия в Манресе и положило начало потоку мистических озарений. Подробнее см.: Silos L.R. Cardoner in the Life of Saint Ignatius of Loyola // Archivum Historicum Societatis Iesu. V. XXXIII. – Rome: Institutum Historicum Societatis Iesu, 1964. – P. 3-43; Goulding G.K. The Cardoner Imperative // The Way. – 2008. – Vol. 47/1-2. – P. 243-259.

нить все подробности, которые он тогда уразумел, хотя их было множество».⁷

Считается, что этот опыт был вершиной всех мистических благодатей, полученных Игнатием в Манресе. Как предполагают исследователи, достигнувшее Игнатия *озарение* позволило ему увидеть все ранее изученные истины в новом, комплексном свете, а также стало отправной точкой для всей его последующей жизни, включая написание «Духовных упражнений» и конституций Общества Иисуса. Анализируя эти предположения с позиции работ Ю.А. Шрейдера и Н.Л. Мухелишвили⁸, можно обозначить точку озарения вершиной (b) на рис. 1.

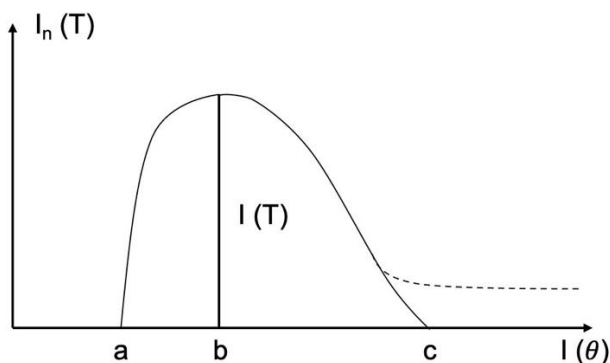


Рис. 1

В семантической теории информации восприятие некоторого сообщения Т адресатом интерпретируется как изменение его индивидуального тезауруса под влиянием данного сообщения. Мерой информации, принятой адресатом из сообщения Т, эта теория предлагает считать степень изменения его тезауруса Θ , который здесь мыслится как склад накопленных фактов. Если тезаурус Θ слишком беден, то адресат не в состоянии воспринять информацию из сообщения Т. Более богатый (содержащий больше априорной информации) тезаурус извлечет из того же сообщения больше информации. Достаточно богатый тезаурус воспримет всю информацию $I(T)$, содержащуюся в данном сообщении. Дальнейшее обогащение тезауруса приведет к тому, что это сообщение будет содержать для него все меньше информации.

Однако существенное различие в процессе получения информации возникает в случае, когда адресат и адресант сообщения фактически совпадают. Иначе говоря, источником сообщения выступает сам субъект (рис. 2).

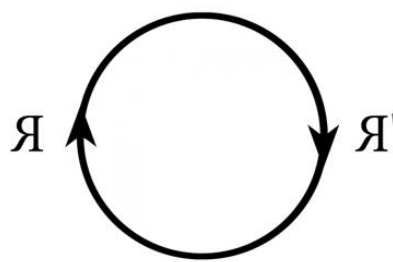


Рис. 2

Как показал Ю.М. Лотман, при коммуникации, протекающей по каналу Я — Я' (автокоммуникации), получение новой информации вызывается не благодаря ее обнаружению во внешнем сообщении, но благодаря *изменению контекста*, определяющего понимание уже имеющейся информации. Как показали Мухелишвили и Шрейдер, сдвиг контекста ведет к перестройке существующего тезауруса, обусловленной наличием внешних (по отношению к коммуникации) импульсов. Реализуемое в пространстве циркуляции внутренней речи переосвоение тезауруса в ситуации сдвига стимулирует порождение в тезаурусе непредвиденных знаний (рис. 3).

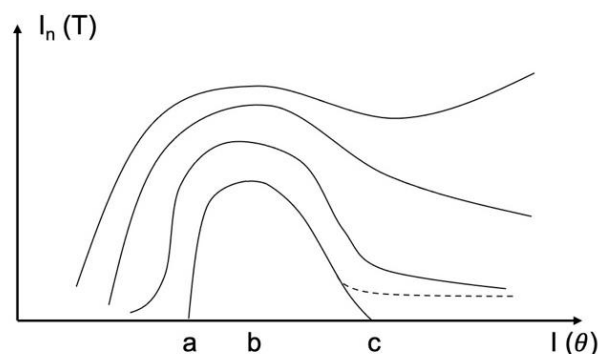


Рис. 3

Таким образом в случае инсайта, ключевые стороны явления — это во-первых фаза накопления тезауруса, проходящая согласно Ю.М. Лотману по каналу Я — ОН; во-вторых — интенция к его осмыслению, инициирующая автокоммуникацию, по каналу Я — Я'; в-третьих — импульс, выступающий катализатором сдвига контекста, и наконец в-четвертых — сам результат порождения информации. Принципиальное отличие от стандартной модели в том, что достижение точки c на рис. 3 становится возможным лишь в случае остановки внутренней циркуляции информации по каналу Я — Я'. Однако специфика автокоммуникации состоит в том, что циркуляция информации может протекать как при активном участии внимания субъекта, так и в пассивной форме — бессознательно. Более того, как замечает А. Пуанкаре, неосознанная работа, протекающая в рамках автокоммуникации, «возможна или, по крайней мере, плодотворна лишь в том случае, когда ей предшествует и за ней следует

⁷ Св. Игнатий Лойола. Рассказ паломника о своей жизни, или «Автобиография» св. Игнатия Лойолы, основателя Общества Иисуса (Ордена иезуитов). — М.: Колледж философии, теологии и истории св. Фомы Аквинского в Москве, 2002. — С. 52-54.

⁸ Рис. 1-3 заимствованы из работ: Мухелишвили Н.Л., Шрейдер Ю.А. Автокоммуникация как необходимый компонент коммуникации // НТИ. Сер. 2. — 1997. — № 5. — С. 9 и Мухелишвили Н.Л., Базлев М.М. Внутренняя речь и дар слова (loquela) // Вопросы психологии. — 2019. — №2. — С. 63.

сознательная работа»⁹. Иначе говоря, анализ вершины (b) на рис. 3 необходим не только с позиции содержания информации I(T), но и в призме накопления и обработки тезауруса, а также прагматики влияния на последующую жизнь субъекта.

Так, источниками¹⁰ наполнившими тезаурус Игнатия выступили такие работы, как «*Vita Christi*» Лудольфа Саксонского, «*Legenda aurea*» Иакова Ворагинского, «*De Imitatione Christi*» Фомы Кемпийского, «*Amadis de Gaula*» Гарсиа Родригеса де Монтальво, «*Exercitatorio de la vida spiritual*» и «*Compendio breve de ejercicios espirituales*» Гарсиа Хименеса де Сиснероса, «*Enchiridion militis Christiani*» Эразма Роттердамского, «*Contemptus Mundi*», а также «*Horas de nuestra Señora segun la orden romana*» в редакции Хорхе Кочи¹¹. С частью из них он познакомился еще в Лойоле, они легли в основу его духовного обращения, с частью он знакомится непосредственно в Монтсеррате, незадолго до событий у реки Кардонер. Фактически, эти труды формируют то основание, размышляя над которым Игнатий пытается найти путь служения Богу, который бы соответствовал его внутренним стремлениям.

Являясь внешними, иницирующими автокоммуникацию, как показал Ю.М. Лотман, к моменту приближения к вершине (b) на рис. 3 тексты «выступают не как сообщения», но «как стимулятор развития мысли». Эти тексты вводят в сознание адресата новый «добавочный» культурный код, возникающий при «столкновении и взаимодействии двух разнородных начал: сообщения на некотором семантическом языке и вторжения чисто синтагматического добавочного кода». Как показал Ю.М. Лотман, при этом столкновении ключевую роль играет фасцинация, определяющая способность текста иницировать процесс автокоммуникации, в рамках которой создается новая информация, циркулирующая во внутренней речи. И таким иницирующим текстом, в частности, выступает ведущаяся субъектом «запись для себя», несущая сообщение для автора (адресанта) и стимулирующая в нем порождение внутренней речи как мысленного проговаривания закодированного в этом тексте сообщения, т. е. превращающая автора одновременно в адресата и адресанта. В случае Игнатия, как свидетельствует де Гибер¹², подобным текстом выступает набросок «Духовных упражнений» и

ведущийся Игнатием «Духовный дневник». При этом, как отмечает Ю.В. Кнорозов, важнейшая функция фасциации состоит в том, что она «затягивает» адресата в содержание воспринимаемого текста, не позволяет ему, получив достаточную, по его меркам, информацию произвольно оторваться от этого текста. Текст, обладающий достаточно сильной фасциацией, не «отпускает» адресата даже в том случае, когда он перестает воспринимать в нем новую информацию, иначе говоря, когда его тезаурус «насытился» и уже содержит всю информацию, несомую текстом. Это момент достижения искомой нами вершины (b) на рис. 3. Сила этой фасциации может удерживать сознание субъекта в рамках существующего контекста. При определенных условиях она способна заглушить способность адресата критически относиться к получаемой информации и создавать новую информацию. Однако, в случае инсайта, субъект обладает средствами для рефлексии над внешними событиями и способен отнестись к ним критически. Это означает выход в рефлексивную позицию, когда сама внутренняя речь становится предметом мысли, также выражаемой во внутренней речи. Этим перекрывается непосредственное воздействие внешней фасциации за счет контр-фасциации. Как отмечают Н.Л. Мухелишвили и Ю.А. Шрейдер, в религиозном опыте озарения формируется контр-фасциация, создаваемая за счет полифонии внутренней речи. Благодаря ей, от части нашего Я в автокоммуникации идет речь имажинативно идентифицирующаяся как речь Бога. Имажинативное творчество преодолевает метафизическое одиночество субъекта, расширяя структуру собственного Я путем инкорпорирования в него других Я и превращая внутреннюю речь в диалог с воображаемыми другими¹³.

Благодаря контр-фасциации достигается необходимый для инсайта сдвиг контекста, формирующий возможность переосмысления накопленного тезауруса и порождение новой информации, являющейся ответом на интенциональный импульс субъекта. Благодаря этому, как замечают исследователи¹⁴, текст «Духовных упражнений» не дублирует предшествующие работы. Взамен буквального использования уже готовых практик, Игнатий изменяет их под влиянием собственного духовного опыта, пережитого в момент озарения на реке Кардонер и в последствии. Игнатий отмечал: «тогда он получил столь великую ясность понимания, что ему кажется: если собрать всю помощь, полученную им от Бога на всем протяжении его жизни, за прошедшие шестьдесят два года, а так же все то, что он познал, и даже если соединить все это вместе, то он не обрел бы столько, сколько в тот единственный раз». Как замечает Дж. Мюнитиц, с того момента Игнатий на протяжении всей своей

⁹ Пуанкаре А. Математическое творчество. Психологический этюд. – Юрьев: Типография Эд. Бергмана, 1909. – С. 15.

¹⁰ Критическое исследование поиска этих источников было начато более века назад Анри Ватриганом. Однако лишь в 1920-х годах начал формироваться консенсус, обозначивший ключевые работы. Несмотря на то, что основной корпус текстов на данный момент установлен, уточняющие работы ведутся до сих пор. Например см.: O'Reilly T. The Spiritual Exercises of Saint Ignatius of Loyola: Contexts, Sources, Reception. – Leiden; Boston: Brill, 2020. – 352 p.

¹¹ Уточнение данной редакции строится на сокращенном тексте молитвы Anima Christi, имевшей в дальнейшем для Игнатия существенное значение.

¹² де Гибер Ж. Духовность Общества Иисуса. Исторический очерк. – М.: Ин-т философии, теологии и истории Св. Фомы, 2010. – С. 130.

¹³ Мухелишвили Н.Л., Базлев М.М. Внутренняя речь и дар говора (loquela) // Вопросы психологии. – 2019. – № 2. – С. 59-68; Базлев М.М. Исследование духовных голосов и видений: к вопросу об этиологии // Религиоведение. – 2020. – №3. – С. 26-35.

¹⁴ Мухелишвили Н.Л., Антоненко А.К., Базлев М.М. О религиозном методе Игнатия Лойолы в «Духовном дневнике» // Государство, религия, церковь в России и за рубежом. – 2019. – №38. – С. 212-233.

духовной жизни «нежно реагировал на малейшие движения благодати и полностью зависел от них»¹⁵. Иначе говоря, формируемые в течение последующих 20 лет *Упражнения* были *прожиты* до того, как окончательно оформилось само руководство. Этот аспект нашел отражение в первых вводных инструкциях к Упражнениям, согласно которым те не есть книга для вольного самостоятельного чтения, не просто последовательность медитаций и не духовный трактат, но «способы, коими душа приуготовляется и располагается к освобождению от всех неупорядоченных влечений и, коль скоро они будут уничтожены, к поиску и обретению воли Божией относительно устройства своей жизни и для спасения своей души»¹⁶. Вершина же озарения, настигнувшая Лойолу у реки Кардонер, по словам самого Игнатия Диего Лаинесу (второму генералу общества Иисуса, сменившему на этом посту самого Игнатия), а позже Педро де Рибаденейре (первому биографу Игнатия), была «лишь наброском и вступлением»¹⁷.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Базлев М.М. Исследование духовных голосов и видений: к вопросу об этиологии // Религиоведение. – 2020. – №3. – С. 26-35.
2. Валуева Е.А., Ушаков Д.В. Инсайт и инкубация в мышлении: роль процессов осознания // Сибирский психологический журнал. – 2017. – № 63. – С. 19-35.
3. де Гибер Ж. Духовность Общества Иисуса. Исторический очерк. – Москва: Ин-т философии, теологии и истории Св. Фомы, 2010. – 680 с.
4. Инсайт // Новая философская энциклопедия. В 4-х томах / Ин-т философии РАН. Научно-ред. совет: В.С. Степин, А.А. Гусейнов, Г.Ю. Семингин. Т. II, Е-М. – Москва: Мысль, 2010. – С. 123.
5. Мухелишвили Н.Л., Антоненко А.К., Базлев М.М. О религиозном методе Игнатия Лойолы в «Духовном дневнике» // Государство, религия, церковь в России и за рубежом. – 2019. – №38. – С. 212-233.
6. Мухелишвили Н.Л., Базлев М.М. Внутренняя речь и дар говора (loquela) // Вопросы психологии. – 2019. – №2. – С. 59-68.
7. Мухелишвили Н.Л., Шрейдер Ю.А. Автокоммуникация как необходимый компонент коммуникации // Научно-техническая информация. Сер. 2. – 1997. – № 5. – С. 1-10.
8. Пуанкаре А. Математическое творчество. Психологический этюд. – Юрьев: Типография Эд. Бергмана, 1909. – 24 с.

9. Св. Игнатий Лойола. Рассказ паломника о своей жизни, или «Автобиография» св. Игнатия Лойолы, основателя Общества Иисуса (Ордена иезуитов). – Москва: Колледж философии, теологии и истории св. Фомы Аквинского в Москве, 2002. – 256 с.
10. Св. Игнатий Лойола. Духовные упражнения. Духовный дневник. – Москва: Ин-т философии, теологии и истории Св. Фомы, 2006. – 376 с.
11. Шрейдер Ю.А. О количественных характеристиках семиотической информации // Научно-техническая информация. – 1963. – №10. – С. 33-38.
12. Шрейдер Ю.А. О семантических аспектах теории информации // Информация и кибернетика. – М.: Советское радио, 1967. – С. 15-47.
13. Шрейдер Ю.А. Об одной модели семантической теории информации // Проблемы кибернетики. Вып.13 / под ред. А.А. Ляпунова. – М.: Наука, 1965. – С. 233-240.
14. Шрейдер Ю.А. Семиотические основы информатики. – М.: ИПКИР, 1974. – 128 с.
15. Шрейдер Ю.А. Тезаурусы в информатике и теоретической семантике // Научно-техническая информация. Сер. 2. – 1971. – № 3. – С. 21-24.
16. Goulding G.K. The Cardoner Imperative // The Way. – 2008. – Vol. 47/1-2. – P. 243-259.
17. O'Reilly T. The Spiritual Exercises of Saint Ignatius of Loyola: Contexts, Sources, Reception. – Leiden; Boston: Brill, 2020 – 352 p.
18. Silos L.R. Cardoner in the Life of Saint Ignatius of Loyola // Archivum Historicum Societatis Iesu. V. XXXIII. – Rome: Institutum Historicum Societatis Iesu, 1964. – P. 3-43.
19. Weaver W. Recent contributions to the mathematical theory of communication // Shannon C. The Mathematical Theory of Communication. – Urbana: University of Illinois Press, 1949. – P. 1-29.

Материал поступил в редакцию 31.07.22.

Сведения об авторах

МУСХЕЛИШВИЛИ Николай Львович – доктор психологических наук, профессор Учебно-научного центра изучения религий Российского государственного гуманитарного университета, Москва.
e-mail: muskh.symbol@mail.ru

БАЗЛЕВ Михаил Максимович – преподаватель кафедры Истории Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», Москва.
e-mail: mmbazlev@mephi.ru

¹⁵ Св. Игнатий Лойола. Рассказ паломника о своей жизни, или «Автобиография» св. Игнатия Лойолы, основателя Общества Иисуса (Ордена иезуитов). – Москва: Колледж философии, теологии и истории св. Фомы Аквинского в Москве, 2002. – С. 54.

¹⁶ Св. Игнатий Лойола. Духовные упражнения. Духовный дневник. – Москва: Ин-т философии, теологии и истории Св. Фомы, 2006. – С. 19.

¹⁷ де Гибер Ж. Духовность Общества Иисуса. Исторический очерк. – Москва: Ин-т философии, теологии и истории Св. Фомы, 2010. – С. 48.

На пути к стандарту представления знаний в Веб алгебраическими средствами

Современные системы открытых связанных данных, включая Wikidata, построены на основе стандартов представления онтологий типа RDF, RDFstar, RDFa, OWL и стандартов языков запросов типа SPARQL, GraphQL и т.д. В то же время, стандарты по представлению аксиом в онтологиях на языках SWRL, RIF и даже OWL мало используются, так как вычисления в онтологиях, представленных в Веб, на основании аксиом и правил вывода получили малое распространение. В связи с этим предлагается использовать богатый опыт теории алгебраических вычислений и алгебраического представления знаний для создания удобного универсального средства построения онтологий, ориентированных на вычисления ответов на запросы с использованием аксиом и правил переписывания для построения ответов на запросы, а не только фактов. Рассматривается возможность построения стандарта алгебраического языка представления онтологий в Веб: Algebraic Web Ontology Language (Algebraic OWL) и некоторые элементы такого стандарта. Используется опыт и методологии подходов Common Algebraic Specification Language (CASL), системы Mathematica, языков программирования Haskell и Prolog.

Ключевые слова: компьютерные онтологии, представление знаний, библиотеки онтологий, связанные данные, многосортные алгебры, алгебраический подход

DOI: 10.36535/0548-0027-2022-10-2

МОТИВАЦИЯ И НЕФОРМАЛЬНОЕ ВВЕДЕНИЕ

Простейший распространенный способ представления онтологий в Веб – это использовать стандарт *Resurs Definition Format* (RDF) [1] и представлять онтологии в виде графов, в которых вершинами являются уникальные имена классов, их элементы и некоторые элементы стандартных типов данных, а ребрами, связывающими некоторые из этих вершин, являются свойства классов и элементов также названные уникальными именами. На логическом уровне такие онтологии моделируются конечным множеством элементов и конечным множеством двуместных предикатов.

В стандарте RDF, а также в его расширении RDFS [2] выделяются имена некоторых классов и свойств, которые будут общими для всех онтологий, представленных по этому стандарту. В RDF, RDFS и OWL [3, 4] такими именами классов являются *rdfs:Class*, *owl:Thing* и другие, а именами свойств – *rdfs:subClassOf*, *rdf:type*, с помощью которых в онтологии выделяются подклассы классов и элементы классов. В RDFS фиксировано имя свойства *rdfs:label*, с помощью которого для каждого элемента онтологии можно задать имя элемента в моделируемой области, соответствующее этому элементу онтологии. Естественно, онтологии моделируют какую-то ситуацию, внешнюю по отношению к ней, и имена классов, лейблы элементов и свойств отсылают к совокупностям элементов, элементам и их свойствам этой внешней ситуации. Кроме того, по

уникальному имени элемента онтологии обычно можно получить ссылку на адрес в Веб, где этот элемент описывается.

В соответствии с этими стандартами факт, что Энштейн награжден нобелевской премией будет представляться в онтологии тройкой (ребром графа) {Энштейн награжден нобелевская_премия}, где Энштейн и нобелевская_премия – это вершины графа, а награжден – это свойство, связывающее эти вершины. В функциональном обозначении этот факт записывается в виде: награжден (Энштейн, нобелевская_премия). Некоторые трудности в этом подходе, связанные с тем ограничением, что могут использоваться только бинарные отношения для представления онтологий, появляются, если, например, в онтологии нужно еще отразить, когда Энштейн был награжден нобелевской премией и за что.

Для преодоления этой трудности в соответствии со стандартом RDFstar [5] разрешается вводить именованные подграфы и для этих имен можно вводить новые свойства или использовать конструкцию (операцию угловых скобок) <<Энштейн награжден нобелевская_премия>>, которая делает эту тройку новой вершиной в графе, и ее можно связывать свойствами с другими его вершинами. В Wikidata [6], чтобы определить свойства ребра, используются префикс *p:* для имени этого ребра и префикс *ps:* для свойства. Геометрически это означает, что на ребре ставится новая вершина или несколько вершин, и свойства от этих

новых вершин соответствуют некоторым утверждениям о данном ребре.

В стандарте OWL [3, 4] вводится много других операций, строящих новые классы и свойства из уже существующих классов и свойств, удовлетворяющих некоторым условиям. Примерами таких операций являются теоретико-множественные операции над классами, которые строят новые классы, или взятие обратного свойства для некоторого свойства или операция композиции свойств, которая порождает новое свойство. При этом, в OWL можно задавать некоторые типы аксиом, включая равенство (*owl:equivalentClass*, *owl:equivalentProperty*, *owl:sameAs*) двух выражений. Ответы на запросы к онтологиям, построенным в языке OWL, хорошо бы получать с учетом аксиом и, в частности, проверять построенные онтологии на непротиворечивость. Эти функции с разной степени точности выполняют отдельно разрабатываемые программы (*reasoners*).

Множества, на которых действует система операций и между композициями некоторых из этих операций выполняются равенства, удобно моделировать, применив алгебраический подход. Поэтому естественно использовать алгебраический подход моделирования (с его богатым опытом применения в программировании) для моделирования онтологий, на которых задана система операций и аксиом.

ОБЩЕЕ ОПИСАНИЕ АЛГЕБРАИЧЕСКИХ СРЕДСТВ МОДЕЛИРОВАНИЯ

В этом разделе дается краткое описание средств и возможностей алгебраического подхода к моделированию онтологий. Основное средство моделирования в этом подходе – это алгебра. Алгебра, как математическая структура, – это набор множеств и набор операций, действующих на элементах этих множеств.

Источники алгебраического моделирования

По алгебраическому моделированию имеется обширная литература, включая описание языка *CASL* [7], или языка программирования *Haskell* [8], не говоря уже о математической литературе на эту тему. Для моделирования онтологий нам понадобятся алгебры с условными операциями и условными соотношениями, т. е. некоторые операции можно применить, если их аргументы в этой алгебре удовлетворяют определенным равенствам, и некоторые элементы удовлетворяют некоторому равенству (аксиоме), если эти элементы удовлетворяют некоторым условиям. Поэтому здесь мы будем во многом следовать описанию языка *The Maude System* [9, 10] – системы, которая поддерживает в своих спецификациях алгебраическую логику условных равенств и переписываний выражений. Ряд идей алгебраического моделирования взят из системы представления знаний и создания библиотек онтологий ЭЗОП [11, 12]. В основе этой системы используется алгебраический (категорный) подход к представлению знаний, модульная коллективная разработка библиотек онтологий и открытый язык описания онтологий, который формируется самими пользователями при их создании.

Спецификация алгебры, инициальная реализация, аппроксимации, вычисления

В спецификациях алгебр, как и в онтологиях, алгебра задается именами классов, типов данных, именами операций с указанием откуда и куда действует каждая операция (из каких классов и типов данных в какие действует операция) и именами некоторых элементов классов.

Кроме того, на множестве классов и элементов задано отношение класс-подкласс и принадлежность элементов классам. Используя имена элементов и переменных для элементов классов и типов, стандартным способом определяются термы – правильно построенные выражения из переменных, констант и имен операций с учетом типов аргументов операций, типов результатов операций и типов переменных и констант. Аксиомы алгебры задаются в виде равенств некоторых термов одного типа или условных равенств.

По каждой такой спецификации алгебры может быть формально построена соответствующая ей инициальная алгебра, которая определяется как множество всех термов (выражений) этой алгебры без переменных, профакторизованное по минимальному отношению эквивалентности, порожденному аксиомами этой алгебры. Такая инициальная алгебра является идеальным объектом, в котором отражаются все знания, зафиксированные и выводимые из ее спецификации. В общем случае она бесконечна и ее отношение эквивалентности может быть алгоритмически неразрешимым подмножеством в множестве всех пар термов этой алгебры. Для того чтобы использовать алгебраические модели, нужно либо ограничить тип аксиом алгебры так, чтобы отношение эквивалентности на множестве ее термов было алгоритмически разрешимым и проблема равенства в ней разрешалась эффективно, либо в каждый момент времени использовать эффективно разрешимую аппроксимацию инициальной алгебры, состоящую из разрешимого (или конечного) подмножества термов алгебры с эффективно разрешимым подмножеством в отношении его эквивалентности.

Заметим что в инициальной алгебре, построенной по спецификации алгебры, отражаются все знания, вытекающие из спецификации алгебры, а в аппроксимации отражаются эффективно доступные знания, вытекающие из спецификации алгебры, добытые к текущему моменту. В частности, некоторые аппроксимации могут быть представлены в виде базы данных.

Между аппроксимациями инициальной алгебры естественным образом может быть определено отношение, соответствующее тому, что одна аппроксимация является более точной, чем другая. Это означает, что в более точной аппроксимации доступно большее множество термов алгебры и, если некоторое равенство термов доступно в менее точной аппроксимации, то оно доступно и в более точной аппроксимации.

Предложим структуры, в которых можно было бы хранить такие аппроксимации для эффективного вычисления в алгебрах.

Предлагаем рассматривать два типа вычислений в алгебрах: 1) в текущей аппроксимации инициальной алгебры (быстрые эффективные вычисления) на ос-

новании уже добытых знаний и 2) с расширением аппроксимации с добавлением новых термов к текущей аппроксимации алгебры и добавлением новых равенств между термами, которые выводятся из аксиом этой алгебры.

Особый интерес для моделирования онтологий представляют конечные аппроксимации алгебр, соответствующих онтологиям. Конечные аппроксимации создаются по некоторому конечному множеству термов данной алгебры, на котором строится отношение эквивалентности, порожденное конечным множеством пар термов из этого множества. Для элементов этих пар их равенство уже выведено из аксиом алгебры. Таким образом, в конечной аппроксимации алгебры множество ее термов распадается на непересекающиеся подмножества, состоящие из попарно равных между собой термов. В каждом таком подмножестве равных выражений выбирается один элемент, который является представителем – дескриптором элементов этого подмножества. Именно этот элемент (дескриптор) будет выдаваться после вычислений в аппроксимации в ответ на вопрос: чему равен некоторый терм? (В ответ на такой запрос выдается дескриптор, равный в данной аппроксимации этому терму.)

Естественно потребовать также, чтобы в конечной аппроксимации алгебры, если некоторый терм принадлежит конечной аппроксимации, то и все подтермы этого терма должны принадлежать этой аппроксимации.

Отношение равенства в алгебре на множестве термов удовлетворяет аксиоме конгруэнции. Это значит, что любая операция, примененная к равным аргументам, выдает равные значения.

В этих предположениях операция вычисления *calcOnApprox* термов на конечной аппроксимации должна выдавать каждому терму $F(t_1, \dots, t_k)$ из аппроксимации его дескриптор $\text{calcOnApprox}(F(t_1, \dots, t_k))$. При этом выполняется равенство:

$$\begin{aligned} \text{calcOnApprox}(F(t_1, \dots, t_k)) = \\ \text{calcOnApprox}(F(\text{calcOnApprox}(t_1), \dots, \\ \text{calcOnApprox}(t_k))). \end{aligned}$$

Поэтому для вычисления термов в аппроксимации достаточно знать только дескрипторы термов с именами операций алгебры и с аргументами-дескрипторами.

Хранение аппроксимации алгебры в том или ином виде называется внутренним текущим представлением алгебры в компьютерной системе по ее спецификации. Быстрые приближенные вычисления в алгебре выполняются по внутреннему представлению. Примером внутреннего представления алгебры чисел в компьютерных системах являются машинные числа.

Обычные программы логического вывода (*reasoners*), применяемые для OWL-онтологий также строят не всевозможные термы из имен онтологий (например, не все возможные пересечения и объединения классов, а только те, которые используются в определении данной онтологии).

Важным при построении внутреннего представления онтологии считается использование аксиом предиката *isSubclassOf* вида:

если *isSubclassOf*(*?a*, *?b*) AND *isSubclassOf*(*?b*, *?c*), то *isSubclassOf*(*?a*, *?c*);

если *isSubclassOf*(*?a*, *?b*) AND *isSubclassOf*(*?b*, *?a*), то *?a*=*?c*;

если *isSubclassOf*(*?a*, *?b*) AND *isSubclassOf*(*?a*, *?c*), то *isSubclassOf*(*?a*, $\Pi(?b, ?c)$),

где $\Pi(?b, ?c)$ – операция пересечение классов *?b* и *?c*.

Кроме того, важно использование аксиом для предиката принадлежности элемента классу, который здесь будет называться *hasType*¹. Аксиомы для этого предиката имеют вид:

если *hasType* (*?e*, *?a*) AND *isSubclassOf*(*?a*, *?b*), то *hasType* (*?e*, *?b*);

если *hasType* (*?e*, *?a*) AND *hasType* (*?e*, *?b*), то *hasType* (*?e*, $\Pi(?a, ?b)$).

Что считается противоречием в алгебре? Разные имена, введенные в определении (спецификации) алгебры, считаются разными элементами (исключения составляют имена переменных и имена синонимов уже введенных имен). Если из аксиом алгебры выводится равенство двух имен (например, *True=False*), то это считается противоречием, на которое должна указать система вывода. В онтологиях реакцией на такое указание должна быть проверка на совпадение объектов, соответствующих этим именам в предметной области: если объекты совпадают, то имена являются синонимами. В противном случае, требуется изменение аксиом, вызвавших это равенство.

В OWL также введено имя пустого класса *owl:Nothing* с такой аксиомой, что если для некоторого выражения *e* выводится выражение *hasType*(*e*, *Nothing*), то это противоречие.

С учетом приведенных аксиом конечную аппроксимацию алгебры онтологии можно представить в виде базы данных с отношениями *descriptor*, *resultOp*, *subclassOf*, *elementOf*.

В отношении *descriptor* описываются все дескрипторы, входящие в аппроксимацию. Указывается выражение дескриптора с уникальными именами операций и констант, входящих в его выражение, и внутренний идентификатор этого дескриптора.

Для данной аппроксимации в отношении *resultOp* описываются результаты операций онтологии, примененных к дескрипторам. В этом отношении для имени операции онтологии и списка идентификаторов дескрипторов аргументов операции дается идентификатор дескриптора, который является результатом этой операции для этих аргументов. Вместо идентификаторов можно использовать ссылочные данные на дескрипторы (адреса дескрипторов) в отношении *descriptor*.

В отношении *subclassOf* описывается отношение, состоящее из пар идентификаторов дескрипторов для неравных классов, связанных отношением класс-подкласс, между которыми нет классов, отличных от них самих в данной аппроксимации. Если по этому отношению построить граф, вершинами которого яв-

¹ В этой статье будут различаться отношения и предикаты. Так, *type* – это отношение (подмножество в множестве пар из элементов и классов). Выражение *type*(*e*, *A*) задает элемент (*e*, *A*) в отношении *type*. С другой стороны, *hasType* – предикат. Выражение *hasType*(*e*, *A*) принимает логическое значение.

ляются дескрипторы классов данной аппроксимации, то с учетом аксиомы для предиката *isSubclassOf* построенный граф будет ациклическим.

В отношении *elementOf* связывается идентификатор дескриптора элемента аппроксимации с дескриптором минимального класса, содержащего этот элемент в аппроксимации.

В отношении *notEqualDescriptor* фиксируются пары дескрипторов, которые в онтологии объявлены неравными.

Используя эти отношения, можно эффективно вычислять ответы на следующие вопросы к текущей аппроксимации:

- Чему равно данное выражение в текущей аппроксимации?
- Равны ли два выражения?
- Является ли данное выражение элементом класса, заданного другим выражением?
- Какие элементы являются элементами данного класса?
- Какие элементы связаны с данным элементом определенным свойством?
- Какие элементы имеют определенное значение для данного свойства?
- Какие свойства имеет данный элемент?

Заметим, что в перечисленных вопросах элементы, классы и свойства могут задаваться не только именами, но и сложными выражениями, задающими элементы, классы и свойства в аппроксимации.

Используя программные модули, строящие ответы на перечисленные вопросы, можно стандартным образом реализовать язык *SPARQL* для построения ответов на более сложные запросы к аппроксимации. Теоретически можно представить, что по аппроксимации строится граф из дескрипторов аппроксимации. Вершинами этого графа будут дескрипторы элементов аппроксимации, а ребрами – дескрипторы элементов бинарных отношений (свойств) в этой аппроксимации. В результате получаем расширение языка *SPARQL* за счет того, что теперь вершинами и свойствами в тройках могут быть сложные алгебраические выражения, а не только имена и элементы типов данных.

Правила переписывания и продукции в алгебрах и онтологиях

В алгебраическом подходе так же, как и в онтологиях, кроме равенств большое значение имеют правила переписывания и продукции. Для работы с онтологиями в Веб разработаны стандарты языков *Semantic Web Rule Language (SWRL)* [13] и *Rule Interchange Format (RIF)* [14]. Мы будем различать правила переписывания для вычислений выражений в аппроксимации алгебры и правила, изменяющие аппроксимации алгебры.

Правило переписывания имеет вид:

$$\text{Condition}(x_1, \dots, x_k) \Rightarrow \text{rewrite } L(x_1, \dots, x_k) \text{ to } R(x_1, \dots, x_k) [\text{имя правила}],$$

где $L(x_1, \dots, x_k)$ и $R(x_1, \dots, x_k)$ – термы алгебры одного типа с переменными $x_1, \dots, x_k$.

С помощью таких правил могут задаваться аксиомы и способы вычисления в алгебре. Правило действует в аппроксимации алгебры при построении ответа на вопрос: «Чему равен терм t ?», по следующему принципу. Если в терме t есть подтерм $L(t_1, \dots, t_k)$, и в аппроксимации выполняется условие $\text{Condition}(t_1, \dots, t_k)$, то в терме t подтерм $L(t_1, \dots, t_k)$ заменяется на $R(t_1, \dots, t_k)$. Полученный терм t' является результатом переписывания термина t за один шаг по этому правилу. Терм t' считается (полагается) равным терму t . В общем случае при спецификации алгебр (или онтологий) правил переписывания может быть много, и они при вычислениях применяются к терму t и результатам его переписывания до тех пор, пока не получится терм, к которому не может быть применено ни одно из правил. Этот терм называется результатом вычисления термина t по системе правил переписывания (каноническим термом).

Частными случаями вычислений по правилам переписывания являются вычисления в аппроксимации с помощью отношения *resultOf* на дескрипторах. В более общем случае правила переписывания могут быть построены по равенствам – аксиомам алгебры (левая часть равенства переписывается в правую часть). В теории вычислений по правилам переписывания известны алгоритмически проверяемые условия на систему правил переписывания – условия Черча-Россера [15], при выполнении которых каждый терм алгебры переписывается к единственному своему каноническому виду, независимо от последовательности применяемых правил. Однако во многих системах символического вычисления последовательность применения правил может фиксироваться и управляться пользователями при описании алгебры.

Следующий вид правил, который важен в онтологиях, – это правила, которые меняют аппроксимацию алгебры онтологии. Основные из них те, которые по каждому предложению текста, описывающим онтологию, достраивают внутреннее представление онтологии (ее аппроксимацию). При этом будет предполагаться, что каждая онтология строится в среде другой онтологии, которая предоставляет свой словарь и операции для построения новой онтологии. На первых этапах построения библиотеки онтологий такой средой (ядром) построения новых онтологий может быть внутреннее представление, построенное по стандартам *RDF*, *RDFS* или *OWL*. К этой аппроксимации ядерной онтологии нужно отнести и основные правила изменения аппроксимаций.

К основным правилам изменения аппроксимации онтологии нужно отнести правило создания в базе данных аппроксимации нового дескриптора вида *create(NameElement, Type)*. Это правило создает по имени *NameElement* новый дескриптор элемента в уже существующем в аппроксимации типе (классе) *Type*. Тип *Type* может быть задан не только именем, но и сложным выражением. Условием создания такого элемента в этом типе является уникальность имени элемента в этом типе и возможность добавления новых элементов в *Type* (например, *Type* не должен быть равен пустому классу).

Правило *makeElement(El, Cl)* делает уже существующий в аппроксимации дескриптор, соответ-

ствующий *El*, элементом класса, заданного дескриптором *Cl*. Естественно, перед выполнением этого правила нужно проверить, является ли *Cl* классом в аппроксимации. При выполнении этого условия нужно найти тип дескриптора *El* и в базе данных аппроксимации сделать этот дескриптор элементом пересечения типа дескриптора *El* и дескриптора класса *Cl*.

Другим правилом изменения аппроксимации онтологии может быть правило, которое по выражению *<Субъект Свойство Объект>* добавляет к базе данных аппроксимации факт, отражающий то, что дескриптор *Субъекта* связывается с дескриптором *Объекта* свойством, которое задается дескриптором *Свойства*. Условием применения этого правила является то, что в уже построенной аппроксимации дескриптор *Свойства* принадлежит классу *Property*, дескриптор *Субъекта* принадлежит области определения (*domain*) *Свойства*, а дескриптор *Объект* принадлежит области значений (*range*) *Свойства*.

Особым образом обрабатывается выражение *<Субъект subclassOf Объект>*. По этому выражению запускается правило *makeSubclass(Субъект, Объект)*. Это правило выполняется почти так же, как и правило, запускаемое выражением *<Субъект Свойство Объект>*, но предварительно в аппроксимации проверяется условие, является ли дескриптор *Объекта* подклассом дескриптора *Субъекта*. Если это условие выполняется, то запускается правило *makeEqual(Субъект, Объект)*, которое в аппроксимации делает дескриптор *Субъекта* равным дескриптору *Объекта*.

Правило *makeEqual(E1, E2)* может быть применено, если дескрипторы выражений *E1* и *E2* одного типа. На множестве дескрипторов используется линейный порядок, связанный с лексикографическим порядком на термах и длиной терма – весом терма. Переменные имеют вес больший, чем вес терма без переменных. Для некоторых термов вес может быть установлен пользователем. При приравнивании двух дескрипторов одного типа, дескриптором в новой аппроксимации оставляется дескриптор с меньшим весом, дескриптор с большим весом удаляется из дескрипторов, а пара: старый дескриптор и новый дескриптор, помещается в отношение *resultOp*. Затем ссылки на удаленный дескриптор во всех отношениях аппроксимации заменяются ссылками на новый дескриптор. В отношениях аппроксимации, в которых дескрипторы не должны связываться с собой (например, не должно быть строк *resultOp(?X, ?X)*), такие появившиеся строки удаляются. Если выражения *E1* и *E2* в исходной аппроксимации являются классами, то, кроме того, находят все классы, лежащие между *E1* и *E2* и приравнивают их к новому дескриптору по тому же правилу. Процесс приравнивания заканчивается (ввиду конечности множества дескрипторов в исходной аппроксимации) новой аппроксимацией онтологии.

Правило *createVar(NameVar, Type)* аналогично правилу *create(NameElement, Type)*, но создает в аппроксимации не элемент типа *Type*, а переменную, дескриптор которой имеет большой вес.

Правило *createTerm(NameOperation, ListTermsArgument, Type)* проверяет, есть ли такой терм в аппрок-

симации и, если его нет, то создает новый терм в аппроксимации типа *Type* по дескриптору выражения *NameOperation*, задающего имя операции, и списку дескрипторов *ListTermsArgument* – аргументов операции. Условием применения правила является существование дескрипторов *ListTermsArgument* в аппроксимации, соответствие их типов типам аргументов операции и выполнение для этого списка дескрипторов условия применения операции с именем, заданным термом *NameOperation*. Правило помещает построенный терм с именем операции и аргументами-дескрипторами в отношение аппроксимации *descriptor*.

Правило *makeNotEqual(E1, E2)* фиксирует в отношении аппроксимации *notEqual* неравенство двух дескрипторов, соответствующих выражениям *E1* и *E2*, которое задается в спецификации онтологии.

Правило *createRewriteRule* создает в аппроксимации правило переписывания, указывая его идентификатор, имя, список переменных с их типами, левый и правый термы правила переписывания, предусловия и постусловия выполнения правила. Условием применения этого правила является также правильность построения входящих в него термов, вхождение всех переменных из списка в левый терм и вхождение переменных правого терма и условий переписывания в список переменных правила.

Важным правилом для алгебраического моделирования онтологий является правило *calculateOnApprox(Term)*, возвращающее дескриптор, равный выражению *Term* в текущей аппроксимации. Это правило используется в других правилах для получения дескрипторов выражений, входящих в эти правила, и для проверки условий применения правил. Правило *calculateOnApprox(Term)* для сложного терма вида *Term = NameOperation(t₁, ..., t_k)* находит сначала дескрипторы *d₁, ..., d_k* для аргументов *t₁, ..., t_k* по тому же правилу *calculateOnApprox*, а потом проверяет, находится ли терм *NameOperation(d₁, ..., d_k)* в отношении *descriptor* или *resultOp* текущей аппроксимации. Если это выражение будет найдено там, то правило *calculateOnApprox* выдает дескриптор выражения.

Для проверки условий могут использоваться также правила (предикаты) *isSubclassOf(subCl, Cl)*, *isElementOf(El, Cl)*, *has(Субъект, Свойство, Объект)*, которые вычисляются по аппроксимации и возвращают булевы значения *True* или *False*. Правило *isSubclassOf(subCl, Cl)* вычисляется исходя из отношения аппроксимации *subclassOf* и свойств рефлексивности и транзитивности отношения *isSubclassOf*. Кроме того, *isSubclassOf(owl:Nothing, Cl)* является истиной для любого класса *Cl*. При вычислении правила *isElementOf(El, Cl)* используется отношение аппроксимации *elementOf(El, Cl1)* и следующее свойство: если *elementOf(El, Cl1)* входит в отношение и верно *isSubclassOf(Cl1, Cl)*, то верно *isElementOf(El, Cl)*.

Правило *calculate* по входному выражению выдает результат. В отличие от правила *calculateOnApprox*, правило *calculate* действует с расширением аппроксимации во время вычислений и может использовать любые правила, включая правила переписывания. В частности, правило *calculate*, примененное к терму *NameOperation(t₁, ..., t_k)*, должно проверить сначала – не является ли *NameOperation* именем правила, для

которого заданы действия в аппроксимации, если это имя правила, то применяется правило с этим именем к термам $t_1, \dots, t_k$. В противном случае, находятся дескрипторы $d_1, \dots, d_k$ термов $t_1, \dots, t_k$ по тому же правилу *calculate* и проверяется, находится ли терм *NameOperation*($d_1, \dots, d_k$) в отношении *descriptor* или *resultOp* аппроксимации на этом шаге вычисления. Если находится, то выдается дескриптор – результат вычисления. Если не находится, то терм *NameOperation*($d_1, \dots, d_k$) помещается в отношение *descriptor*, расширяя аппроксимацию, а в результате вычислений выдается терм *NameOperation*($d_1, \dots, d_k$).

Среди входных выражений для правила *calculate* смогут быть сложные вопросы, состоящие из последовательности предварительных действий, на которые *calculate* выдает ответ.

Если на некоторый вопрос к онтологии система не может вывести ответ, а пользователь знает стратегию получения ответа на вопрос, то он может, задавая последовательность наводящих вопросов к онтологии, по которым система, отвечая на вопросы, достраивает аппроксимацию онтологии и приводит к ситуации, в которой получается ответ на исходный вопрос. Таким образом происходит обучение аппроксимации онтологии по наводящим вопросам пользователей.

Помимо вопросов к онтологиям, меняющим аппроксимации онтологий, может быть разработан язык запросов, подобный *SPARQL*, с использованием правил, расширяющих аппроксимацию во внутреннем представлении онтологии запроса, но не меняющим исходную аппроксимацию онтологии.

Система правил в алгебраическом подходе должна быть открытой и предоставлять возможность пользователям конструировать новые правила из уже существующих.

Естественно, все правила должны фиксировать в журнале, какие изменения в аппроксимации они сделали, а в случае невозможности их выполнения выдавать соответствующие сообщения. Эти сообщения необходимы для отладки конструирования онтологий, аппроксимаций, запросов и правил. Каждое правило должно быть оформлено в виде транзакции: оно либо выполняется до конца, либо не выполняется совсем.

МОДУЛЬНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ ОНТОЛОГИЙ

Модульная организация программ и использование библиотек программ является основой современного стиля программирования. Это относится и к алгебраическому моделированию. В системе алгебраического представления знаний *CASL* и алгебраических языков программирования *Haskell* модульность лежит в основе.

В разработках онтологий модульность находится только в начале развития. В стандарте *OWL* есть конструкция *owl:Imports*, которая позволяет использовать внутри одной онтологии другие онтологии. Интересен способ использования *insert*-конструкций языка *SPARQL* с подзапросами к внешним онтологиям. С помощью этой конструкции фрагмент одной онтологии может быть добавлен к другой онтологии. Особое место в модуляризации онтологий занимает создание и использование шаблонов проектирования онтологий *Ontology Design Patterns* (ODPs) [16, 17].

Каждый такой шаблон представляет собой небольшую документированную *OWL*-онтологию с классами, свойствами, элементами и аксиомами, которая описывает фрагмент ситуации данной области знания. Предварительно создается и отлаживается набор таких шаблонов. Возможно использование внешних устоявшихся шаблонов. Потом из таких шаблонов формируется онтология предметной области как из модулей. О современном состоянии модуляризации онтологий и проблемах модульного проектирования онтологий хорошо написано в работе [18]. По теме модульного построения онтологий проводятся конференции [19].

В предлагаемом нами алгебраическом подходе к построению онтологий в Веб модульность имеет важное значение. Как уже отмечалось ранее, каждая онтология создается в среде некоторой другой онтологии, которая предоставляет свой словарь, начальную аппроксимацию онтологии и правила среды для формирования новой онтологии. Другие онтологии, разработанные в этой среде, могут быть также использованы как шаблонные внутри новой онтологии и могут образовывать фрагмент библиотеки онтологий предметной области, разрабатываемой группой специалистов, объединившихся с целью создания такой библиотеки по некоторой проблемной области знания.

Естественно, что некоторые онтологии библиотек разных предметных областей не могут быть объединены и могут противоречить друг другу. Если такое объединение все же требуется, то это может представить не только для онтологий, но и для самой предметной области проблему, которую должны решить специалисты проблемных областей, знания о которых представляются в онтологиях.

Тексты (спецификации) онтологий в библиотеках должны быть не очень большими и организовываться наподобие вики-страниц со ссылками на другие страницы онтологий, которые в них используются.

Каждому тексту онтологии соответствует внутреннее представление онтологии, которое хранится отдельно. К онтологии в библиотеке можно обратиться с запросом на языке, подобном *SPARQL*, расширенным правилами онтологии. Ответ на запрос строится по аппроксимации онтологии с использованием правил онтологии. Ответ может быть представлен в табличном или графическом виде, отображая, например, по фрагментам, структуру аппроксимации онтологии.

Онтологии, находящиеся в библиотеке, не могут меняться. Каждая версия онтологии является новой. Новые онтологии могут добавляться в библиотеку. Удаляться из библиотеки могут только такие онтологии, которые не используются.

Одна онтология может использоваться в другой онтологии двумя способами. При одном способе добавление одной онтологии к другой может состоять в процедуре слияния двух внутренних представлений (аппроксимаций) онтологий и добавления правил одной онтологии к правилам другой. Если при этом возникают противоречия, то возможен другой способ добавления онтологии. Для этого первая онтология достраивается по предложениям текста второй онтологии. В случае обнаружения противоречия (не-

выполнение условия) на некотором предложении, противоречие устраняется добавлением дополнительных условий.

Для удобства чтения текстов онтологий их модульная организация может быть устроена с использованием всех принципов объектно-ориентированного программирования: иерархии, наследования правил, инкапсуляции, полиморфизма правил. Возможно также использование параметрических онтологий по аналогии с параметрическими модулями в алгебраическом подходе к программированию [9, 10].

В библиотеке онтологий проблемной области могут храниться не только шаблонные онтологии, описывающие фрагменты знаний проблемной области, но шаблонные ситуации для формирования вопросов к знаниям проблемной области. Используя библиотечные онтологии, пользователи могут сформировать онтологии задач, описывающих конкретные ситуации предметной области и обратиться к ним с запросом. Таким образом, модульность позволит моделировать ситуации проблемной области и отвечать на вопросы типа: «Что будет, если ...?».

О ЯЗЫКЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ ОНТОЛОГИЙ В АЛГЕБРАИЧЕСКОМ ПОДХОДЕ

Представлять онтологии в библиотеках онтологий по различным областям знания должны специалисты в этих областях. В каждой области знания складывается собственный язык для описания знаний этой области. Это может быть связано как с традициями в этой области знания, так и с необходимостью иметь язык, адекватный миру представляемых знаний. Было бы странно и неудобно представлять знания, например, по математике на естественном языке, не пользуясь формулами. Это относится и к другим областям знания.

В учебниках, когда описываются понятия и закономерности предметной области, обычно вводятся и конструкции языка, с помощью которых об этих понятиях можно говорить. Естественно, эту возможно нужно обеспечить и при построении онтологий, в которые помимо имен классов, свойств, элементов, переменных, операций пользователи могут вводить языковые конструкции для применения правил. Простейшими из таких конструкций могут быть могут быть шаблоны типа *If_Then_Else*, в котором вместо подчеркиваний вставляются выражения соответствующих типов (в языках *CASL*, *Haskell*, *Mathematica*, *Maude* обеспечивается возможность ввода таких конструкций для именования и вызова любых функций, определяемых в программе). Помимо этого, в онтологиях должна быть обеспечена возможность определения формальных языков (например конструкциями Бэкуса-Наура) и привязка выражений языка к действиям в аппроксимации онтологии. В системах, работающих с онтологиями, естественно, должны быть средства отладки введенных языков.

Таким образом, язык в алгебраическом подходе становится открытым и контекстным. Правильность языкового выражения (синтаксическая и семантическая) проверяется в контексте определенной онтологии, с учетом используемых в ней онтологий, и ее среды на основании аппроксимации онтологии. Фор-

мируя библиотеку онтологий предметной области, пользователи одновременно формируют и согласовывают язык своей предметной области, на котором они будут работать с построенными онтологиями.

Среди языковых конструкций онтологии могут быть конструкции, которые видны в контексте другой онтологии (например, если эти две онтологии разработаны в одной онтологии-среде). Их использование в другой онтологии приводит к автоматической подгрузке первой онтологии с параметрами, указанными в этой языковой конструкции. Такой способ является, иногда, более естественным для формирования новых онтологий и онтологий задач, чем предварительная загрузка всех модулей с указанием функций, которые надо использовать.

БЛИЗКИЕ РАБОТЫ

Несколько работ по алгебраическому представлению знаний и алгебраическому программированию уже упоминалось в тексте. На меня большое влияние оказывали работы профессора Жозефа Гогюена (Joseph Goguen) [20], начиная с работ по алгебраическому моделированию абстрактных типов данных и до приложения этого подхода к онтологиям [21].

Продолжением работ Ж. Гогюена и работ группы *The Common Framework Initiative for algebraic specification and development of software* (CoFI) [22] стала разработка языка спецификаций и моделирования для распределенной онтологии (*The distributed ontology, modelling and specification language – DOL*) [23, 24]. В основе этого подхода лежит идея модульности представления знаний и интеграция знаний, представленных на разных языках *OWL*, *UML*, *CASL* ..., в основе которых может быть лежат разные логики. В языке *DOL* предоставляются средства для интерпретации одних языков в других с использованием онтологий. Рассматриваются библиотеки и сети онтологий.

Автора настоящей статьи приводят в восторг работы профессора Стефена Вольфрама (Stephen Wolfram) [25] и его фирмы [26], в частности, системы *Mathematica* [27] и *Wolfram Alpha* [28], в которых накоплен громадный объем знаний и их возможностей. К недостаткам этих систем следует отнести некоторую их закрытость в пополнении знаний и ограниченность коллективного творчества сторонними пользователями.

Достижения проекта *Wikidata* [29, 30] также поражают накопленным объемом фактов и размерами онтологий, а также большим количеством групп, которые в этом проекте активно участвуют и представляют данные по своим областям знания.

В 2022 г. в рамках проекта *MediaWiki* открывается новый проект: *Abstract Wikipedia* [31]. Принципы расширения возможностей систем *Wikipedia* и *Wikidata* изложены в статье [32]. В проекте предлагается создание многоязычной *Wikipedia*, в которой содержание вводится только один раз на одном из языков, но отображается на многих языках за счет использования представленных в *Wikidata* знаний о лексике языков и представления содержания страниц в независимом от естественных языков виде. Существенной частью проекта является подпроект *Wikifunctions* – создания самими пользователями *Wiki*-страниц биб-

лиотеки программных функций. По словам авторов проекта он позволит каждому создавать, поддерживать, запускать и ссылаться на функции библиотеки *Wikifunctions*, а также пользователям, незнакомыми с языками программирования, пользоваться возможностями библиотеки для обработки данных из *Wikidata* и получать ответы на естественном языке. Авторы [32, с. 40] утверждают: «Ожидается, что Викифункции и Абстрактная Википедия будут стимулировать ряд направлений исследований в области представления знаний, генерации естественного языка, систем совместной работы и автоматизированной разработки программного обеспечения. Наличие большого каталога функций будет полезно для многих задач». Слабо обсужденными в этом проекте остаются вопросы модульности и создания среды для формирования и использования формальных языков (а не только естественных), хотя в проекте *Wikifunctions* без модульности будет трудно обойтись, так как программные функции обычно контекстны.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей статье обсуждается развитие графовых средств представления онтологий методами алгебраического подхода к представлению знаний и программированию. В качестве вершин и ребер графа предлагается использовать не только уникальные идентификаторы объектов в Веб с именами, но и термы – правильно построенные выражения из таких имен и имен операций, которые из классов, свойств, элементов классов и типов данных строят новые классы, свойства и элементы классов.

В алгебраическом подходе к моделированию онтологий в Веб предлагается использование следующих принципов:

- модульность при построении онтологий и создание библиотек онтологий способами, аналогичными созданию *Wikipedia*;
- каждая онтология разрабатывается в среде другой онтологии, которая предоставляет свои правила построения онтологий и языковые средства;
- язык представления онтологий и вопросов к онтологиям открытый и контекстный: в каждой онтологии пользователи могут вводить свои конструкции языка для функций и правил и определять их действия через функции и правила, доступные из текущей онтологии и ее среды;
- с каждой онтологией связывается ее алгебра и аппроксимация алгебры онтологии (внутреннее представление онтологии), по которой выполняются эффективные вычисления проверки синтаксической и семантической правильности выражений, заданий онтологии и запросов к ней, а также условий применимости операций и правил;
- в графе, соответствующем спецификации онтологии, вершины и ребра являются термами – выражениями, задающими классы, элементы классов и свойства операциями из других классов, элементов и свойств;
- вычисления в онтологии выполняются с использованием ее внутреннего представления по правилам переписывания и правилам изменения внут-

реннего представления, заданным или доступным в контексте данной онтологии, но описанным в других онтологиях.

Предлагаемые принципы могли бы лечь в основу разработки стандарта алгебраического языка представления онтологий в Веб: *Algebraic Web Ontology Language (Algebraic OWL)*.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. RDF 1.1 Concepts and Abstract Syntax, W3C Recommendation 25 February 2014. – URL: <https://www.w3.org/TR/2014/REC-rdf11-concepts-20140225/Overview.html> (дата обращения: 30.07.2022).
2. RDF Schema 1.1, W3C Recommendation 25 February 2014. – URL: <https://www.w3.org/TR/rdf-schema/> (дата обращения: 30.07.2022).
3. OWL 2 Web Ontology Language, Structural Specification and Functional-Style Syntax (Second Edition), W3C Recommendation 11 December 2012. – URL: <https://www.w3.org/TR/owl-syntax/> (дата обращения: 30.07.2022).
4. OWL 2 Web Ontology Language, New Features and Rationale (Second Edition), W3C Recommendation 11 December 2012. – URL: <https://www.w3.org/TR/2012/REC-owl2-new-features-20121211/> (дата обращения: 30.07.2022).
5. RDF-star and SPARQL-star, Final Community Group Report 17 December 2021. – URL: <https://www.w3.org/2021/12/rdf-star.html> (дата обращения: 30.07.2022).
6. Wikidata: SPARQL tutorial. – URL: https://www.wikidata.org/wiki/Wikidata:SPARQL_tutorial (дата обращения: 30.07.2022).
7. Bidoit M., Mosses P.D. CASL User Manual: Introduction to Using the Common Algebraic Specification Language // Lecture Notes in Computer Science. 2900 (IFIP Series). – Springer, 2004.
8. Мена А. Изучаем Haskell. Библиотека программиста. – Санкт-Петербург: Питер, 2015.
9. Durán F., Eker S., Escobar S., Martí-Oliet N., Meseguer J., Rubio R., Talcott C.L. Programming and symbolic computation in Maude // Journal of Logical and Algebraic Methods in Programming. – 2020. – Vol. 110. – P. 1-100.
10. Clavel M., Duran F., Eker S., Escobar S., Lincoln P., Martí-Oliet N., Meseguer J., Rubio R., Talcott C. Maude Manual (Version 3.2.1). – 2022. – URL: <http://maude.cs.illinois.edu/w/images/6/65/Maude-3.2.1-manual.pdf> (дата обращения: 30.07.2022).
11. Бениаминов Е.М., Лапшин В.А. Уровни представлений онтологий, языки, математические модели и проект Веб-сервера онтологий в стиле Веб 2.0 // Научно-техническая информация. Сер 2. – 2012. – № 3. – С. 1-10.
12. Бениаминов Е.М. Работа в системе коллективного формирования библиотек онтологий ЭЗОП (Руководство пользователя). – Москва: РГГУ (препринт), 2015. – URL: http://beniaminov.rsuh.ru/User_guideEzop.pdf (дата обращения: 30.07.2022).
13. SWRL: A Semantic Web Rule Language, Combining OWL and RuleML. W3C Member Submission

- 21 May 2004. – URL: <https://www.w3.org/Submission/SWRL/> (дата обращения: 30.07.2022).
14. RIF Overview (Second Edition). W3C Working Group Note 5 February 2013. – URL: <https://www.w3.org/TR/rif-overview/> (дата обращения: 30.07.2022).
 15. Church A., Rosser J.B. Some properties of conversion // Transactions of the American Mathematical Society. – 1936. – Vol. 39, № 3. – P. 472–482.
 16. Ontology Engineering with Ontology Design Patterns: Foundations and Applications (Studies on the Semantic Web) / eds. P. Hitzler, A. Gangemi, K. Janowicz, A. Krisnadhi, V. Presutti // IOS Press. – 2016. – Vol. 25.
 17. Ontology Design Pattern. – URL: <http://ontology-designpatterns.org/wiki/> (дата обращения: 30.07.2022).
 18. Shimizu C., Hammar K., Hitzler P. Modular Ontology Modeling // Semantic Web. – 2022. – Vol. Pre-press, № Pre-press. – P. 1-31. – URL: <https://www.semantic-web-journal.net/system/files/swj2886.pdf> (дата обращения: 30.07.2022).
 19. Modular Knowledge 2022, 1st Workshop on Modular Knowledge, @ ESWC 2022, Hersonissos, Greece, May 29, 2022. – URL: <https://mk2022.fbk.eu/home> (дата обращения: 30.07.2022).
 20. Goguen J. (home page). – URL: <https://cseweb.ucsd.edu/~goguen/> (дата обращения: 30.07.2022).
 21. Goguen J. Information Integration, Databases and Ontologies. – URL: <https://cseweb.ucsd.edu/~goguen/projs/data.html> (дата обращения: 30.07.2022).
 22. CoFI: The Common Framework Initiative for algebraic specification and development of software. – URL: <https://homepages.inf.ed.ac.uk/dts/cofi/> (дата обращения: 30.07.2022).
 23. Mossakowski T., Codescu M., Neuhaus F., Kutz O. The distributed ontology, modelling and specification language – DOL // The Road to Universal Logic–Festschrift for 50th birthday of Jean-Yves Beziau, Vol. II / eds. A. Koslow, A. Buchsbaum. – Birkhäuser: Studies in Universal Logic, 2015.
 24. Object Management Group. The distributed ontology, modeling, and specification language (DOL). – 2016. – OMG standard. – URL: <http://www.omg.org/spec/DOL> (<https://www.omg.org/spec/DOL/1.0/PDF>) (дата обращения: 30.07.2022).
 25. Stephen Wolfram. – URL: <https://www.stephenwolfram.com/> (дата обращения: 30.07.2022).
 26. Wolfram (страница компании). – URL: <https://www.wolfram.com/> (дата обращения: 30.07.2022).
 27. Система Mathematica. – URL: <https://www.wolfram.com/mathematica/> (дата обращения: 30.07.2022).
 28. Система WolframAlpha. – URL: <https://www.wolframalpha.com/> (дата обращения: 30.07.2022).
 29. Система Wikidata. – URL: https://www.wikidata.org/wiki/Wikidata:Main_Page (дата обращения: 30.07.2022).
 30. Hernández D., Hogan A., Riveros C., Rojas C., Zerega E. Querying Wikidata: Comparing SPARQL, Relational and Graph Databases / eds P. Groth, et al. // ISWC 2016, Part II. – LNCS. – Vol. 9982. – P. 88-103. – Springer, Charm, 2016. – URL: <https://aidan-hogan.com/docs/wikidata-sparql-relational-graph.pdf> (дата обращения: 30.07.2022).
 31. Проект: Abstract Wikipedia. – URL: https://meta.wikimedia.org/wiki/Special:MyLanguage/Abstract_Wikipedia (дата обращения: 30.07.2022).
 32. Vrandečić D. Viewpoint: Building a multilingual Wikipedia // Communications of the ACM. – 2021. – Vol. 64, № 4. – P. 38-41. – URL: <https://cacm.acm.org/magazines/2021/4/251343-building-a-multilingual-wikipedia/fulltext> (дата обращения: 30.07.2022).

Материал поступил в редакцию 01.08.22.

Сведения об авторе

БЕНИАМИНОВ Евгений Михайлович – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой Российского государственного гуманитарного университета, Москва.
e-mail: ebeniamin@yandex.ru

К проблеме использования методов и технологий искусственного интеллекта в современных цифровых системах управления

Обсуждаются некоторые возможности использования математических моделей и методов, относимых к области искусственного интеллекта, в современных системах цифрового управления, а также ряд их характеристик. Представлен новый класс таких моделей, формируемых извлекаемыми из накапливаемых эмпирических данных интерполяционно-экстраполяционными зависимостями.

Ключевые слова: искусственный интеллект, системы управления, интерполяционно-экстраполяционные математические модели, сложность вычислений

DOI: 10.36535/0548-0027-2022-10-3

ВВЕДЕНИЕ. НОВЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К МАТЕМАТИЧЕСКИМ МОДЕЛЯМ В СИСТЕМАХ ЦИФРОВОГО УПРАВЛЕНИЯ

Задача управления созданными человеком механизмами (как отдельными системами, так и их сложно организованными объединениями) уже несколько столетий находится в фокусе внимания научного и инженерного сообществ. Блестящей иллюстрацией сложного пути развития этой проблематики, идентификации и преодоления возникавших проблем и «барьеров» может, в частности, служить более чем трехсотлетняя история развития тепловых двигателей [1, 2] – тепловых преобразователей продуктов внешнего (паровой) и внутреннего (бензиновый, дизельный) сгорания¹. Уже для первых используемых здесь устройств управления (см. центробежный регулятор Уатта [4] и его технологических «родственников») были характерны ясное понимание целеполагания (целей управляющих воздействий) и способов его реализации.

Сменившая эпоху аналоговых систем автоматического управления современная эпоха цифровых управляющих систем определила компьютерные модели поведения объекта управления в окружающей его среде (и прежде всего – в динамически меняющейся обстановке, допускающей возникновение управленческих ситуаций принципиально нового – ранее не встречавшегося – характера) как критически важный компонент современных систем управления большими техническими объектами комплексного характера (интегрирующего разнородные составляющие его подсистемы).

Для современных типов объектов управления, обозначивших потребность в разработке оригинальных принципов и моделей с целью расширения успешной практики использования таких моделей на новых классах создаваемых человеком механизмов, характерны:

- открытые (постоянно пополняемые новой информацией) миры *Big Data*, анализируемые в процессе обработки данных и поддержки принятия решений (АД и ППР);
- *процессно-реальное* времени АД и ППР;
- отсутствие (реализуемых на практике) возможностей рассмотреть и заранее проанализировать все потенциально осуществимые ситуации вида *состояние объекта управления => управленческое решение* (и даже «факторизовать» множество таких ситуаций в виде исчерпывающей системы заранее предопределенных «классов» подобия).

ЦИФРОВЫЕ МОДЕЛИ БАЛАНСОВОГО И СЦЕНАРНОГО ХАРАКТЕРА

Исторически так сложилось, что в цифровых системах управления наиболее распространенными оказались решения двух типов, первый из которых представляется уместным называть моделями «балансового» характера, а второй – *сценарного*. Вообще, имеется и третий класс, базирующийся на так называемых логико-лингвистических моделях (например, системы *ситуационного управления* – см. далее). Однако он развивался преимущественно в нашей стране и оказался малоизвестен за её рубежами.

¹ Та же технологическая схема преобразования энергии и управления реализована и в электрических двигателях [3].

Модели «балансового» типа строятся по стандартной схеме следующего вида:

- фиксируется целевой эффект (например, наличие или же отсутствие того или иного определенного свойства, которым должен обладать объект управления, невзирая на те или иные воздействия на него со стороны окружающей среды);
- формируется реестр факторов влияния на наличие или отсутствие целевого эффекта;
- идентифицируется система взаимосвязей между выявленными факторами влияния, которая «упаковывается» в систему соотношений (например, уравнений того или иного вида с соответствующими ограничениями), разрешимость (аналитическая и/или численная) которых и определяет явный вид зависимостей *состояние объекта управления => управленческое решение*, позволяющих формировать в каждой конкретной ситуации результативные (т. е. обеспечивающие наличие целевого эффекта) управляющие воздействия.

Обычно такие системы соотношений представляют собою формализованное описание тех или иных инвариантов, характеризующих специфику анализируемой предметной области. (Например, для описания кинематики движения объекта управления в пространстве это могут быть соответствующие законы сохранения – энергии, импульса, момента импульса и т.п.). Регулятор, реализующий найденные цифровые зависимости вида *состояние объекта управления => управленческое решение*, и становится в решениях этого типа ядром системы управления соответствующим объектом.

Решения сценарного характера часто разрабатываются для объектов, адекватное описание поведения которых «балансовыми» инструментами затруднено (например, в силу проблем с идентификацией как исчерпывающего перечня факторов влияния на целевой эффект, так и полной системы взаимосвязей между ними), или же вообще невозможно (например, ввиду непреодолимых сложностей с эффективной разрешимостью соответствующих систем уравнений). Распространенная «тактика» поиска выхода из таких ситуаций состоит в том, чтобы определить конкретный сценарий – заданную очередность состояний объекта управления и «правил» последовательного перехода по их цепочке, дополненные «правилами» корректировки – перечнем конкретных управляющих воздействий, обеспечивающих возвращение объекта управления на заданную сценарием «траекторию» в случае его локальных «сходов» с неё.

Примерами активно используемых решений такого типа могут, в частности, служить:

- цифровые системы автоматического управления посадкой высокоскоростных летательных аппаратов (*Space Shuttle* и *Буран* [5]), где контроль и поддержание пребывания объекта управления на посадочной глиссаде обеспечивается средствами проблемно-ориентированной продукционной экспертной системы (*rule-based system*), содержащей до десятка тысяч правил вида *если [ситуация], то => [решение]*, применяемых по результатам анализа текущих значений около полутора десятков тысяч параметров и выполняемых примерно 40 раз в секунду;

- цифровые системы контроля безопасности функционирования атомных электростанций [6], где также, с использованием проблемно-ориентированных продукционных экспертных систем (*rule-based system*), контролируется «нахождение» объекта управления на такой заданной «траектории» в соответствующем фазовом пространстве, безопасность которой достаточно хорошо изучена и сопровождается развернутой системой инструкций, исполняемых в тех или иных нештатных ситуациях.

Логико-лингвистические модели (см., в частности [7-9] и др.) в своей основе имеют проблемно-ориентированные системы понятий и отношений, на иерархиях (взаимосвязях *роды-виды-экземпляры*) которых задаются операторы обобщения и детализации так, что в дополнение к хорошо известной технике так называемых *таблиц решений* (применению в процессе управления систем правил вида СИТУАЦИЯ $S_i \Rightarrow$ РЕШЕНИЕ D_i) в используемом здесь «арсенале» средств анализа данных и поддержки принятия решений имеются также «инструменты» обобщения и детализации решений по классам анализируемых ситуаций. Задействованы также и специальные «процедурные» средства порождения новых знаний (в том числе – средства моделирования проблемно-ориентированных рассуждений эксперта при решении им определенного класса задач [9]), которые могут быть использованы для порождения новых правил вида СИТУАЦИЯ $\Rightarrow$ РЕШЕНИЕ.

Между тем, несложно привести примеры реальных ситуаций, где востребованы управленческие модели и методы совершенно иного типа, – это необходимость:

- оперировать в открытых – допускающих пополнение информацией принципиально нового, ранее не встречавшегося характера, – «мирах» данных и управленческих ситуаций. (Следует учитывать, что в таких «мирах», в частности, неприменимы конструкции класса *генеральная совокупность* и *выборки* из нее, в том числе, *репрезентативные*, т. е. в общем случае получение «универсальных» по своей применимости функциональных зависимостей и моделей оказывается весьма проблематичным);
- в ответ на изменяющиеся условия (в том числе – и динамически изменяющейся) внешней среды генерировать управляющие воздействия адекватного характера (например, противодействие «угрозам» и т.п.);
- моделировать возможные варианты развития событий в текущей ситуации (т. е. потребность в имитации поведения объекта управления, предиктивном моделировании его действий в тех или иных, в том числе новых, ранее не встречавшихся обстоятельствах);
- *быстро* (т. е. вычислительно эффективно) формировать управленческий ответ в сложных многофакторных ситуациях (проблема обеспечения так называемого *машинного*² времени анализа данных, оценки ситуации и принятия решений). Фактически речь здесь идет о возможностях результативного анализ *Big Data* в рамках жестких ограничений по времени АД и ППП.

² Реализуемого в процессе анализа данных и поддержки принятия решений во временных характеристиках машины, а не человека.

Приведем конкретные примеры значимых прикладных областей, где востребованы модели обсуждаемого типа, в частности, – это системы:

- управления крупными информационно-телекоммуникационными структурами (в том числе распределенными центрами обработки данных (ЦОД), большими компьютерными сетями высокопроизводительных вычислений);
- управления объектами энергетики (в том числе атомными электростанциями, сетями передачи электроэнергии национального масштаба);
- АД и ППР в области обороны и безопасности (в частности, это системы предупреждения о ракетном нападении и т.п.).

Рассматривая специфику объектов (и необходимых им средств управления) названных классов, следует прежде всего констатировать отсутствие надежных возможностей для описания системы управления такими объектами инструментами «балансового» или сценарного подходов.

Среди возникающих исследовательских задач представляется уместным особо выделить проблематику *оперативной* идентификации «малых» риск-генерирующих объектов или событий в постоянно пополняемых новой информацией *Big Data*, анализируемых системой управления в процессе АД и ППР. Именно потребность анализировать *Big Data*, укладываясь в жестко ограниченные рамки процессно-реального времени (задаваемого внутренним «хронотопом» операционной деятельности объекта управления), делает, по-видимому, неизбежным применение в этой области подходов, математических моделей и методов, а также алгоритмических и программных конструкций, характерных для искусственного интеллекта как области исследований и разработок. В частности, – это возможность идентификации угроз штатному режиму функционирования объекта управления ещё на ранней стадии его развертывания (когда еще достаточно ресурсов для поддержания *большого* объекта управления на допустимом уровне работоспособности, приемлемом для обеспечения исполнения его функций) – значимой области применения ИИ-моделей и реализующих их компьютерных технологий.

ОСОБЫЙ КЛАСС МОДЕЛЕЙ – ИНТЕРПОЛЯЦИОННО-ЭКСТРАПОЛЯЦИОННЫЕ

Для ответа на представленные выше актуальные вызовы приложений в перечень уже показанных подходов – модели на базе соотношений «балансового» характера и *сценарных* решений – представляется целесообразным включить также модели, которые академик Ю.И. Журавлев предложил называть *интерполяционно-экстраполяционными*. В основе конструкций этого класса моделей лежит простая идея: располагая некоторыми сведениями об «истории» поведения объекта управления (например, описаниями прецедентов как успешных, так и ошибочных управленческих решений, принимавшихся в тех или иных конкретных обстоятельствах, которые часто называют обучающей выборкой прецедентов – примеров и контр-примеров, соответственно), можно сначала *интерполировать* обучающую выборку эмпирическими зависимостями (ЭЗ) того или иного за-

данного вида (регрессионными, логическими и др.), а затем использовать найденные интерполяционные ЭЗ для прогнозирования последствий принимаемых на их основе решений при развитии текущей ситуации на объекте управления, оценивая *экстраполируемость* уже найденных интерполяционных зависимостей с текущей на следующую за принятием конкретного решения ситуацию.

При всей интуитивной очевидности и понятийной простоте *интерполяционно-экстраполяционного (ИЭ)* подхода его применимость в цифровых системах управления обсуждаемого типа требует аккуратного учета целого ряда условий, выполнение которых определяет корректность порождаемых с помощью этого подхода результатов (управляющих воздействий).

Прежде всего, это необходимость «калибровки» ИЭ-модели, «упакованной» в соответствующую систему управления. Речь идет о настройках ИЭ-модели, обеспечивающих адекватность заключений и рекомендаций, получаемых с ее помощью в конкретной предметной области.

Не менее существенна потребность в реализации такого режима «настройки», при котором имелись бы возможности оперировать обучающими выборками различных размеров, в том числе, малыми, постоянно *расширяющимися*, выборками *ограниченного* размера (см. например, задачи диагностического класса, в частности [10]).

Принимая во внимание тот факт, что ответственность за последствия принятых по рекомендации системы управления решений, как правило, возлагается на лицо, принимающее решения (ЛПР), критически значимую роль в приложении ИЭ-схемы играют неформальная *интерпретируемость* и содержательная *объясняемость* (в терминах и понятиях анализируемой предметной области) формируемых на модели выводов и рекомендаций. При этом критически значимая роль отводится возможностям описать средствами используемой ИЭ-модели все существенные *причинно-следственные* связи в накапливаемых данных об исследуемой предметной области.

С точки зрения применяемого математического аппарата формирования эмпирических зависимостей (ЭЗ), это накладывает достаточно жесткие ограничения на их типы, пригодные к использованию: далеко не все из хорошо известных математических формализмов интерполяции обучающей выборки прецедентов способны обеспечить каузальный анализ данных. Необходимость формировать *интерполяционно-экстраполяционные* зависимости *причинно-следственного* типа выдвигает особые требования к дескриптивному и аргументационному возможностям используемого математического аппарата, в том числе к средствам формализованного представления эмпирических зависимостей. (Один из подходов к реализации указанной потребности – это использование так называемой эвристики сходства, активно применяемой в ряде ИИ-подходов и решений; примеры результативных формализаций такой потребности числовыми метриками – метрической или топологической близости – можно найти, в частности, в работах [11–14] и др.); примеры уточнения сходства средствами бинарной алгебраической операции – в работах [15–18] и др.).

При разработке систем управления на базе *ИЭ*-моделей особого внимания требует проблема *устойчивости* формируемых моделей к конкретным расширениям обучающих выборок прецедентов (обусловленная возможностями выявлять *наследуемые* при заданном расширении обучающей выборки прецедентов *зависимости* причинно-следственного характера). Как несложно убедиться, значительное число популярных в настоящее время в интеллектуальном анализе данных и машинном обучении математических техник интерполяции обучающих выборок прецедентов (от байесовского индуктивного вывода и деревьев решений до различных классов регрессий, а также искусственных нейронных сетей) в общем случае не гарантирует наследуемости уже построенной интерполяции заданной обучающей выборки при ее пополнении описаниями новых прецедентов.

Имеется также и ряд дополнительных вопросов, требующих детального изучения в связи использованием *ИЭ*-моделей в системах управления рассматриваемого нами типа. Приведем два примера пока что малоизученных проблем.

Обычная для ИИ-разработок и систем практика выбора и анализа *средств представления знаний* об изучаемой предметной области, адекватных целям исследования и наблюдаемых целевых эффектах предполагает возможность оперировать взаимно согласованными данными и знаниями разных типов (структурированными и неструктурированными, текстовыми и символьными, теоретико-множественными и числовыми). Формально здесь речь идет о возможности оперировать сведениями из различных (как по способам формализованного описания, так и по семантике) информационных пространств. При этом выбор тех или иных языков представления знаний (ЯПЗ) при описании (т. е. своего рода «кодировании» средствами выбранного ЯПЗ) прецедентов одной и той же обучающей выборки заставляет задуматься если не о критериях оптимальности такого выбора, то уж по крайней мере, об анализе устойчивости конечных результатов при варьировании используемых ЯПЗ. (Поучительные примеры возникающих в таком случае эффектов как наследуемости, так и ненаследуемости результатов интеллектуального анализа данных представлены, в частности, в работе [19]).

В практически значимых приложениях чувствительной к использованию процедурной техники *ИЭ*-моделей оказывается проблема *эффективной реорганизации* уже построенной модели при расширении обучающей выборки прецедентов новыми элементами. Возникающие здесь эффекты (см., например, [20]) экспоненциально быстрого роста числа эмпирических зависимостей, порождаемых из линейно быстрорастущей обучающей выборки, в значительном числе актуальных приложений индустриального характера в общем случае попросту исключают возможность реорганизации за разумное время уже построенной *ИЭ*-модели при ее расширении описаниями новых прецедентов.

НЕКОТОРЫЕ СВОЙСТВА И ХАРАКТЕРИСТИКИ ИНТЕРПОЛЯЦИОННО-ЭКСТРАПОЛЯЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ

Одним из вариантов формализации *интерполяционно-экстраполяционной* процедурной схемы формирования моделей анализируемой предметной области для систем управления обсуждаемого класса является математическая техника так называемых характеристических функций (*ChF* - см. подробнее [21] и др.), представляющих собою каузально-ориентированный подкласс семейства частичных функций, интерполирующих выборки прецедентов – примеров и контр-примеров диагностируемого явления (см., например, работы [10,20-22] и др.).

Определение 1.

Характеристическая функция *ChF* – это такое логическое условие (связывающее специальным образом выделяемые элементы описаний прецедентов текущей обучающей выборки – базы фактов **FB**), которое принимает значение:

- «истина» на всех фактах ϕ (примерах) текущей базы фактов **FB**, характеризующих наличием анализируемого целевого свойства (диагностируемого явления);
- «ложь» на всех фактах ϕ (контр-примерах) текущей базы фактов **FB**, характеризующих отсутствием анализируемого целевого свойства:

$$\forall \phi [(\phi \in \mathbf{FB}) \supset (ChF(\mathbf{FB}) \mid - \phi)] \quad (1)$$

Процедура формирования характеристической функции *ChF* по имеющейся базе фактов **FB** задается следующей схемой:

- i. создается формализованное описание прецедентов (например, в виде кортежа значений определенных признаков и др.);
- ii. на формализованных описаниях прецедентов определяется бинарная (идемпотентная, симметричная и ассоциативная [23]) операция сходства $\otimes$. (Для теоретико-множественной параметризации, т.е. описания прецедентов множествами признаков, принимающих соответствующие значения, это может быть, в частности, операция $\cap$ пересечения множеств);
- iii. отношение сходства прецедентов определяется по непустому результату вычисления операции их сходства: два прецедента сходны, если результат применения операции $\otimes$ к их описаниям не является пустым объектом $\varnothing$;
- iv. для каждого прецедента O из множества **FB** класс сходства $T(O)$ всех сходных с ним прецедентов из **FB** формируется объединением в $T(O)$ всех сходных с O (в смысле отношения сходства из п. iii) элементов множества **FB**;
- v. классы эквивалентности прецедентов порождаются из каждого из найденных ранее классов сходства $T(O)$ выделением всех подклассов, каждый из которых задается фиксированным непустым результатом вычисления сходства $\otimes$ исходных прецедентов из **FB**. При этом по каждому отношению эквивалентности, задаваемому каким-либо непустым результатом V вычисления операции сходства $\otimes$, исходное множество прецедентов (соответствующего знака –

примеров или контр-примеров) **FB** разбивается на один большой класс эквивалентности $E_V(\mathbf{FB})$, сформированный всеми содержащими данное V прецедентами (соответствующего знака) из **FB**, а вместе с ним и соответствующим числом одноэлементных классов, сформированных всеми невошедшими в $E_V(\mathbf{FB})$ прецедентами (соответствующего знака) из **FB**;

vi. сформированные классы сходства и классы эквивалентности распадаются на две части – те, что построены на примерах, и те, что построены на контр-примерах;

vii. специальное условие *Запрета на контр-примеры* (ЗКП) требует, чтобы ни один из примеров класса α (где $\alpha \in \{+, -\}$, т. е. для $\alpha = +$ – это примеры, а для $\alpha = -$ – это контр-примеры из исходного множества прецедентов), не вкладывался бы ни в один из классов эквивалентности, сформированных на контр-примерах противоположного знака $-\alpha$;

viii. классы сходства (построенные на примерах, где $\alpha = +$), для которых выполнено условие ЗКП, используются для формирования покрытия всего исходного множества прецедентов (примеров и контр-примеров), и если таковое существует, то по нему (взятием дизъюнкции по всем формирующим это покрытие классам сходства конъюнкций тех значений признаков, которые – как результат вычисления операции $\otimes$ – формируют каждый из таких классов сходства) и строится соответствующая характеристическая функция ChF . Каждое полученное таким способом дизъюнктивно-конъюнктивное логическое условие и представляет собою (как показано в работе [21]) характеристическую функцию ChF , сопоставляемую имеющейся коллекции прецедентов обучающей выборки (базы фактов **FB**) и принимающую истинностные значения:

- «истина» – тогда и только тогда, когда данный факт характеризуется наличием анализируемого целевого свойства;

- «ложь» – тогда и только тогда, когда данный факт характеризуется отсутствием анализируемого целевого свойства,

и наоборот (см., например, **Утверждение 2** в работе [21]):

- на каждом факте ϕ из текущей **FB**, характеризуемом наличием анализируемого целевого свойства, характеристическая функция $ChF_i(\mathbf{FB})$ принимает значение «истина», а значение «ложь» – тогда и только тогда, когда данный факт характеризуется отсутствием анализируемого целевого свойства.

Итак, формируемая на обучающей выборке **FB** модель *интерполяционно-экстраполяционного* типа представляет собою множество $ChF(\mathbf{FB})$ всех порождаемых из неё представленным выше способом характеристических функций $ChF(\mathbf{FB})$ – частично-определенных (заданных на прецедентах из **FB**) логических условий, позволяющих интерполировать текущую выборку **FB** эмпирическими зависимостями (ЭЗ) причинно-следственного типа. Каждая из таких функций и представляет собой соответствующую ЭЗ. При этом существенно, что из каждого множества $ChF(\mathbf{FB})$ можно сформировать (отбрасыванием «лишних» экземпляров $ChF(\mathbf{FB})$), по крайней мере, одно

несократимое подмножество, тем не менее сохраняющее выполнимость условия (1) из **Определения 1**.

Обсудим три полезных свойства *ИЭ*-моделей, формируемых средствами характеристических функций. Непустота множества $ChF(\mathbf{FB})$ порождаемых на текущей базе фактов **FB** характеристических функций ChF может рассматриваться как своего рода «индикатор» *каузальной репрезентативности* анализируемой **FB**. Фактически, это «сигнал» о достаточности накопленных в текущей **FB** описаний прецедентов для *каузально* корректного (обеспечиваемого выполнимостью условия запрета на контр-примеры – см. выше) разделения примеров и контр-примеров и, как следствие, о возможности их использования (как корректно сформированной обучающей выборки) для «диагностики» новых (ранее еще неизученных) прецедентов. Таким образом, в этом случае обеспечивается корректность *ИЭ*-подхода: демонстрируются неоспариваемые (на текущей обучающей выборке – !) интерполяционные эмпирические зависимости *каузального* характера, которые могут быть задействованы в процедуре проверки их экстраполируемости на описания новых прецедентов с учётом сведений о *причинах* возникновения исследуемого целевого эффекта, полученных в ходе ChF -анализа имеющихся в **FB** данных.

Можно показать (см., в частности [24]), что имеют место следующие Утверждения:

Утверждение 1. Задача о непустоте множества $ChF(\mathbf{FB})$ характеристических функций, порождаемых на текущей базе фактов **FB**, принадлежит к классу P полиномиально быстро разрешимых комбинаторных проблем.

Утверждение 2. Задача о непустоте множества $ChF(\mathbf{FB})|_{O^t}$ характеристических функций, порождаемых на текущей базе фактов **FB** и обращающихся в *истину* на заданном вновь диагностируемом прецеденте O^t , принадлежит к классу P полиномиально быстро разрешимых комбинаторных проблем.

Таким образом, возможности корректного формирования на заданной обучающей выборке **FB** *интерполяционно-экстраполяционной* модели $ChF(\mathbf{FB})$, обеспечивающей при этом корректную «диагностику» новой управленческой ситуации O^t , могут быть эффективно реализованы в рамках приемлемых вычислительных ресурсов (полиномиально-сложными вычислениями).

Еще одна чувствительная для приложений группа характеристик *ИЭ*-моделей – это эффекты наследственности эмпирических зависимостей при расширении обучающей выборки **FB** (т. е. оценка возможностей доопределить ранее уже порожденные на исходной выборке характеристические функции также и на ее заданном расширении $\mathbf{FB} \cup \Delta\mathbf{FB}$ без изменения значений, которые принимаются на прецедентах из **FB**).

Здесь установлено (см., в частности, [20,24,25] и др.), что, невзирая на те обстоятельства, что в общем случае:

- емкость множеств $ChF(\mathbf{FB})$ и $ChF(\mathbf{FB} \cup \Delta\mathbf{FB})$ может расти экспоненциально быстро вместе с полиномиально быстро растущими размерами множеств **FB** и $\Delta\mathbf{FB}$ и при этом

• в $ChF(FB)$ и $ChF(FB \cup \Delta FB)$ может не оказаться ни одной общей (получаемой доопределением $ChF(FB)$ на вновь заданных прецедентах из ΔFB) характеристической функции $ChF_{mut}(FB)$,

все же справедливо:

Утверждение 3. Задача о непустоте множества $ChF(FB \Rightarrow FB \cup \Delta FB)$ характеристических функций, порождаемых на текущей выборке FB и наследуемых на ее заданное расширение $FB \cup \Delta FB$, принадлежит к классу P полиномиально быстро разрешимых комбинаторных проблем.

Третий из обозначенных здесь классов актуальных задач – это оценка возможностей эффективно реорганизовать уже сформированную ИЭ-модель при заданном расширении лежащей в ее основе обучающей выборки. В самом общем виде проблема здесь в том, что емкость множества $ChF(FB)$ формирующих эту модель эмпирических зависимостей в общем случае может расти экспоненциально быстро вместе с линейным ростом объема порождающей ее обучающей выборки FB . Так, в частности, имеет место (см., например, [20, 22] и др.):

Утверждение 4. Задача о емкости (числе элементов) множества $ChF(FB)$ принадлежит к классу $\#PC$ перечислительно полных комбинаторных проблем.

Итак, в общем случае число элементов в множестве $ChF(FB)$ может оказаться экспоненциально велико по отношению к числу прецедентов в исходной обучающей выборке FB , т. е. при расширении этой выборки заданным множеством ΔFB новых прецедентов следует быть готовым к порождению следующего числа новых эмпирических зависимостей:

$$\sum_{ChF} (FB \cup \Delta FB) = O(2^{(|FB \cup \Delta FB|)}) = C \times 2^{(|FB \cup \Delta FB|)},$$

где $|U|$ – это число элементов множества U , а C – некоторая константа.

Таким образом, прямая поэлементная реорганизация модели $ChF(FB)$ в модель $ChF(FB \cup \Delta FB)$ при достаточно больших обучающих выборках становится практически неподъемной задачей из-за объемов необходимых для этого вычислений.

Тем не менее, здесь открываются некоторые интересные возможности, если воспользоваться естественным образом формирующейся внутренней структурой множества $ChF(FB)$. Порождающие его классы эквивалентности прецедентов могут быть упорядочены по взаимной вложимости формирующих каждый из этих классов подмножеств прецедентов из выборки FB . При этом существенную роль в идентификации несократимых подмножеств множества $ChF(FB)$, сохраняющих выполнимость условия (1) из **Определения 1**, играют границы (верхняя и нижняя) диаграммы взаимной вложимости подмножеств прецедентов, порождающих такие классы эквивалентности. Это обусловлено возможностями полиномиально быстро восстановить обе указанные границы даже для экспоненциально большого множества всех порождаемых из выборки FB эмпирических зависимостей $ChF(FB)$.

Не меньшего внимания заслуживает и оценка возможности проведения *эффективной* (выполняемой полиномиально сложными вычислениями) *про-*

верки экстраполируемости на новую ситуацию O^* управленческих решений (интерполяционных эмпирических зависимостей $ChF(FB)$), найденных при интерполяции обучающей выборки FB и последующей *реорганизации* заданной ИЭ-модели на заданном расширении ΔFB исходной выборки FB , сохраняя при этом корректное расширение/наследование таких $ChF(FB)$ с FB на $FB \cup \Delta FB$. Здесь также, несмотря на в общем случае *экспоненциально* быстро растущую емкость соответствующих множеств характеристических функций, для случая теоретико-множественной параметризации описаний прецедентов обучающих выборок (т.е. представления каждого из прецедентов в виде подмножества признаков из некоторого общего множества U) возможности положительно ответить на подобный вопрос дает выводимое из **Утверждения 2**.

Следствие 1. Задача о поиске наследуемого с FB на $FB \cup \Delta FB$ управляющего воздействия (характеристической функции), обеспечивающего экстраполируемость на заданную новую ситуацию (прецедент) одновременно и некоторой эмпирической зависимости (управленческого решения) $ChF(FB)$, и ее продолжения $ChF(FB \cup \Delta FB)$ на заданное расширение $FB \cup \Delta FB$ исходной обучающей выборки FB , принадлежит к классу P полиномиально быстро разрешимых комбинаторных проблем.

О МЕСТЕ ПОДХОДОВ И РЕШЕНИЙ ИЗ ОБЛАСТИ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В СОВРЕМЕННЫХ СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ

Итак, в настоящей статье представлен ряд новых требований к современным цифровым системам управления, отвечающих на актуальные вызовы приложений и отражающих современный уровень развития науки и технологий. Это, в частности, работа с динамически изменяемыми большими данными (*Big Data*), анализ данных и поддержка принятия решений при жестких ограничениях процессно-реального времени, отсутствие возможности увидеть и заранее проанализировать все потенциально реализуемые ситуации вида *состояние* $\Rightarrow$ *решение* в пространстве «поведения» объекта управления и др. Все это – объективные аргументы, указывающие на востребованность ИИ-подходов и решений в современных системах управления крупными технологическими комплексами.

Сегодня уже вряд ли удастся оспорить роль технологий искусственного интеллекта в оптимизации и поддержании наиболее рациональных условий взаимодействия компонентов сложных технологических процессов в крупных промышленных структурах. Одна только оптимизация «транзакционных» издержек в технологических цепочках и процессах (идентификация, например, в процессе обучения на опыте различных «настроек» взаимодействующих компонентов оборудования, а также «машинный» контроль «нахождения» значимых параметров таких «настроек» в заданных допустимых интервалах и т.п.) дает предприятиям суммарный выигрыш в эффективности, измеряемый в единицах процентов (что в абсолютных значениях составляет весьма внушительные

суммы). Управленческие решения на базе ИИ-технологий, например, там, где (как, в частности, в системах управления атомными электростанциями) нет возможности заранее описать все зависимости типа *состояние => решение*, могут формироваться, в том числе, и в процессе интеллектуального анализа данных, и в процессе машинного обучения на прецедентах, идентифицируя лучшие управленческие практики и оптимизируя конкретные управленческие решения в сложных производственных ситуациях.

Особая роль в системах управления большими объектами комплексного характера отводится подходам и моделям, позволяющим оперировать в открытых, постоянно пополняемых новой информацией (в том числе – ранее не встречавшегося характера) «мирах» *Big Data*. Сегодня трудно не согласиться, что в анализе данных и поддержке принятия управленческих решений, опирающихся на динамически меняющиеся *Big Data* и принимаемых в режиме жестких ограничений по времени, вряд ли удастся обойтись без применения методов и технологий искусственного интеллекта.

Наконец, при поиске решений для классических управленческих моделей «балансового» характера все более актуальна потребность в «быстром» (т.е. позволяющем обойтись без длительных и массивных компьютерных расчетов) порождении *приближенных* решений, остающихся при этом по их «точности» в рамках заданных ограничений. Здесь накопленный в ИИ-исследованиях и разработках опыт компьютерной формализации результативных эвристик, используемых экспертами при решении соответствующих классов трудных задач, открывает нестандартные пути повышения эффективности систем управления крупными индустриальными структурами. Однако это уже предмет отдельного детального обсуждения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Микеров А. Первые регуляторы паровых машин // Control Engineering Россия. – 2014. – № 4(52). – С. 108-111. – URL: <https://controleng.ru/wp-content/uploads/52108.pdf>
- Двигатели внутреннего сгорания. Теория рабочих процессов поршневых и комбинированных двигателей / под ред. А.С. Орлина, Д.Н. Вырубова. – Москва: Машиностроение, 1971. – 400 с.
- Белов М.П., Новиков В.А., Рассудов Л.Н. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов. – Москва: ИЦ «Академия», 2007. – 575 с.
- Максвелл Д.К., Вышнеградский И.А., Стодола А. Теория автоматического регулирования (линеаризованные задачи). – Москва: АН СССР, 1949. – 432 с.
- Бровкин А.Г., Кравец В.Г. Автоматическая посадка беспилотного многоразового орбитального корабля «Буран» // Космическая техника и технологии. – 2014. – № 1(4). – С. 75-85. – URL: <https://www.energia.ru/ktt/archive/2014/01-2014/01-09.pdf>
- Severe Accident Management Programmes for Nuclear Power Plants. – Vienna: IAEA. – 2009. – xii + 66 p. – URL: https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1376_web.pdf
- Поспелов Д.А. Логико-лингвистические модели в системах управления. – Москва: Энергоиздат, 1981. – 232 с.
- Поспелов Д.А. Ситуационное управление: теория и практика. – Москва: Наука, 1986. – 288 с.
- Поспелов Д.А. Моделирование рассуждений. Опыт анализа мыслительных актов. – Москва: Радио и связь, 1989. – 184 с. – URL: https://www.computer-museum.ru/books/Pospelov_modras.pdf
- Забежайло М.И., Трунин Ю.Ю. К проблеме доказательности медицинского диагноза: интеллектуальный анализ данных о пациентах в выборках ограниченного размера // Научно-техническая информация. Сер. 2. – 2019. – № 12. – С. 12-18; Zabezhaiko M.I., Trunin Yu.Yu. On the Problem of Medical Diagnostic Evidence: Intelligent Analysis of Empirical Data on Patients in Samples of Limited Size // Automatic Documentation and Mathematical Linguistics. – 2019. – Vol. 53, № 6. – P. 322-328.
- Журавлев Ю.И. Об алгебраическом подходе к решению задач распознавания и классификации // Проблемы кибернетики. Вып. 33. – Москва: Наука, 1978. – С. 5-68.
- Рудаков К.В. Об алгебраической теории универсальных и локальных ограничений для задач классификации // Распознавание, классификация, прогноз. – Москва: Наука, 1989. – С. 176-201.
- Журавлев Ю.И. Корректные алгебры над множествами некорректных (эвристических) алгоритмов. Т. I-III // Кибернетика. – 1977. – № 4. – С. 5-17; Там же. – № 6. – С. 21-27; Там же. – 1978. – № 2. – С. 35-43.
- Рудаков К.В. Полнота и универсальные ограничения в проблеме коррекции эвристических алгоритмов классификации // Кибернетика. – 1987. – № 3. – С. 106-109.
- Финн В.К. Индуктивные методы Д.С. Милля в системах ИИ // ИИ и принятие решений. Часть I. – 2010. – №3. – С. 3-21; Часть II // Там же. – 2010. – № 4. – С. 14-40.
- Финн В.К. Искусственный интеллект (методология, применения, философия). Изд. 2-е, испр. и доп. – Москва: ЛЕНАНД, 2021
- Финн В.К. Об интеллектуальном анализе данных // Новости искусственного интеллекта. – 2004. – № 3. – С.3-18.
- Забежайло М.И. К вопросу о достаточности оснований для принятия результатов интеллектуального анализа данных средствами ДСМ-метода // Научно-техническая информация. Сер. 2. – 2015. – № 1. – С. 1-9; Zabezhaiko M.I. On the Sufficiency of the Grounds for Accepting the Results of Data Mining Using the JSM Method // Automatic Documentation and Mathematical Linguistics. – 2015. – Vol. 49, № 1. – P. 1-9.

19. Забейхайло М.И. Устойчивость эмпирических зависимостей и проблема объяснения результатов интеллектуального анализа данных // Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте. Сборник научных трудов XI Международной научно-практической конференции (ИММВ-2022, Коломна, 16-19 мая 2022 г.). В 2-х томах. Т. 2. – Москва: РАИИ, 2022. – С. 50-59.
20. Забейхайло М.И. О емкости семейств характеристических функций, обеспечивающих корректное решение диагностических задач // Искусственный интеллект и принятие решений. – 2021. – № 2. – С. 44-54.
21. Грушо А.А., Забейхайло М.И., Тимонина Е.Е. О каузальной репрезентативности обучающих выборок прецедентов в задачах диагностического типа // Информатика и ее применения. – 2020. – № 1. – С. 80-86.
22. Забейхайло М.И. О емкости семейств характеристических функций, обеспечивающих корректное решение задач диагностического типа // Тезисы докладов 19-й Всероссийской конференции «Математические методы распознавания образов» (ММРО-2019, 25-28 октября 2019 г. Москва). – Москва: РАН, 2019. – С. 305-306.
23. Кон П.М. Универсальная алгебра. – Москва: Мир, 1968. – 359 с.
24. Забейхайло М.И. О некоторых оценках сложности вычислений при прогнозировании свойств новых объектов средствами характеристических функций // Научно-техническая информация. Сер. 2. – 2020. – № 12. – С. 1-8; Zabezhailo M.I. Some Estimates of Computational Complexity When Predicting the Properties of New Objects Using Characteristic Functions // Automatic Documentation and Mathematical Linguistics. – 2020. – Vol. 54, № 6. – P. 298-305.
25. Забейхайло М.И. О наследуемости диагностических заключений при пополнении обучающей выборки новыми эмпирическими данными // Тезисы докладов 13-й Международной конференции «Интеллектуализация обработки информации» (ИОИ-2020, Москва, 8-11 декабря, 2020 г.). – Москва: РАН, 2020. – С. 10-15.

Материал поступил в редакцию 03.08.22.

Сведения об авторе

ЗАБЕЖАЙЛО Михаил Иванович – доктор физико-математических наук, заведующий отделом Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» РАН, Москва
e-mail: m.zabezhailo@yandex.ru

АВТОМАТИЗАЦИЯ ОБРАБОТКИ ТЕКСТА

УДК 004.91:004.822:629.7

Ю.И. Бутенко, М.Л. Галетка, Е.Е. Синева

Создание системы разметки семантических ролей в научно-технических текстах по авиации и космонавтике

Рассматривается проблема автоматического семантического анализа в системах обработки естественного языка. Показано, что разметка семантических ролей является перспективным методом анализа, который заключается в распознавании предикатно-аргументных структур в каждом предложении. Описана разработанная программа для разметки семантических ролей в текстах на русском языке – размечено 2000 лексических единиц на примерах из текстов по авиации и космонавтике. Сформирован уникальный инвентарь семантических ролей для авиакосмической предметной области. В качестве модели представления знаний для упорядочивания размеченных семантических ролей предлагается метод фрейм-модели семантики и онтологический подход к организации фреймов в базе знаний.

Ключевые слова: семантический анализ, фрейм, корпус, разметка, семантические роли, обработка естественного языка

DOI: 10.36535/0548-0027-2022-10-4

ВВЕДЕНИЕ

Стремительное развитие вычислительной техники и информационных технологий стимулировало появление систем искусственного интеллекта, способных имитировать и анализировать поведение человека. С созданием подобных систем возникла потребность в поддержании диалога между человеком и компьютером. Эта задача на сегодняшний день решена лишь отчасти, и компьютерная лингвистика продолжает исследовать методы и алгоритмы для её реализации. В настоящее время компьютер может анализировать тексты, в частности, извлекать из них данные, факты и сведения, необходимые для решения различных практических задач при проектировании систем машинного перевода, алгоритмов информационного поиска, голосового управления и распознавания речи, а также вопросно-ответных систем. Формализация семантики стала одной из основных проблем машинного анализа и синтеза текста. В компьютерной лингвистике под семантикой понимается область обработки естественного языка, связанная с извлечением смысла из текста и генерацией предложений на естественном языке. На сегодняшний день системы обработки естественного языка успешно справляются с анализом морфологии и синтаксиса русского языка, однако автоматический семантический анализ

текста является новой и ещё детально неизученной областью компьютерной лингвистики, которая фокусируется на использовании автоматизированных методов для извлечения большого количества информации из текстовых документов. Типичные задачи семантического анализа текста – это: категоризация и кластеризация текстовых данных, извлечение понятий, сущностей и фактов из текстов, создание таксономий и онтологий предметных областей, анализ тональности текста, аннотирование и реферирование документов и многие другие. Система автоматического семантического анализа должна извлекать правильный смысл из текстов и параллельно решать проблемы лексической многозначности. Такой тип анализа включает выделение гипонимов и гиперонимов, снятие омонимии и полисемии, определение синонимов и антонимов. Путём семантического анализа можно осуществлять классификацию документов на основе их содержания по заранее определенным критериям. С использованием семантической обработки можно проводить контент-анализ и анализ тональности, который выявляет эмоциональную окрашенность текста. Например, определение тональности комментариев о каких-либо продуктах в социальных сетях позволяет получать представление о том, как клиенты относятся к конкретной компании, идеи, бренду, а также вы-

являть недовольных клиентов в режиме реального времени [1-2]. Решение задачи по формализации семантики можно свести к семантико-синтаксической разметке текста, которая заключается в определении структур «предикат-аргумент» в каждом предложении на основе падежной грамматики американского лингвиста Ч. Филлмора. Результатом такой разметки является обучающий набор данных, содержащий семантическую информацию о размеченных текстах. Современные системы, основанные на методах глубокого машинного обучения, используют семантически размеченные наборы обучающих данных для анализа смысла текста. Несмотря на успех в экспериментальных исследованиях, применение методов разметки семантических ролей по-прежнему затруднено в отечественной компьютерной лингвистике из-за отсутствия релевантных обучающих данных для русского языка.

Актуальность настоящей статьи связана с отсутствием инструментов для разметки семантических ролей в тестах, а, следовательно, и с недостаточным количеством семантически размеченных данных для создания систем автоматической обработки текстов на русском языке. Машинный семантический анализ является одним из наименее развитых направлений в области отечественной компьютерной лингвистики, но при этом имеет большое прикладное значение в разработке лингвистических приложений и систем искусственного интеллекта. Таким образом, цель нашей работы заключается в разработке системы разметки семантических ролей в текстах по авиации и космонавтике, а также формировании инвентаря семантических ролей на основе размеченных данных. Созданная программа позволит собрать данные для обучения алгоритмов автоматической обработки текстов на русском языке.

ТЕОРИЯ СЕМАНТИЧЕСКИХ РОЛЕЙ

Разметка семантических ролей, в англоязычной литературе известная под термином «*Semantic Role Labeling*» (SRL), представляет собой метод анализа семантики, получивший распространение в западной лингвистике, но менее развитый в трудах отечественных ученых [3]. Этот метод, основанный американским лингвистом Ч. Филлмором, позволяет решать задачу неглубокого семантического разбора текста. Цель такого анализа – распознавание структуры «предикат-аргумент» для каждого глагола в предложении, например, с помощью семантической разметки можно формально обозначить сцену какого-либо события: кто производил действие, на кого оно было направлено, где оно происходило и так далее. В частности, теория семантических ролей стремится определить аргументы (актанты) и обозначить их отношения с предикатом – ядром семантической конструкции, которым чаще всего является глагол. В силу своего значения глагол присоединяет к себе различных участников ситуации. Например, в предложении «Я купил пару туфель», слово «купил» идентифицирует наступление коммерческого события, где «я» и «пара обуви» – это объекты, играющие роли покупателя и товара соответственно, и глагол

«покупать» подразумевает наличие обоих объектов, иначе предложение потеряет смысл. Разметка семантических ролей – это важный метод получения информации, который можно использовать для решения широкого круга задач в области обработки текстов на естественном языке [3-4].

Пример размеченного предложения:

[Летчик агент] **пилотировал** [самолёт объект] [боковой ручкой управления инструмент].

Данный тип разметки заключается в выявлении предикатов, обозначающих ситуацию, предикатных аргументов, обозначающих участников, связанных с ситуацией, и приписывании аргументам их семантических ролей по отношению к предикату. Не существует общепринятого набора семантических ролей, однако известен набор часто встречающихся ролей, которые так или иначе представлены в большинстве семантических теорий [5-7]. Этот набор включает следующие семантические роли:

- а) агентив – падеж инициатора действия;
- б) датив – субъект, на которого влияет действие;
- в) инструменталис – падеж, указывающий на объект, с помощью которого выполняется действие;
- г) локатив – место, где произошло событие, выраженное глаголом;
- д) фактитив – падеж, указывающий на результат действия;
- е) объектив – падеж, обозначающий любые другие предметы, затронутые действием или состоянием, обозначенным глаголом.

Ч. Филлмор считал, что базовым компонентом грамматической теории является глубинная семантическая структура. Некоторые исследователи, поддерживающие его теорию, представили собственные концепции этой теории и значительно расширили количество семантических падежей. Например, Ю.Д. Апресян [6] выделил 25 семантических функций: *субъект, контрагент, глава, объект, содержание, адресат, получатель, посредник, источник, локатив, начальная точка, конечная точка, маршрут, средство, инструмент, способ, условие, причина, мотивировка, результат, цель, аспект, количество, срок, время*. Интересной концепцией является также разработка классификации семантических аргументов В.В. Богданова, выделяющего 16 падежей, в числе которых есть обязательные (основные) семантические роли: *агенса, пациенс, адресат, бенефициант, комплемент, инструмент, средство, место* [8]. Падежной грамматике соответствует также реляционная структура И.П. Сусова [9], который выделяет всего три релятемы: *начальная точка отношения, косвенный участник отношения, а также предмет, на который направлено это отношение*. Различия в теориях заключаются в основном в количестве падежей и их интерпретации. Различными исследователями выделены следующие наиболее общие и существенные падежи: *агенса, пациенс, локатив, инструмент, адресат*.

Важная особенность семантических ролей, отличающая их от синтаксических отношений, заключается в том, что они представляют собой внеязыковые понятия. Набор семантических ролей и их количество зависят от предметной области, а также от способов их практического применения в решении задач

компьютерной лингвистики. Сегодня активно исследуются алгоритмы, которые могли бы анализировать размеченные данные и автоматически определять семантическую структуру предложения [4, 10]. Основной подход к решению этой проблемы заключается в использовании контролируемых методов машинного обучения и автоматической классификации размеченных семантических ролей. Этот подход детально рассмотрен в работе [11] и развит во многих других трудах, в которых был расширен набор аргументов и применены различные методы машинного обучения к решению задачи автоматической разметки и классификации семантических ролей [12].

Разметка семантических ролей в качестве метода обработки текстов на естественном языке, известная также как поверхностный семантический анализ, была впервые представлена Д. Гилдеа и Д. Джурафски [13]. С внедрением глубокого машинного обучения их последователями был предложен ряд нейронных моделей SRL, например, в статье [14] представлено применение сверточных нейронных сетей для формирования алгоритма разметки. Большая часть работ представляет контролируемые методы разметки, но существует и большинство полуконтролируемых алгоритмов, которые обучаются на небольшом наборе размеченных данных. Несмотря на то, что эта проблема считается хорошо изученной для многих языков, в частности для английского, развитие данной теории для русского языка идет относительно медленно. Существует несколько исследовательских групп, работающих над этой задачей [15, 16], однако результаты оценки работы и эффективности подобных SRL-систем не опубликованы. Одна из основных причин этого заключается в отсутствии семантически размеченных данных для обучения и объективной оценки таких систем для текстов на русском языке. Несмотря на то, что отечественный проект *FrameBank* [17] решает эту проблему, он все еще находится в разработке и его данные пока не могут быть использованы в машинном обучении. Более того, разметка этого корпуса не может быть использован при разработке систем семантического анализа в медицине, авиации, военном деле и других предметных областях, так как для каждой из них необходимо создавать уникальный набор семантических падежей для обеспечения корректной работы систем, связанных с извлечением смысла из текста.

В целом, задачу разметки семантических ролей можно разделить на четыре подзадачи: обнаружение предикатов, разрешение лексической многозначности предикатов, идентификация аргументов и их классификация. Подготовка подобных наборов данных, которые обычно размечаются экспертами вручную, занимает много времени. Недостаточное количество примеров, иллюстрирующих разнообразие русского языка, – одна из проблем, по которой системы для автоматической разметки семантических ролей успешны в экспериментальных условиях, но пока не могут быть широко использованы в практических приложениях. Другая проблема – это недостаток обучающих данных для текстов различных стилей и жанров, поскольку обученные системы должны быть адаптиро-

ваны к жанрово-стилевым особенностям конкретных документов, которые они будут анализировать. Эти две проблемы существуют для английского языка, но еще более они выражены для других языков, для которых разработано небольшое количество ресурсов с размеченными семантическими ролями, т.е. лексических баз знаний и аннотированных корпусов.

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ДЛЯ РАЗМЕТКИ СЕМАНТИЧЕСКИХ РОЛЕЙ

В рамках настоящего исследования была разработана программа для разметки семантических ролей в текстах по авиации и космонавтике. В результате такой разметки можно получить лингвистический корпус – коллекцию семантически размеченных текстов по авиакосмическому приборостроению. Концепция программы, представленная на рис. 1, заключается в том, что все размеченные аргументы прикрепляются к глаголу, с которым они связаны семантически. Далее формируется инвентарь возможных аргументов, которые могут присоединять к себе определенные глаголы. В этом случае количество семантических ролей значительно увеличится, что позволит на их основе обучить систему генерировать предложения на естественном языке.

Программа реализована на языке *Python 3.8+*, а ее интерфейс – на *QT* в соответствии с представленной концепцией, и позволяет создавать слой семантической разметки для любого загруженного текста путем разметки предложений по семантическим ролям. В процессе работы доступен режим просмотра разметки на основе общей базы данных. Программа реализована в двух разных режимах: анализа и навигации. Режим анализа используется для самой разметки, а режим навигации включает в себя модуль статистического анализа и предоставляет следующую информацию о размеченных данных – количество: размеченных слов, лексем (начальных форм слова), словосочетаний (в том числе, многокомпонентных терминологических словосочетаний), предложений, а также связей предиката с различными аргументами и полученных в результате разметки семантических ролей.

В режиме навигации предоставляется доступ ко всем размеченным данным в форме нескольких взаимосвязанных таблиц, которые содержат некоторые статистические данные о размеченных предикатах и аргументах. Так, раздел «Статистика» представляет собой основную таблицу, в которой можно посмотреть информацию о содержимом базы данных и перейти к другим таблицам, между которыми имеются аналогичные переходы, которые осуществляются через кнопки, содержащие названия самих таблиц. При нажатии на каждую из таких кнопок формируется новая структура согласно типу кнопки и выделенным элементам таблицы. Например, при выделении двух предложений в таблице «Предложения» и нажатии на кнопку «Слова» сформируется таблица слов, которые входят в каждое из выделенных предложений. Кнопка «Начальная форма» выведет все размеченные лексемы, все начальные формы слов, хранящихся в базе данных и так далее.

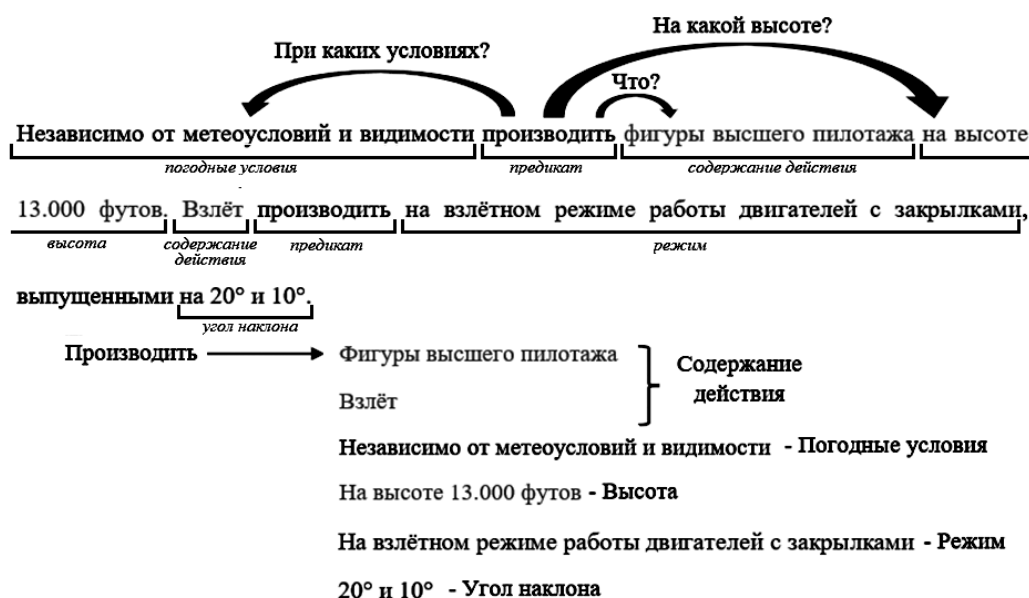


Рис.1. Концепция программы для разметки семантических ролей в текстах по авиации и космонавтике

Разработанная программа автоматически осуществляет лемматизацию (приведение всех размеченных слов к начальной форме) и определяет часть речи. Таким образом, выполняются элементы морфологического анализа для предоставления более подробной информации о размеченных лексических единицах, которая также содержится во взаимосвязанных таблицах. Возможные запросы к базе данных – получить:

- 1) все лексемы или терминологические словосочетания, реализованные в одной семантической роли;
- 2) все возможные пары «предикат-аргумент» с выбранным предикатом или аргументом;
- 3) все предложения, в которых встречается выбранная семантическая роль, слово или словосочетание;
- 4) список всех семантических ролей, в которых реализуется выбранное слово или словосочетание и др.

В ходе такого анализа можно получать неограниченное количество баз данных с текстами для разметки. Предметная направленность текста не влияет на качество разметки, поэтому в программе можно создать несколько баз данных для различных областей знания. В таком случае перед началом разметки из списка необходимо удалить некоторые семантические роли, автоматически загруженные в программу для разметки текстов по авиации и космонавтике и характерные только для данной предметной области.

ИНВЕНТАРЬ СЕМАНТИЧЕСКИХ РОЛЕЙ ДЛЯ АВИАКОСМИЧЕСКОЙ ПРЕДМЕТНОЙ ОБЛАСТИ

В результате разметки текстов для каждого предиката могут быть получены списки типичных аргументов, которые к нему присоединяются. Таким образом формируется база данных, содержащая большое количество возможных конструкций «предикат-аргумент» для русского языка. Вновь поступившие в систему предложения могут размечаться автоматически на основе ранее размеченных путем статистического ана-

лиза паттернов в корпусе, при этом нерелевантные аргументы предиката отсекаются (например, сирконстанты, описывающие обстоятельства действия). Далее выполняется классификация актантов для вновь поступившего предложения, где каждому актанту приписывается семантическая роль в соответствии с набором ролей для данного предиката на основе статистических данных из размеченного корпуса.

Отсутствие достаточного количества размеченных данных – это серьезное препятствие в обучении систем автоматической обработки естественного языка, предназначенных для извлечения смысла из текста. Если для английского языка разработано некоторое количество ресурсов для разметки и обучения алгоритмов [13-15], то в отечественной лингвистике разметка семантических ролей не получила активного развития.

Английский язык, характеризующийся аналитическим строем и фиксированным порядком слов, разметке и обучению поддается лучше, чем русский язык со свободным порядком слов и ярко выраженной флексией (изменением окончаний слов при склонении или спряжении). В связи с отсутствием необходимого количества обучающих данных для различных предметных областей, одна из основных задач настоящей работы заключается в семантической разметке текстов по авиации и космонавтике, а также в обработке размеченных данных. Анализ текстов по авиакосмическому приборостроению включал следующие основные этапы:

Формирование банка предложений. Для разметки были отобраны материалы, обеспечивающие репрезентативность обучающих данных:

- 1) учебно-методическая литература для студентов технических специальностей;
- 2) руководства по эксплуатации технических средств;
- 3) научные статьи, опубликованные в специализированных научно-технических журналах;

4) стандарты (отраслевая нормативная документация).

Анализ проводился на основе сплошной выборки из генеральной совокупности всех отобранных текстов. Примеры предложений, вошедших в выборку:

- *В случае необходимости разрешается посадка после взлёта с максимальной взлётной массой;*
- *Прогрев двигателей разрешается выполнять в процессе руления;*
- *Развороты допускаются на высоте не менее 150 м с углом крена не более 15°;*
- *Выравнивание начинать на высоте 10 м;*
- *Проверить сигнализацию шасси» и другие.*

Разметка предложений. В процессе разметки сначала выделялся предикат, а затем остальные семантические роли, зависящие от его значения. Все размеченные пары «предикат-аргумент» сохранялись в базу данных, через которую затем осуществлялся доступ к размеченным данным для их последующего анализа. Программа предоставила статистическую информацию о входящих лексических единицах и их семантических ролях.

Формирование инвентаря семантических ролей. В ходе анализа было размечено 2 тыс. лексических единиц, и по итогам разметки сформирован представленный в табл. 1 инвентарь семантических ролей для предметной области «Авиация и космонавтика».

Таблица 1

Инвентарь семантических ролей по авиации и космонавтике

№ п/п	Семантическая роль	Описание	Пример
1	Предикат	Глагол как ядро семантической конструкции; в силу своего значения присоединяет к себе все остальные актанты.	<i>Разрешается вывод самолёта на посадочную прямую с использованием рукоятки. Вираз с креном до 45° выполнять на скорости по прибору 400 км/ч.</i>
2	Агент	Одушевлённый участник ситуации, являющийся инициатором события.	<i>Взлёт выполняет командир ВС или, по указанию командира ВС, второй пилот.</i>
3	Объект	Неодушевленный участник ситуации, на которого направлено действие.	<i>Энергично перевести самолёт в режим набора высоты. В настоящее время российские ракеты запускаются с четырёх космодромов.</i>
4	Инструмент	Неодушевленный объект, с помощью которого выполняется действие, но который при этом не претерпевает изменений.	<i>В режиме горизонтального полета на скорости 170 км/ч сбалансировать самолет триммером руля высоты. Разрешается вывод самолёта на посадочную прямую с использованием рукоятки.</i>
5	Место	Место, в котором осуществляется действие.	<i>В грузовой кабине расположены барьерная перегородка и герметичная грузовая дверь.</i>
6	Климатические условия	Режим погоды, значения климатических факторов внешней среды.	<i>Разрешается эксплуатация самолёта в тропических условиях при температуре воздуха у земли до 45 С.</i>
7	Высота	Расстояние, рассчитываемое по вертикали от определённого уровня/точки отсчёта до воздушного судна.	<i>Ниже высоты 6000 м выдерживать скорость по прибору 430-450 км/ч до стабилизации самолёта в горизонтальном полёте.</i>
8	Режим	Способ функционирования устройства, работы какого-либо механизма.	<i>Проверить работу двигателя на взлетном и номинальном режимах в течение 20-30 с.</i>
9	Угол наклона	Угол движения летательного аппарата относительно горизонтальной оси инерции.	<i>Развороты выполнять с креном не более 15°. Вираз с креном до 45° выполнять на скорости по прибору 400 км/ч.</i>
10	Скорость движения	Физическая величина, показывающая, как меняется положение движущегося тела за данный промежуток времени.	<i>После вывода из разворота дальнейший набор производить на скорости 350 км/ч по прибору. Пикирование выполнять с углами до 30° при скорости ввода 300 км/ч по прибору.</i>
11	Содержание действия	Наиболее абстрактная семантическая роль, следующая обычно после каузативных глаголов речевого воздействия.	<i>Максимально допустимая скорость ветра у земли, при которой разрешается выруливание, заруливание и буксировка самолёта, – 30 м/с</i>
12	Температура	Физическая величина, характеризующая тепловое состояние чего-либо.	<i>Разрешается эксплуатация самолёта в арктических условиях при температуре воздуха у земли до «минус» 50 С.</i>

№ п/п	Семантическая роль	Описание	Пример
13	Условие	Обстоятельства, требования для осуществления какого-либо действия.	<i>В процессе руления не допускать резкого торможения. В момент касания ВПП выпустить интерцепторы, опустить переднюю опору и включить реверс тяги.</i>
14	Масса	Физическая характеристика материи, являющаяся мерой ее инерционных и гравитационных свойств.	<i>Закрылки выпустить после четвертого разворота перед входом в глиссаду на угол: 10° при посадочной массе более 42 тонн и 20° при посадочной массе 42 тонны и менее.</i>
15	Скорость ветра	Скорость движения воздуха относительно земной поверхности.	<i>Максимально допустимая скорость ветра у земли, при которой разрешается выруливание, заруливание и буксировка самолёта – 30 м/с.</i>
16	Положение	Расположение одного объекта относительно другого.	<i>Допускается более высокое выравнивание и более поздняя установка ручки управления двигателем в положение «Малый газ».</i>
17	Дистанция	Расстояние между двумя объектами.	<i>Посадку в паре производить в правом пеленге на дистанции 30- 40 м.</i>
18	Цель	Конечный результат, на который преднамеренно направлено действие.	<i>Развороты и виражи с учебной целью выполнять на интервале и дистанции 50-25 м при скорости 400 км/ч по прибору с креном не более 45°.</i>
19	Время	Продолжительность протекания действия.	<i>Проверить работу двигателя на взлетном и номинальном режимах в течение 20-30 с.</i>
20	Способ	Образ действия; совокупность действий для решения какой-либо задачи.	<i>Багаж размещается в багажно-грузовых отсеках БГО-1 и БГО-2 россыпью («внавал»).</i>
21	Направление движения	Устремление объекта в определённую сторону, точку.	<i>При вынужденной посадке с отказавшим двигателем необходимо выполнить разворот с креном 45° в сторону аэродрома.</i>
22	Номер	Порядковое число предмета.	<i>Гидробаки ГС1 и ГС3 установлены на шпангоуте № 46 в левой и правой нишах ООШ соответственно.</i>
23	Количество	Совокупность, суммарное число объектов.	<i>Гидробаки ГС1, ГС2, ГС3 в количестве трёх штук установлены на первом лонжероне центроплана в ТО № 4.</i>
24	Тип	Образец, модель, разновидность, которым соответствует определённая группа предметов.	<i>В грузовой кабине расположена система напольной механизации погрузочно-разгрузочных работ типа ANCR.</i>
25	Размер	Величины, характеризующие объект	<i>Перевозка грузов в грузовой кабине осуществляется на поддонах (палетах) с размерами 96x125, 88x125, 88x108, 96x108.</i>
26	Давление	Физическая величина, численно равная силе, действующей на единицу площади поверхности перпендикулярно этой поверхности.	<i>Канал стояночного торможения обеспечивает стояночное торможение давлением 100 кгс/см².</i>
27	Цвет	Окраска, световой тон какого-либо объекта	<i>Нанести первый слой эмали ХВ-16 сероголубого цвета с 2% алюминиевой пудры</i>
28	Вещество	То, из чего состоит физический объект.	<i>Нанести второй слой эмали ХВ-16 сероголубого цвета с 0,5% алюминиевой пудры и 15% лака.</i>
29	Интервал	Промежуток, расстояние между чем-нибудь.	<i>Выполнять пункт 6 через каждые 10 дней хранения установки на самолёте.</i>
30	Свойство	Качество, признак чего-либо.	<i>Под слоем снега обшивка остается влажной до 24 ч и дольше.</i>

Инвентарь семантических ролей является уникальным для рассматриваемой предметной области, что можно подтвердить сравнительным анализом инвентаря семантических ролей, полученным в результате семантической разметки Национального корпуса

русского языка (НКРЯ). Инвентарь семантических ролей этого корпуса содержит более 400 вхождений, однако при его сопоставлении с инвентарём, полученным в результате разметки текстов по авиации и космонавтике, было выявлено 13 совпадений. Уни-

кальными и наиболее релевантными в области авиакосмического приборостроения являются отсутствующие в НКРЯ следующие роли: *климатические условия, высота, режим, угол наклона, скорость движения, температура, масса, скорость ветра, положение, дистанция, номер, тип, размер, давление, цвет, вещество, интервал*. Область авиации и космонавтики в основном представлена **предикатами действия** по объектно-предикатной системе М.З. Закиева [18]: *нажимать, включать, выключать, балансировать, проверять, открывать, закрывать, выполнять, устанавливать, производить, убирать, уменьшать, осматривать, размещать, отпускать* и другие. Такие предикаты предполагают определённое физическое действие со стороны агента, которое часто направлено на объект. Тексты по авиации и космонавтике также содержат **предикаты движения**, требующие наличия одушевлённого агента, которым обычно является человек, управляющий воздушным судном: *разгонять, перемещать, поворачивать*. Нормативная отраслевая документация характеризуется большим количеством **предикатов долженствования** (*необходимо проверить, необходимо выполнить, не должен превышать*), а также **предикатов позволения** (*разрешать, допускать, позволять, запрещать*). Предикаты долженствования и позволения предписывают правила эксплуатации воздушного судна.

Составление фреймов для предикатов. Некоторую ситуацию, описываемую в предложении, задаёт предикат, т.е. он определяет отношения между выделенными сущностями. Такие отношения обычно являются частью более широкого контекста или ситуации: в магазине можно купить хлеб, потому что существует ситуация продажи/покупки хлеба, в которой участвуют минимум два человека – покупатель и продавец, объект продажи – продукт, а также место, где осуществляется действие – магазин. Если представлять ситуации с помощью графов (семантических сетей), то подобная модель представления знаний окажется неэффективной из-за серьёзного ограничения: она выражает факты, которым обычно не хватает контекстной и ситуационной информации. Когда необходимо интегрировать два разных набора данных, следует восстанавливать неявные ситуации, что происходит довольно сложно в системах, основанных на знаниях. Метод контекстуализации графов заключается в том, чтобы выразить факты, которые они фиксируют, в качестве проекций фреймов. Фреймы – это когнитивные структуры, они активно используются для организации знаний, а также для интерпретации, обработки или предсказания информации. Идея фрейма впервые была представлена Марвином Мински в 1975 г. как основной способ отражения всего диапазона человеческих знаний в наиболее простой и понятной модели.

В лингвистике эталонной моделью для формирования фреймов является фреймовая семантика Ч. Филлмора, где фрейм интуитивно представляется как некий контурный рисунок ситуации, в котором необязательно заполнены все детали. Более точно, фрейм – это структура, которая представляет собой *n*-арное отношение с многовариантными аргументами, обозначающее ситуацию, событие, состояние или

конфигурацию, и предполагает, что она имеет репрезентативное сходство со знаниями, закодированными в когнитивных системах. Любая бинарная проекция фрейма называется семантической ролью. Таким образом, для отражения размеченных данных в базе знаний предлагается использовать семантическую модель представления знаний, в узлах которой будут содержаться фреймы – минимально возможные описания сущностей реального мира. В табл. 2–4 показаны примеры описания ситуаций с помощью фреймовой структуры.

Онтологический подход к формированию фреймов в базе знаний. Если естественный язык должен быть понятен компьютеру в любом нетривиальном смысле, т.е. если компьютер обязан понимать высказывания и вопросы, выполнять синтаксический и семантический анализ, перефразировать и/или генерировать предложения на естественном языке, то должно быть и некоторое представление о том, какие отношения между объектами существуют в реальном мире и как окружающий мир воспринимается человеком. Компьютеру необходимо предоставить когнитивную модель реального мира. Полвека назад единственной задачей, которая предполагала автоматическую обработку свободно формулируемого текста на естественном языке, был машинный перевод. Эта задача до сих пор полностью не решена. В рамках основных технологий машинного перевода тексты рассматриваются как цепочки символов, которые нужно оптимальным образом разделить на фрагменты и напрямую соотнести с фрагментами других – иноязычных – цепочек, при этом не делается попытки определить их реальный смысл в данном контексте. Такого рода решения могут быть эффективны за счет накопления большого объема примеров соответствий и использования подготовленных человеком примеров – фрагментов ранее переведенного вручную похожего текста. Результат перевода зависит от степени полноты и представительности используемых корпусов. Следовательно, невозможно гарантировать на практике наличие в обучающем материале достаточного количества правильных примеров, на основе которых компьютер в каждом конкретном случае выявит нужную закономерность. Подобно тому как для нахождения возможных синтаксических связей в предложении необходимо знание грамматики языка, для успешного определения значений слов этого предложения и правильных связей между ними должно быть знание моделей окружающего мира. Такое знание может быть описано с помощью онтологии, представляющей собой формализацию знаний о взаимосвязанных объектах и целых классах объектов реального мира, что позволяет компьютеру использовать эти знания и даже дополнять информацию об отдельных объектах с помощью механизмов логического вывода. Лингвистическая онтология представляет собой набор понятий определенной предметной области, организованных в иерархическую структуру. В 80-х гг. XX в. этот термин стал употребляться для обозначения структурных элементов, хранящих знания о мире внутри систем искусственного интеллекта, в 90-е гг. развитие онтологий набрало обороты, и исследователи стали предприни-

мать попытки теоретически их осмыслить и разработать правила их создания. Онтологии задействованы в приложениях, связанных с управлением знаниями, моделированием бизнес-процессов, интеллектуальной интеграцией информации, информационным поиском, интеграцией баз данных и т.д. Для того чтобы эффективно использовать онтологию в решении задач извлечения смысла из текста, каждый узел онтологии должен хранить определённую информацию об описываемом объекте: какими характеристиками он обладает, в каких отношениях находится данный объект с другими объектами иерархии, представляющей окружающий мир и т.д.

[19]. Смысловые (семантические) отношения между лексическими элементами составляют основу онтологий, как, например, в лексической базе данных WordNet [20]. Существуют горизонтальные и вертикальные смысловые связи. Горизонтальные связи включают синонимию (схожее значение различных языковых форм), а также отношения, которые могут быть подведены под общее понятие оппозиции, например, антонимию. Вертикальные связи обычно представляют собой родовидовые отношения или отношения по принципу «часть-целое». На рис. 2 представлен пример онтологии о двигателях космического аппарата.

Таблица 2

Фреймовое представление предиката «выполнять»

Предикат: выполнять		
Семантическая роль	Вхождения связи «предикат-аргумент», %	Примеры аргументов
Содержание действия	31,3	разворот, переворот, петлю, виражи, пикирование
Скорость движения	27,0	не менее 300 км/ч, 400 км/ч
Угол наклона	20,8	с креном до 15°, с кренами 20 °, 30 ° и 45°
Режим	6,3	номинальный, максимальный
Высота	8,3	до 5000 м
Температура	2,0	до 45°
Цель	2,0	учебная
Дистанция	2,0	25-50 м

Таблица 3

Фреймовое представление предиката «производить»

Предикат: производить		
Семантическая роль	Вхождений связи «предикат-аргумент», %	Примеры аргументов
Содержание действия	27,6	прогрев двигателя, посадку
Режим	13,8	на режиме малого газа
Скорость движения	13,8	на скорость 400 км\ч
Высота	10,4	после 10000 м
Способ	6,9	с разворота
Угол наклона	6,9	не более 45°
Время	5,2	в течение 1 мин.
Дистанция	5,2	на дистанции 30-40 м
Цель	5,1	в учебных целях
Направление	5,1	в сторону ведущего

Таблица 4

Фреймовое представление предиката «выдерживать»

Предикат: выдерживать		
Семантическая роль	Вхождений связи «предикат-аргумент», %	Примеры аргументов
Скорость движения	50,0	не более 500 км\ч
Высота	14,3	с эшелона 3000 м
Условие	14,3	при разбеге
Режим	7,1	по загоранию зелёных ламп
Время	7,1	в течение 30 с
Цель	7,1	стабилизация самолёта

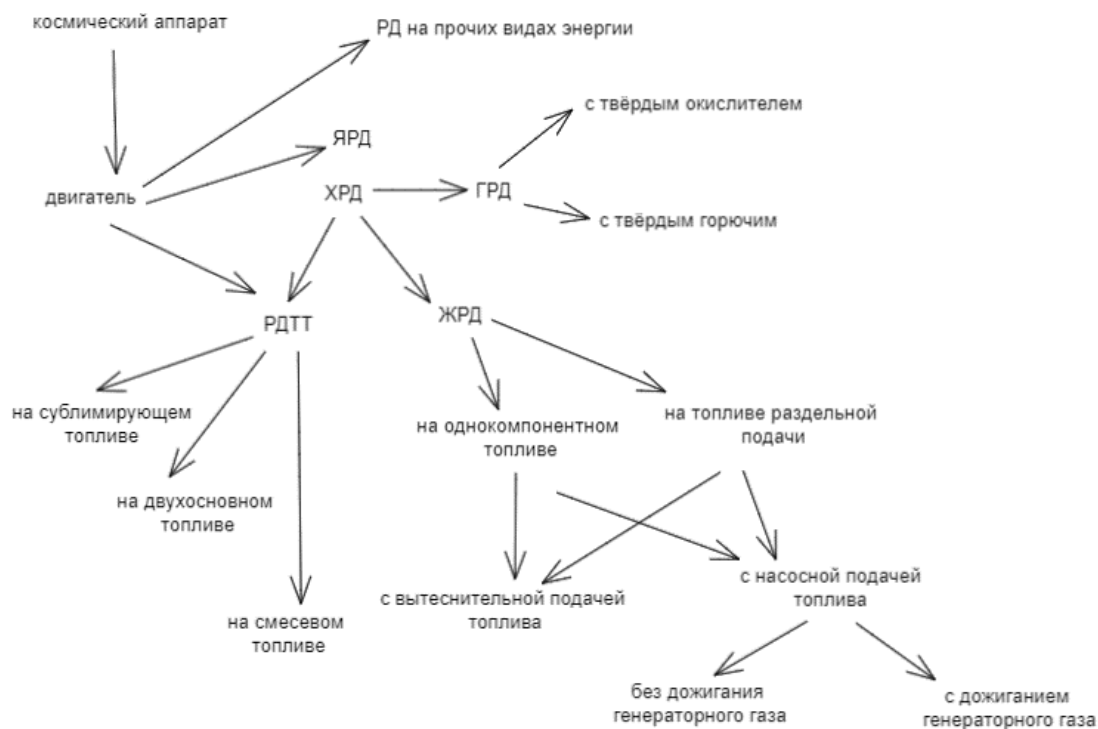


Рис. 2. Пример онтологии, представляющей классификацию двигателей космического аппарата

Онтологическая семантика – это один из эффективных подходов к обработке естественного языка, который использует построенную модель мира как центральный ресурс для извлечения информации из текстов на естественном языке. С целью реализации такого подхода мы предлагаем организовывать сформированные на основе разметки фреймы в онтологию. Представление знаний на основе онтологии фреймов демонстрирует концепцию наследования, включающую ряд фреймов или узлов, связанных друг с другом некоторыми отношениями.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе рассмотрена проблема автоматического семантического анализа в системах обработки текстов на естественном языке. Отмечено, что проблема семантического анализа текстов на русском языке связана с отсутствием достаточного количества размеченных данных для обучения алгоритмов. Показано, что одним из перспективных методов семантической обработки текстов языка является теория падежной грамматики Ч. Филлмора, которая заключается в распознавании предикатно-аргументных структур в каждом предложении, изложены основные положения этой теории. Семантический анализ на основе разметки предикатно-аргументных структур хорошо развит для текстов на английском языке, но менее распространён в отечественной лингвистике. Установлено отсутствие корпусов с релевантной семантической разметкой для обучения систем автоматической обработки научно-технических текстов на русском языке, в том числе в сфере авиации и космонавтики, что обосновывает

необходимость создания такой системы для семантической разметки русскоязычных текстов в области авиакосмического приборостроения.

Программа для разметки семантических ролей в текстах по авиации и космонавтике на русском языке создана в рамках данной работы. Описаны функциональные возможности программы для разметки семантических ролей в режимах анализа и навигации, а также представлена методика разметки текстов и их последующей обработки. В этой программе размечено 2000 лексических единиц на примерах из текстов по авиации и космонавтике. В результате анализа сформирован уникальный инвентарь семантических ролей для авиакосмической предметной области. Приведён анализ предикатов, который показал, что наиболее частотными для области авиации и космонавтики являются предикаты действия, движения, долженствования и позволения.

Для упорядочивания размеченных семантических ролей в качестве модели представления знаний предлагается применять методы фреймовой семантики Ч. Филлмора и онтологический подход к организации фреймов в базе знаний. Приведены примеры описания предикатов с помощью фреймовой структуры, а также статистические показатели частоты встречаемости определённых предикатно-аргументных структур. Показано, что анализ текста в терминах семантических ролей позволяет получить дополнительный уровень абстракции, описывающий семантику текста, который применяется при проектировании систем машинного перевода, голосового управления, вопросно-ответных систем и других лингвистических приложений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sidnyaev N.I., Butenko Iu.I., Bolotova E.E. Statistical and Linguistic Decision-making Techniques based on Fuzzy Set Theory // *Advances in Intelligent Systems, Computer Science and Digital Economics*. – 2020. – Vol. 1127 – P. 165-174.
2. Сидняев Н.И., Бутенко Ю.И., Синева Е.Е. Использование падежной грамматики при информационном поиске в базе знаний экспертной системы о конструкциях летательных аппаратов // *Системы и средства информатики*. – 2021. – Т. 31, № 3. – С. 75-82.
3. Лесников С.В. Виды разметок текстовых корпусов русского языка // *Научно-техническая информация. Сер. 2*. – 2019. – № 9. – С. 27-30.
4. Кузнецов И.О. Автоматическое выделение главных актантов: теоретическая основа и актуальные подходы // *Научно-техническая информация. Сер. 2*. – 2012. – № 12. – С. 34-44.
5. Fillmore C.J., Baker C.F. Frame semantics for text understanding // *Proceedings of WordNet and Other Lexical Resources Workshop, NAACL*. – 2001. – Vol. 6. – P. 20-32.
6. Апресян Ю.Д. Лексическая семантика. Т. 1. – Москва: «Восточная литература» РАН, 1995. – 472 с.
7. Fillmore Ch.J. The case for case. Universals in linguistic theory / eds. E.Bach, R.Harms. – New-York: Harper and Row, 1968. – P. 1-88.
8. Богданов В.В. Структурно-семантическая организация предложения. – Ленинград: Изд-во ЛГУ, 1977. – 381 с.
9. Сусов И.П.. Глубинные аспекты семантики предложения // *Проблемы семантики*. – Москва, 1974. – С. 58–65.
10. Трегубов А.С. Методы интеллектуального анализа тональности текста для поиска противоположных мнений // *Перспективы науки*. – 2020. – № 2. – С. 13-18.
11. Найденова К.А., Невзорова О.А. Машинное обучение в задачах обработки естественного языка: обзор современного состояния исследований // *Ученые записки Казанского университета. Серия Физико-математические науки*. – 2008. – Т. 150, № 4. – С. 5-24.
12. Xue N., Palmer M. Calibrating features for semantic role labeling // *Empirical Methods in Natural Language Processing*. – 2004. – С. 88-94.
13. Gildea D., Jurafsky D. Automatic labeling of semantic roles // *Computational Linguistics*. – 2020. – Vol. 28. – P. 245–288.
14. Folland W., Martin J.H. Dependency-based semantic role labeling using convolutional neural networks // *Proceedings of the Fourth Joint Conference on Lexical and Computational Semantics*. – 2015. – С. 279-288.
15. Ермаков А.Е., Плешко В.В. Семантическая интерпретация в системах компьютерного анализа текста // *Информационные технологии*. – 2009. – Т. 6. – С. 2-7.
16. Смирнов И.В., Шелманов А.О., Кузнецова Е.С., Храмоин И.В. Семантико-синтаксический анализ естественных языков. Ч. 2. Метод семантико-синтаксического анализа текстов // *Искусственный интеллект и принятие решений*. – 2014. – № 1. – С. 11–24.
17. Кашкин Е.В., Ляшевская О.Н. Семантические роли и сеть конструкций в системе FrameBank // *Компьютерная лингвистика и интеллектуальные технологии*. – 2013. – Т. 12, № 19. – С. 325-343.
18. Закиев М.З. Татарская грамматика. Т.3. Синтаксис. – Казань: Таткнигоиздат, 1992. – 488 с.
19. Болдырев Н.Н. Репрезентация знаний в системе языка // *Вопросы когнитивной лингвистики*. – 2007. – № 4. – С. 17-27.
20. Miller G.A. WordNet: a lexical database for English // *Communications of the ACM*. – 1995. – Vol. 38, № 11. – P. 39-41.

Материал поступил в редакцию 22.08.2022

Сведения об авторах

БУТЕНКО Юлия Ивановна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Романо-германские языки» Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана (Национальный исследовательский университет),
e-mail: iuliabutenko2015@yandex.ru

ГАЛЕТКА Маргарита Леонидовна – кандидат филологических наук, доцент, доцент кафедры прикладной лингвистики Национального аэрокосмического университета им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», г. Харьков.
e-mail: matta2015@gmail.com

СИНЕВА Елизавета Евгеньевна – аспирант кафедры «Высшая математика» Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана (Национальный исследовательский университет)
e-mail: sinevae@mail.ru