Российская ассоциация искусственного интеллекта

Российская ассоциация нечетких систем и мягких вычислений

Администрация Коломенского городского округа

Главное управление научно-исследовательской деятельности и технологического сопровождения передовых технологий (инновационных исследований) Министерства обороны Российской Федерации

Департамент информационных систем Министерства обороны Российской Федерации

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Военный инновационный технополис «ЭРА»

Российский национальный исследовательский медицинский университет им. Н.И. Пирогова

Юбилейная X-я Международная научно-практическая конференция

«ИНТЕГРИРОВАННЫЕ МОДЕЛИ И МЯГКИЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ В ИСКУССТВЕННОМ ИНТЕЛЛЕКТЕ»

(17-20 МАЯ 2021 г.)

СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ

Том 1

УНИВЕРСУМ

2021

УДК 004.8 : 681.3.01
ББК 32.813

Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте. Сборник научных трудов X-й Международной научно-технической конференции (ИММВ-2021, Коломна, 17-20 мая 2021 г.). В 2-х томах. Т1. – Смоленск: Универсум, 2021. – 449 с.

Научно-практическая конференция посвящена вопросам построения интегрированных систем и реализации мягких вычислений в искусственном интеллекте. Основные направления работы конференции:

- Гибридные интеллектуальные системы, синергетический искусственный интеллект (ИИ), объяснимый ИИ.
- Мягкие вычисления, измерения и оценки. Интеллектуальные вычисления. Вычисления, инспирированные природой.
- Неклассические логики и семантики в ИИ. Многозначные и модальные логики в ИИ.
- Нечеткие множества, нечёткие отношения, нечёткие графы и метаграфы.
- Нечёткие логики и приближённые рассуждения.
- Нечёткое управление, нечёткая оптимизации, нечёткие модели принятия решений.
- Когнитивные модели в искусственном интеллекте.
- Вероятностные модели в информационных технологиях и искусственном интеллекте. Байесовские сети.
- Нейросетевые технологии. Нейрологические модели.
- Бионические подходы, эволюционное моделирование, генетические алгоритмы.
- Автономные агенты и многоагентные системы, распределенный и децентрализованный ИИ.
- Интеллектуальные, коллаборативные, «понимающие» роботы.
- Искусственная жизнь и адаптивное поведение. Роевая робототехника.
- Технологии искусственного интеллекта военного, двойного и специального назначения.
- Медицинские интеллектуальные системы.
- Интеллектуальные производства, интернет вещей, интеллектуальные мехатронные и киберфизические системы.
- Инженерия знаний, полученных на основе измерений. Когнитивные и мягкие измерения. Сенсорные сети.

© Универсум, 2021
© РАИИ, 2021
© РАНСМВ, 2021

ISBN 978-5-91412-469-1

Отец Нечёткой Логики
Лотфи Заде

Программный комитет ИММВ-2021

Сопредседатели:

Кобринский Б.А., д.м.н., проф. (Россия, Москва, ФИЦ ИУ РАН)
Тарасов В.Б., к.т.н., доц. (Россия, Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана)

Заместители председателей:

Борисов В.В., д.т.н., проф. (Россия, Смоленск, филиал НИУ МЭИ)
Ковалёв С.М., д.т.н., проф. (Россия, Ростов-на-Дону, РГУПС)

Члены программного комитета:

Аверкин А.Н., к.ф.-м.н., доц. (Россия, Москва, ФИЦ ИУ РАН)
Алиев Р.А., д.т.н., проф. (Азербайджан, Баку, АзГНА)
Батыршин И.З., д.ф.-м.н., проф. (Мексика, Мехико, MPI)
Гладков Л.А., к.т.н., доц. (Россия, Таганрог, ЮФУ)
Голенков В.В., д.т.н., проф. (Беларусь, Минск, БГУИР)
Гончаров А.М., д.в.н., проф. (Россия, Москва, ГУНИД МО РФ)
Грибова В.В., д.т.н., проф. (Россия, Владивосток, ИАПУ ДВО РАН)
Еремеев А.П., д.т.н., проф. (Россия, Москва, НИУ МЭИ)
Зарубина Т.В., д.м.н., проф. (Россия, Москва, РНИМУ им. Н.И. Пирогова)
Карпов В.Э., к.т.н., доц. (Россия, Москва, НИЦ КИ)
Колесников А.В., д.т.н., проф. (Россия, Калининград, БФУ им. И. Канта)
Колоденкова А.Е., д.т.н., доц. (Россия, Самара, СамГТУ)
Кузнецов О.П., д.т.н., проф. (Россия, Москва, ИПУ РАН)
Кулинич А.А., к.т.н., доц. (Россия, Москва, ИПУ РАН)
Курейчик В.М., д.т.н., проф. (Россия, Таганрог, ЮФУ)
Михеенкова М.А., д.т.н., проф. (Россия, Москва, РГГУ)
Морозов А.В., д.т.н., проф. (Россия, Анапа, ВИТ «ЭРА»)
Осадчук А.В., к.т.н. (Россия, Москва, ДИС МО РФ)
Палюх Б.В., д.т.н., проф. (Россия, Тверь, ТвГТУ)
Петровский А.Б., д.т.н., проф. (Россия, Москва, ФИЦ ИУ РАН)
Плесневич Г.С., к.ф.-м.н., доц. (Россия, Москва, НИУ МЭИ)
Редько В.Г., д.ф.-м.н., проф. (Россия, Москва, ФНЦ НИИСИ РАН)
Ройзензон Г.В., к.т.н., доц. (Россия, Москва, ФИЦ ИУ РАН)
Рыбина Г.В., д.т.н., проф. (Россия, Москва, НИЯУ МИФИ)
Стефанюк В.Л., д.т.н., проф. (Россия, Москва, ИППИ РАН)
Тельнов Ю.Ф., д.э.н., проф. (Россия, Москва, РЭУ им. Г.В. Плеханова)
Тулупьев А.Л., д.ф.-м.н., проф. (Россия, Санкт-Петербург, СПбГУ)
Федунов Б.Е., д.т.н., проф. (Россия, Москва, ФГУП ГосНИИАС)
Финн В.К., д.т.н., проф. (Россия, Москва, ФИЦ ИУ РАН)
Фоминых И.Б., д.т.н., проф. (Россия, Москва, НИУ МЭИ)
Юсупбеков Н.Р., акад. АН РУз (Узбекистан, Ташкент, ТашГТУ)
Ющенко А.С., д.т.н., проф. (Россия, Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана)
Язенин А.В., д.ф.-м.н., проф. (Россия, Тверь, ТвГУ)
Ярушкина Н.Г., д.т.н., проф. (Россия, Ульяновск, УлГТУ)

Организационный комитет ИММВ-2021

Сопредседатели:

Лебедев Д.Ю.	(Россия, Коломна, Глава Коломенского городского округа)
Гаврюшин С.С., д.т.н., проф.	(Россия, Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана)

Заместители председателей:

Зафиров Э.Г., к.т.н.	(Россия, Коломна, ОАО «Коломенский завод РТИ»)
Тарасов В.Б., к.т.н., доц.	(Россия, Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана)

Члены организационного комитета:

Ахтямова М.Л.	(Россия, Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана)
Дмитриева И.В.	(Россия, Администрация Коломенского городского округа)
Королева М.Н., к.т.н., доц.	(Россия, Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана)
Мурзак Н.А., к.э.н.	(Россия, Коломна, Коломенский институт (филиал) Московского политехнического университета)
Федотова А.В., к.т.н., доц.	(Россия, Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана)
Колтунов С.С.	(Россия, Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана)
Луферов В.С.	(Россия, Смоленск, филиал НИУ МЭИ)
Луферова Е.А.	(Россия, Смоленск, филиал НИУ МЭИ)
Мажуга В.М.	(Россия, Коломна, ООО «Инлайт»)

ПРЕДИСЛОВИЕ

Перед Вами – труды X-й Международной научно-практической конференции **«Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте» (ИММВ-2021).** Все предыдущие конференции также состоялись в старинном русском городе «трёх рек», где тихая речка Коломенка впадает в Москву-реку, которая несёт свои воды в широкую Оку. Городе историческом, откуда князь Дмитрий Донской выступил со своей ратью на Куликово Поле в 1380 году. Место проведения конференции находится совсем рядом с «сердцем» Коломны – её Кремлём, на фоне стены которого около Маринкиной башни стоит памятник Дмитрию Донскому верхом на коне.

Наша конференция – ровесник XXI-го века. Двадцать лет назад 17-18 мая 2001 года в Коломне (в здании Администрации) состоялся первый научный семинар **ИММВ** под председательством известного учёного, ведущего специалиста в области интеллектуального имитационного моделирования, д.т.н., профессора, заведующего кафедрой «Компьютерные системы автоматизации производства» МГТУ им. Н.Э. Баумана **Виктора Владимировича Емельянова.** Местным организатором первого семинара выступил выпускник МГТУ им. Н.Э. Баумана, аспирант В.В. Емельянова, предприниматель **Эвклид Герасимович Зафиров,** тогда ещё только строивший здание будущего завода.

С тех пор майские коломенские семинары стали традиционными и проводятся один раз в два года (по нечётным годам). С 2007 года в силу разнообразия тематики, расширения географии и существенного роста числа участников они приобрели статус конференций.

Конечно, семинар в 2001 году был далеко не первым научным мероприятием по искусственному интеллекту (ИИ) в Коломне. Более того, Коломна является «колыбелью» отечественного научного сообщества по ИИ. В мае 1989 года по инициативе основоположника искусственного интеллекта в нашей стране, д.т.н., профессора **Дмитрия Александровича Поспелова** в Коломне был проведён Учредительный съезд **Советской ассоциации искусственного интеллекта** (САИИ), на котором был принят Устав Ассоциации, избран её научный совет и исполком.

Затем спустя два года в Коломне прошли II-й съезд САИИ и представительная международная конференция.

Общая фотография участников Учредительного съезда
Советской ассоциации искусственного интеллекта.
10 мая 1989 г.

Участники 1-го Международного научно-практического семинара «Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте» у стены Коломенского кремля (17 мая 2001 г.)

В этой связи следует вспомнить рано ушедшего из жизни ученика профессора Д.А. Поспелова – к.т.н. **Александра Филипповича Блишуна,** талантливого учёного и успешного предпринимателя, жившего и работавшего в Коломне, который организовал все эти научные мероприятия и был в те годы первым в городе специалистом по ИИ, нечётким множествам и их приложениям.

В 1996 года Ассоциация искусственного интеллекта стала Российской (РАИИ), и в 2002 году в Коломне состоялась **Восьмая Национальная конференция по ИИ**. А 17 мая 2005 года после третьего семинара ИММВ прошёл съезд Российской ассоциации нечётких систем (РАНС), на котором был оглашён меморандум о преобразовании РАНС в **Российскую ассоциацию нечётких систем и мягких вычислений** (РАНСМВ). Так что оба наших научных сообщества по искусственному интеллекту и мягким вычислениям, основанным на взаимодействии дополняющих друг друга методов и технологий нечёткой логики, нейронных сетей, бионических алгоритмов, байесовских моделей, теории хаоса, и др., были официально созданы в Коломне.

Как и все предыдущие конференции ИММВ, юбилейная X-я конференция организуется совместно двумя дружественными научными ассоциациями РАИИ и РАНСМВ при всесторонней поддержке со стороны **Администрации Коломенского городского округа** и лично главы Коломенского городского округа **Дениса Юрьевича Лебедева**, который любезно согласился возглавить Оргкомитет конференции ИММВ-2021.

Научно-практическая конференция ИММВ-2021 проводится в период повышенного внимания руководства России к достижениям в области искусственного интеллекта и его применений в развитии экономики и укреплении обороноспособности страны. Об этом свидетельствуют такие события как утверждение в нашей стране **Национальной стратегии развития ИИ на период до 2030 года** (Указ Президента Российской Федерации № 490 от 10.10.2019), открытие Федерального проекта **«Искусственный интеллект»**, подготовка и ввод в действие с 01.03.2021 **ГОСТ Р 59277-2020** «Системы искусственного интеллекта. Классификация систем искусственного интеллекта».

Поэтому Программным комитетом ИММВ-2021 совместно с вошедшими в его состав руководителями заинтересованных структур Минобороны РФ и Минздрава РФ, было принято решение о проведении в первый день конференции двух Круглых столов по актуальным прикладным направлениям «Технологии искусственного интеллекта

военного, двойного и специального назначения» и «Искусственный интеллект в здравоохранении».

Цель первого Круглого стола – обсуждение проблем и обоснование подходов к внедрению технологий искусственного интеллекта для обеспечения обороноспособности и безопасности государства.

Цель второго Круглого стола – получение объективной информации о востребованности методов, технологий и систем искусственного интеллекта в практике здравоохранения, а также поиск путей повышения эффективности их внедрения в различные области медицины.

Наша конференция приурочена к знаменательной дате – 100-летию со дня рождения выдающегося учёного современности, основоположника теории нечётких множеств и мягких вычислений, профессора **Лотфи Заде.** На третий день конференции ИММВ-2021 запланировано торжественное заседание, посвящённое жизни и научному наследию «Отца нечёткой логики». Будет сделан большой доклад коллектива авторов об этапах научного пути и основных результатах выдающегося учёного. Выступят известные российские специалисты в области нечётких систем и мягких вычислений, лично знавшие профессора Лотфи Заде и неоднократно встречавшиеся с ним – к.т.н. А.Н. Аверкин, д.т.н. С.В. Прокопчина, д.т.н. В.Л. Стефанюк, к.т.н. В.Б. Тарасов, д.ф.-м.н. А.В. Язенин, д.т.н. Н.Г. Ярушкина, д.ф.-м.н. И.З. Батырщин (онлайн).

Судьба Лотфи Заде удивительным образом переплетена с историей нашей страны. Он родился **4 февраля 1921 года** в Баку (Советский Азербайджан) и первые месяцы его жизни пришлись на сложный период перехода от Российской империи к СССР, который образовался почти через два года после рождения Л. Заде. Лотфи прожил в СССР более 10 лет, причём учился в русской школе в Баку, и его родной язык – русский. В начале 30-х годов родители увезли его в Иран на родину отца, откуда он уехал в США, где в 1944 году поступил в Массачусетский технологический институт, который окончил со степенью магистра в 1946 году. В 1949 году защитил диссертацию PhD в Колумбийском университете, где затем быстро прошёл путь от ассистента (1950 год) до полного профессора (1957 год). В 1959 году профессор Л. Заде перевёлся в Калифорнийский университет в Беркли, где проработал всю жизнь. Он прожил удивительно долгую жизнь в науке, которой активно занимался около семи десятилетий, и скончался в Беркли 6 сентября 2017 года на 97-м году жизни, буквально пару месяцев не дожив до 100-летия Октябрьской революции.

Профессор Лотфи Заде был большим другом советских и российских учёных. Его близкими друзьями в 1960-1980-е были академики Н.Н. Моисеев, Р.М. Гамкрелидзе, В.А. Ильин, Г.С. Поспелов, Я.З. Цыпкин и др.

В ряде интервью он называл себя «американским профессором прикладной математики, получившим базовое электротехническое образование в Иране, а родившимся в России». Образ России периодически всплывал в его памяти. При наших встречах с ним в 1990-2000-е годы он всегда живо интересовался, как дела в России.

Теперь в его характеристику себя нужно добавить: «нашедшим вечный покой в родном Баку (Азербайджанская республика) на Аллее почётного захоронения».

В 1965 году, будучи уже известным учёным – специалистом в области системного анализа и автоматического управления, профессор Лотфи Заде публикует в журнале «Information and Control» главный труд своей жизни – основополагающую статью по нечётким множествам **«Fuzzy Sets»**.

Эта имеющая большое историческое значение работа дала толчок новому научному направлению, которое вызвало мощный резонанс во всем мире. Ключевая идея Л. Заде состояла в том, что реальные человеческие рассуждения, опирающиеся на естественный язык, не могут быть адекватно представлены в рамках традиционных математических формализмов. Введение нечётких множеств – классов с неточно определенными границами, описываемых функциями принадлежности (обобщающих характеристические функции обычных множеств) – обеспечило основу для развития более гибкого подхода к анализу рассуждений и моделированию сложных гуманистических систем, поведение которых описывается скорее лингвистическими, чем числовыми переменными.

Данная статья инициировала огромный поток публикаций в области нечёткой математики, который не иссякает до сих пор. Правда, в 1960-1970-е годы неортодоксальные идеи Л. Заде встретили весьма настороженный, а порой и холодный приём в различных научных кругах, особенно, в среде «чистых математиков». Однако практический потенциал теории нечётких множеств и нечёткой логики, их способность моделировать гибкие и неточные ограничения, частичное проявление свойств, плавный переход из одной ситуации в другую привлекли в эту область настоящую армию прикладников. За последние тридцать пять лет разработаны многочисленные приложения методов и моделей нечёткой математики в распознавании образов, анализе изображений, экспертных системах, системах поддержки принятия решений и многих-многих других сферах. Особо следует отметить

модели нечёткого управления, которые нашли широчайшее промышленное применение, начиная от бытовой техники (пылесосы, стиральные машины с нечёткой логикой) и кончая управлением сложными технологическими процессами (управление доменным процессом, управление атомными энергоблоками) и динамическими объектами (поезда метро, автомобили, вертолеты, роботы и пр.).

Лотфи Заде входил в когорту весьма немногочисленных ученых-первооткрывателей, которые, не останавливаясь на достигнутом, продолжают генерировать оригинальные научные идеи и формировать новые научные направления. Помимо теории нечётких множеств и лингвистических переменных им созданы нечёткая логика и теория приближённых рассуждений, теория возможностей и мягкие вычисления, теория грануляции информации и вычисления со словами и перцептивными оценками, обобщённая теория ограничений и связанная с ней общая теория неопределённости, теория Z-чисел. Почти каждая его публикация становилась событием в научном мире.

Среди самых знаменитых работ Л. Заде, написанных в 1970-е годы, следует отметить: «Основы нового подхода к анализу сложных систем и процессов принятия решений» (1973 г.); «Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближённых решений» (1975-1976 гг.); «Локальные и нечеткие логики» (совместно с Р. Беллманом) (1977 г.); «Нечёткие множества как основа теории возможности» (1978 г.); «Теория приближённых рассуждений (1979 г.); «Нечёткие множества и гранулярная структура информации» (1979 г.).

В первых двух работах было введено и описано понятие лингвистической переменной, рассмотрены пути её применения в интеллектуальных системах и управлении. Именно здесь были сформулированы идеи и принципы управления на основе нечеткой логики, которые затем были воплощены в технологии нечетких регуляторов. Там же были развиты такие формальные конструкции как нечеткие множества типа 2 и выше.

В статье по основам теории возможности, открывавшей первый номер международного журнала «Fuzzy Sets and Systems», Л. Заде предложил вариант исчисления неопределённостей, опирающийся на неаддитивную меру возможности и интерпретацию нечёткого множества как распределения возможностей. В отличие от нечёткого множества, выражающего неточность оценки некоторого атрибута, мера возможности описывает неопределённость или неполноту информации, связанную с появлением того или иного четкого события. По сути, это способ количественного описания (представления смысла) экспертных суждений, который является обобщением интервального

анализа и теории ошибок. В настоящее время мера возможности и двойственная ей мера необходимости выступают как фундаментальные модели неопределённости в интеллектуальных системах.

В статье по локальным и нечётким логикам развиваются восходящие к Я. Лукасевичу и Н.А. Васильеву идеи логического плюрализма и релятивизма, в работе по основам приближенных вычислений рассмотрены варианты применения методов теории возможности для описания семантики естественных языков, а в статье, посвящённой роли нечётких множеств в процессе грануляции информации, введено понятие гранулы и предложены модели грануляции (обобщения и детализации) информации.

В 1980-е годы профессор Л. Заде продолжил интенсивную работу над проблемами развития нечёткой логики и теории возможностей, а также их применения в интеллектуальных системах. Так в статье «Роль нечёткой логики в управлении неопределённостью в экспертных системах» (1983 г.) им описан способ применения нечёткой логики в интересах представления неточной информации и построен ряд правил вывода на основе комбинирования свидетельств. Затем он написал ряд статей, посвященных вопросам моделирования рассуждений здравого смысла: «Теория знаний здравого смысла» (1984 г.), «Силлогизмы в нечёткой логике и их применение к обыденным рассуждениям и рассуждениям с диспозициями» (1985 г.), «Вычислительная теория диспозиций» (1986 г.) и др.

Классические интеллектуальные системы, основанные на символьной обработке информации и булевой логике, не используют численных методов для учета неопределённости и нечёткости, опираясь на технологию жёстких вычислений (Hard Computing). Соответствующие компьютерные программы служат примерами закрытых, трудно модифицируемых систем; в них возможности самоорганизации, кооперации, эволюции компонентов фактически отсутствуют. В работе «Мягкие вычисления, нечеткие множества и нейронные сети» (1992 г.) профессор Л. Заде одним из первых предложил вариант построения гибридной интеллектуальной системы путем совместного использования разнородных моделей в интересах взаимной компенсации их недостатков и объединения преимуществ; при этом, как следствие, можно получить синергетические (нелинейные) эффекты. В рамках мягких вычислений три аспекта интеллекта – управление неопределённостью, обучение и адаптация в процессе эволюции – объединяются путем представления нечётких продукционных моделей в обучаемой нейронной сети, оптимизация которой происходит с помощью генетических алгоритмов. Возможны и

более сложные гибриды, включающие помимо указанных компонентов, хаотические модели, эволюционные вычисления, вероятностные рассуждения, байесовские сети и их расширения, модели обучения и пр.

Помимо мягких вычислений, в 1990-е годы интересы Л. Заде были связаны с разработкой методологии вычислений со словами, а также вычислительной теории перцептивных оценок. Среди опубликованных в этот период работ можно отметить «Нечёткая логика = Вычисления со словами» (1996 г.), «Нечёткая логика и исчисления нечётких правил и нечётких графов» (1997 г.), «От вычислений с числами к вычислениям со словами, от манипуляции с измерениями к манипуляции с перцептивными оценками» (1999-2000 гг.), «Заметки о вычислительной теории перцептивных оценок, основанной на вычислениях со словами» (2000 г.).

«Отец нечёткой логики» продолжил активную научную работу и в 2000-е годы. Так в 2005 году им была опубликована фундаментальная работа «На пути к общей теории неопределенности», в 2009 г. – статья «Расширенная нечёткая логика: первые шаги», а в 2011 году введено понятие Z-чисел.

Жизнеспособность любой теории в значительной степени определяется ее эволюционным потенциалом, возможностью расширения основных понятий и конструкций, а также появлением новых подходов, примыкающих к этой теории, а порой и конкурирующих с ней. В этом плане движение, порождённое пионерскими работами Л. Заде по нечётким множествам, плодотворно развивается. Его учениками и последователями были предложены такие математические конструкции как L-нечёткие множества со значениями принадлежности в дистрибутивной решетке, P-нечеткие множества с интервальными значениями принадлежности в каждой точке, нечёткие множества уровня, интуиционистские нечёткие множества, и пр. В то же время успешно применяются (в той или иной степени) альтернативные подходы – случайные множества, вероятностные множества, байесовские сети, теория свидетельств, недоопределённые множества, приближённые множества, мягкие множества.

Роль Лотфи Заде в современном мире не ограничена только конкретными областями науки. Его необычная собственная биография, вся жизнь и международная деятельность внесли ценный вклад в формирование планетарного научного сообщества XXI века, указали путь к созданию нового научного мировоззрения, предполагающего симбиоз достижений восточных и западных культур.

После рецензирования на X-ю Международную конференцию «Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте» было принято 75 докладов. В результате была сформирована программа конференции, включающая 15 пленарных докладов ведущих ученых и специалистов, в том числе 4 онлайн-выступления, а также 60 секционных докладов, распределённых по 10 секциям. В конференции участвуют учёные и специалисты из 19 городов России (Москва, Санкт-Петербург, Белгород, Владивосток, Волгоград, Екатеринбург, Ижевск, Казань, Калининград, Коломна, Новосибирск, Оренбург, Ростов-на-Дону, Симферополь, Смоленск, Тамбов, Таганрог, Тверь, Ульяновск), из Азербайджана, Беларуси и Мексики.

Программный комитет считает своим приятным долгом отметить большую роль в организационной подготовке конференции к.т.н., доцента МГТУ им. Н.Э. Баумана, учёного секретаря РАИИ Марии Николаевны Королевой. Огромный вклад в формирование и редактирование сборника её трудов внесли сотрудники кафедры вычислительной техники филиала НИУ МЭИ в г. Смоленске Виктор Сергеевич Луферов и Елена Александровна Луферова. Как всегда, издание трудов конференции взяло на себя ООО «Инлайт» (Коломна) во главе с Владимиром Михайловичем Мажугой, которому мы благодарны за оперативную и качественную работу.

На протяжении многих лет наша конференция пользуется вниманием и всесторонней поддержкой Администрации Коломенского городского округа. В этой связи хотелось бы выразить огромную благодарность председателю Оргкомитета конференции – главе Коломенского городского округа **Денису Юрьевичу Лебедеву**.

Особую признательность от всех участников конференции хотелось бы выразить нашему давнему другу и попечителю всех конференций ИММВ, председателю совета директоров ОАО «Коломенский завод РТИ», кандидату технических наук **Эвклиду Герасимовичу Зафирову**, которого мы поздравляем с его замечательным юбилеем.

ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

УДК 007.52:004.896:004:942

ПРИНЦИПЫ АВТОНОМНОГО ГРУППОВОГО УПРАВЛЕНИЯ

Городецкий В.И*., д.т.н.*
e-mail: vladim.gorodetsky@gmail.com
АО «Эврика»

1. ВВЕДЕНИЕ

Искусственный интеллект (ИИ) на современном этапе находится на новой волне активного интереса со стороны как научного, так и индустриального сообщества, работающего в области информационных технологий (ИТ). Активный интерес к ИИ сопровождается заметной активизацией научных и прикладных разработок, появлением новых трендов, тенденций и даже научных направлений, технологий и классов приложений [1, 2]. Среди них, заметно выделяется научное направление, которое можно назвать *сетевой ИИ*. Кибер-физические системы и системы, эксплуатирующие парадигму Интернета вещей, в комбинации с технологиями периферических вычислений (англ. *edge computing*) формируют в настоящее время наиболее актуальный класс приложений сетевого ИИ. В частности, к этому классу приложений относится большинство критических и военных приложений.

Характерной особенностью приложений этого класса является то, что в них, как правило, управляемый объект состоит из большого числа *автономных* физических, виртуальных и, возможно, социальных объектов, каждый из которых обладает встроенными вычислительными и коммуникационными возможностями. Автономные объекты, составляющие такую систему, чаще всего, являются достаточно

простыми и обладают ограниченным набором способностей. Однако, за счёт разнообразия способностей, интенсивного взаимодействия и *группового поведения*, координируемого системой *группового управления*, итоговая система может оказаться в состоянии решать самые сложные задачи и проявлять интеллектуальное поведение. В таких системах множество автономных объектов существует в общей программно-коммуникационной среде, называемой инфраструктурой, которая преобразует это множество объектов в единую систему с общим информационным пространством данных и знаний.

Однако, реализация возможностей сетевого интеллекта существенно сдерживается большим пробелом теоретических и прикладных разработок в области группового управления. В то же время число приложений, для которых сетевой ИИ и групповое управление является, возможно, единственной парадигмой эффективной реализации, в настоящее время велико и число растёт. Основным двигателем роста этих потребностей является *автономная* групповая робототехника, в которой автономные, обычно. мобильные роботы одной группы могут быть физическими и/или виртуальными.

Примерами приложений сетевого ИИ являются автономное роботизированное сборочное производство, B2B-сети предприятий, совместно производящих сложный продукт, система дистанционного зондирования наземной поверхности, составленная из большого количества взаимодействующих малых спутников, приложения из области подводной робототехники, например, инспекция заданной области подводного пространства, выполняемая группировкой автономных подводных роботов. В последние годы множество таких приложений продолжает расширяться. Например, в связи с развитием технологии смарт-контрактов, использующей структуру блокчейна, актуальной становится задача автономного мониторинга процессов исполнения условий сложного контракта, выявления юридических, временных и других нарушений и условий контракта и управление его исполнением по времени. К аналогичной структуре, а, значит, и к аналогичной постановке сводится задача мониторинга и управления проектами. То же самое касается задачи онлайн-планирования и управления процессами распределения задач многопроцессорного суперкомпьютера для повышения коэффициента использования его процессоров. Практически необозримое множество подобных приложений возникает в области распределённых систем защиты от распределённых атак в киберпространстве. Существуют и, скорее всего, будут появляться новые классы актуальных приложений, в которых будет необходимо решать задачи автономного группового управления

в реальном времени. Военные приложения, дальний космос, вредные среды, природные катастрофы и другие являются и будут источниками новых приложений в области автономного группового управления.

Целью данной работы является анализ, обоснование и формулировка базовых принципов, которым важно следовать при создании теоретических моделей и прикладных технологий группового управления. Далее в работе приводятся краткие сведения о современном состоянии исследований в области группового управления, в частности, в России. Затем последовательно формулируются, анализируются и обосновываются базовые принципы построения автономных систем группового управления. Они формулируются на основе анализа современной научной литературы и собственного опыта исследований и разработок в области группового управления. К основным принципам отнесены поведенческая парадигма моделирования, многоагентная архитектура, автономность, самоорганизация управления и баланс локального и глобального контекста в ней, поддержание ситуационной осведомлённости автономных объектов и активные структуры представления знаний. Существуют и другие принципы, которые нужно иметь в виду, например, отказоустойчивость коммуникационной среды, распределённая координация, протоколы оперативного группового управления с *обратной связью*, автономный анализ работоспособности и обнаружение и обработка исключительных ситуаций. В заключении по работе приводится краткое резюме и оценка результатов.

2. КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ О СОСТОЯНИИ ИССЛЕДОВАНИЙ

Современная постановка задач группового управления была сформулирована в середине 1980-х годов. Её предшественники – это теория игр, теория автоматов (проблемы целесообразного поведения автоматов, иерархический принцип построения сложных систем), и математические методы в биологии. В русскоязычной литературе наиболее значимые работы по этой тематике приведены в [3-7]. Эти работы использовали вероятностные модели адаптивного поведения коллективов автоматов в средах с ограничениями.

Современная постановка задач группового управления обычно использует многоагентную модель и рассматривает модели *командного* поведения и группового управления автономных агентов группы, в которой агенты подчиняют свои индивидуальные цели общей групповой цели. К концу 1990-х годов было предложено несколько теорий группового управления в командах агентов, однако только две

из них сформировали теоретический базис для последующих моделей и инструментов. Одна из них, "Теория общих намерений" (англ. *Joint Intention Theory*) [8], формулирует базовые понятия и общие рамки командного поведения и взаимодействия автономных агентов и, что очень важно, требования к информационному обмену агентов команды для поддержания их ситуационной осведомлённости в форме предметно независимого *протокола общих намерений* [8, 9]. Он используется для согласования обязательств (задач) отдельных агентов в процессе исполнения автономной миссии. Другая теория, «Теория общих планов» (англ.*"Shared Plans Theory*) [10] использует понятия группового плана, под которым понимается план совместного выполнения заданного множества действий. Этот план включает действия отдельных агентов, согласованные с множеством условий (время, место, ресурсы и т.д.) и содержит дополнительно компоненты, которые преобразуют множество автономных агентов в единую команду. Обе теории имеют строгое математическое обоснование, но обе они до сих пор имеют программные реализации только на уровне простых прототипов уровня доказательства работоспособности концепции (англ. *proof of concept*).

В части архитектур, моделей и инструментальных программных средств поддержки теоретических моделей группового поведения агентов разными авторами использовались различные комбинацию идей обеих теорий. Наиболее известны две модели, которые имеют инструментальные средства реализации демонстрационного уровня – это модели STEM/Teamcore [11] и RETSINA [12]. Существуют и другие варианты реализаций моделей командной работы, все созданные до 2000 г. К ним относятся, например, модели COLLAGEN, GRATE, ADEPT, модель COOL и т.д. Однако они, в основном, не имеют инструментальной поддержки, и в литературе не найдены сведения об опыте их программной реализации и практического использования. Оба инструментария RETSINA [12] и Teamcore [13] в течение долгого времени рассматривались в качестве мировых лидеров в области теории и приложений моделей командной работы агентов. Однако, несмотря на многолетнюю их финансовую поддержку со стороны DARPA и однозначную ориентацию на военные приложения, их разработка была прекращена в начале 2000-х годов, поскольку они не смогли доказать свою практическую реализуемость из-за вычислительной сложности BDI-моделей знаний и моделей рассуждений, представленных в терминах модальных и темпоральных логик.

Тем не менее, обе названные теории и поддерживающие их инструменты оставили значительный след в области группового

управления. Это касается, в частности, протокола общих намерений, применения ментальных и поведенческих компонент (BDI-компонент) моделей поведения агентов и их взаимодействий, использования понятия ситуационной осведомлённости агентов, разделение архитектуры агентов на две компоненты, а именно предметно зависимую и предметно независимую, в которых предметно независимая часть агента играет роль обёртки (англ. *wrapper*) для предметно его зависимой части. Именно она наделяет прикладного агента способностью к командной работе. Важную положительную роль сыграли также неудачные решения в части выбора типа моделей и другие уроки, извлечённые из них. Подробный обзор исследований и разработок этого периода можно найти в работе [14].

Период примерно с 2000 по 2010 гг. характерен застоем в области развития теоретического базиса группового управления, когда исследователи разных стран безуспешно пытались адаптировать описанные выше модели к практическим потребностям. Это застой явно отмечен в одной из недавних работ известного немецкого специалиста в области группового поведения агентов [15]. В последнее десятилетие, однако, наблюдается заметное повышение интереса исследователей и разработчиков к проблеме группового управления, а также активизация работ по групповому управлению как в России, так и за рубежом. Этот интерес обусловлен, главным образом, потребностями индустрии критических приложений и развитием новых технических предпосылок к практическому использованию коллективной робототехники. В последние годы активизация исследований и разработок в области группового управления – это устойчивая и, видимо, долговременная тенденция, обусловленная потребностями цифровой индустрии [15].

В России аналогичные исследования ведутся не столь интенсивно, хотя и имеется твёрдая убеждённость российского научного сообщества в важности, актуальности и в необходимости активизации этих исследований. Лидерами в этой области, по крайней мере, в части теоретических исследований являются группы од руководством Карпова В.Э. (Курчатовский институт), Каляева И.А. (ЮФУ), Панова А.И. (МФТИ) Кулинича А.А. (ИПУ) и др. Некоторые базовые публикации российских специалистов в последнее десятилетие по теме группового управления представлены списком [16-20]. Однако большая их часть относится к роевым моделям и био-инспирированным методам группового управления, которые выпадают из классической постановки задачи командного поведения автономных объектов.

В отличие от этих работ, авторы [21-22] рассматривают постановку задачи группового управления в среде с противодействием применительно к группам пилотируемых самолётов. Особенности постановки задачи этого класса автором работы [43] характеризуются так: «Такие системы ориентированы на поддержку процесса решения экипажем антропоцентрического объекта (летательного аппарата, обитаемого подводного аппарата и т.п.) задач оперативного целеполагания и конструирования способа достижения оперативно назначаемой цели. Речь идёт, таким образом, о тактических задачах, которые решаются с обязательным участием экипажа» [43]. Другими словами, в этой работе уровень автономности выбора группового управления ограничен уровнем локального (тактического) управления.

Данная работа обобщает двадцатилетний опыт теоретических исследований и разработок в области группового управления, выполненных под руководством автора, в таких задачах, как

- распределённая групповая атака и групповая защита, выполняемые командой агентов, работающих в киберпространстве [23];
- автономное групповое управление движением самолётов в воздушном пространстве трёх аэропортов Нью-Йорка в ситуации, когда в этом пространстве находится самолёт с пассажирами, захваченный террористами, который не подчиняется правилам ИКАО, не учитывает особенностей структуры этого воздушного пространства и не подчиняется командам диспетчера [24];
- инспекция подводного пространства в акватории морского порта командой автономных подводных роботов [25];
- автономное групповое управление поведением в кластере малых спутников распределённой системы наблюдения [26];
- командная работа автономных роботов, выполняющих сборку сложного изделия на производстве [27].

Основные результаты теоретических исследований и модели автономного группового управления и группового поведения на основе принципов самоорганизации, выполненные под руководством автора, опубликованы в [28-33].

3. БАЗОВЫЕ ПОНЯТИЯ АВТОНОМНОГО ГРУППОВОГО УПРАВЛЕНИЯ

Хотя история исследований в области группового управления насчитывает уже порядка трёх с половиной десятилетий, нельзя утверждать, что к настоящему времени в этой области уже сложилась устойчивая терминология, но необходимость её очевидна. Она важна не только с точки зрения единого понимания терминов исследователями и

разработчиками, но и с технологической точки зрения, поскольку для приложений Интернета вещей важно единообразное понимании семантики (англ. *shared semantics*) данных, полученных из многих источников и порождённых приложением, всеми многочисленными объектами системы. Решение этой задачи достигается созданием единого информационного пространства данных и знаний, концептуальный (семантический) базис которого обеспечивается общей онтологией, т.е. единым пониманием и онтологическим представлением семантики таксономии понятий проблемы «групповое управление».

Заметим, что попытки построения такого базиса уже неоднократно предпринимались, В частности, онтологии группового управления, главным образом, в задачах коллективной робототехники, рассматриваются в [34-39]. Но они больше касаются индивидуального поведения роботов и различаются используемой терминологией, которая при этом частично имеет предметную ориентацию.

Поскольку в настоящей работе онтология группового поведения не является предметом исследований, приводимая ниже терминология имеет целью только уточнить смысл терминов в рамках данной работы. Некоторые их них далее анализируются детально:

- *Группой* называют две или более автономные сущности (физические, виртуальные, социальные), которые зависимы в некотором контексте, например, они совместно решают ту или иную задачу, могут конкурировать за общий ресурс и т.п.
- *Индивидуальная цель* автономного объекта в группе – это множество или последовательность состояний, которые он должен достичь, решая задачи, возложенными на него при работе в группе.
- *Индивидуальное поведение* автономного объекта в группе – это последовательность задач, которые он решает в составе группы.
- *Групповая цель* –структурированное множество состояний, которое должно быть достигнуто группой; при этом любая индивидуальная цель автономного объекта группы является компонентой дерева целей команды, т.е. является частью общей цели команды.
- *Групповым поведением* называют *структурированное* множество индивидуальных поведений автономных объектов группы, скоординированных в интересах достижения групповой цели.
- *Групповое управление* – это управление индивидуальными целями и индивидуальным поведением автономных объектов группы, направленное на достижение групповой цели.

- *Командой* называют такую группу автономных объектов, в которой индивидуальные цели и поведение объектов группы полностью подчинены достижению групповой цели.
- *Автономное управление* – это вариант группового управления, в котором групповая цель и, возможно, структурированное множество задач (сценарий миссии), которые должны быть решены для достижения групповой цели, задаются извне, но другие задачи, в частности, формирование команды для решения поставленной задачи, распределение задач между участниками команды и оперативное управление исполнением задач решаются средствами самой группы без внешнего вмешательства.
- *Сценарий действий* – структурированное множество действий, которые должна выполнить группа для достижения общей цели.
- *Сценарий группового поведения* (сценарий миссии) команды автономных объектов – это сценарий действий с назначенными исполнителями отдельных действий.
- *Групповые обязательства* участника команды – это список задач, которые он должен выполнить в сценарии группового поведения.
- *Групповые соглашения* – это список условий, при которых все участники команды *должны* отказаться от своих групповых обязательств.
- *Протокол общих намерений* [9] – распределённый предметно независимый алгоритм, выполняемый участниками команды; при исполнении этого протокола они получают и подтверждают свои групповые обязательства и намерения участвовать в их исполнении до тех пор, пока не станет истинным хотя бы одно условие соглашений (когда исполнение сценария прекращается).
- *Ситуация* – некоторая динамическая характеристика управляемой системы, которая описывает то, что *происходило*, *происходит* и *может* происходить в системе в будущем.
- *Ситуационная осведомлённость члена команды* – информация, которой он владеет; её состав определяет его возможность выполнять им свои групповые обязательства и соглашения в сценарии группового поведения и координировать свои действия с действиями других членов команды.

Введённые термины используются далее при описании принципов построения систем автономного группового управления, где их содержание раскрывается подробно и иллюстрируется примерами.

4. ПРИНЦИПЫ АВТОНОМНОГО ГРУППОВОГО УПРАВЛЕНИЯ

4.1. Поведенческая парадигма и сценарные представления группового поведения

В настоящее время в ИИ используется несколько парадигм для построения формальных моделей приложений. В частности, в моделях и системах ИИ рассматривают следующие виды интеллекта[1]:

- *символьный интеллект* (англ. symbolic) – задаётся моделями и языками формальных систем (множествами символов и отношений над ними), например, моделью исчисления предикатов;
- *коннекционистский интеллект* (англ. connectionist) – акцентирует внимание на связях между объектами и их сетевых взаимодействиях; типовыми представителями такого ИИ являются нейросети;
- *интеллект, встроенный в окружающую среду* (англ. situated) – это интеллект систем, в которых окружающая среда является их неотъемлемой частью; такие системы воспринимают среду, активно взаимодействуют с ней и воздействуют на неё, например, могут запускать в ней процессы (веб-агентов, например), населять среду ботами; типичный пример – это многоагентные системы (МАС):
- *интеллект, инспирированный природой* (англ. nature inspired) – он использует модели и имитирует механизмы, заимствованные у природы, у биологических и эволюционных систем;
- *социальный интеллект* (англ. social) – это интеллект сообществ людей, представленный в терминах их социальных взаимодействий; он проявляется, например, при коллективном принятии решений;
- *мета-синтетический интеллект* (англ. meta-synthetic) – это ИИ, который получается в результате синтеза человеческого и любого другого интеллекта, который окружает человека, в частности, интеллекта, скрытого в данных и в поведении, социального, сетевого интеллекта и интеллекта природного происхождения, т.е. он получается в результате мета синтеза различных видов интеллекта.

Задачи группового управления нельзя отнести однозначно к одному из перечисленных вариантов ИИ. Например, в разделе 2 говорилось о моделях группового управления на основе интеллекта, инспирированного природой. Сетевые взаимодействия и сетевой интеллект всегда являются неотъемлемыми компонентами моделей

[1] Обратим внимание на то, что приведённый список не является классификацией; он представляет множество точек зрения на ИИ.

группового управления. В коллективной робототехнике человек часто является компонентой системы, а этот случай является примером мета-синтетического ИИ. Однако значительное число приложений, и даже наибольшая их часть, относится к системам ИИ, встроенного в окружающую среду и основанного на взаимодействиях.

Основное отличие задач группового управления от большинства традиционных задач ИИ состоит в том, что в них объектом управления является множество индивидуальных поведений автономных объектов в интересах групповой цели. Поэтому в основе решения задач группового управления должны быть положены *поведенческие модели* ИИ и *принципы* построения систем, основанных на поведении (англ. behavior-based systems, BBS) [46]. В этой парадигме компонентами модели являются паттерны поведения, которые имеют определённую продолжительность во времени. Сетевые взаимодействия между автономными объектами между собой и их взаимодействия с внешней средой рассматриваются тоже как паттерны поведения. С точки зрения группового управления поведенческая модель представляется последовательностью дискретных событий, которые порождаются паттернами поведения автономных объектов.

Одно из главных достоинств поведенческой модели ИИ состоит в том, что в ней *нет централизованного представления внешнего мира.* В ней учёт состояния внешнего мира производится с помощью обратной связи от результатов исполнения принятого сценария, которая используется для корректировки плана в соответствии с заданным законом управления. В работе [46] базовые принципы построения систем, основанных на поведении, формулируются так:

1. Поведение реализуется не как программа управления, а как закон управления с обратной связью, которая учитывает динамику среды, ошибки и задержки выполнения действий сценария миссии автономными объектами, выхода объектов из строя, и т.д.
2. Каждый автономный объект выполняет замкнутый цикл вычислений от получения сообщений и сенсорной информации и до подачи сигналов на свои исполнительные органы. При этом управление выполнением сценариев поведения, и координация в процессах оперативного управления выполняется с помощью протоколов.

Система, использующая поведенческую парадигму, если она построена правильно, активно использует информацию, формируемую в процессах взаимодействия автономных объектов между собой и со средой. Оба типа взаимодействий являются источниками сигналов

обратной связи «по состоянию», а не «по времени», и такое управление может быть сделано устойчивым [46].

В данной работе принята «программная» модель группового управления (план), задаваемая с помощью сценария группового поведения[2] (сценария миссии), В нём каждому действию система управления ставит в соответствие автономный объект, который это действие должен исполнять в соответствии с планом. Этот план является компонентой группового управления, которая корректируется в процессе исполнения миссии на основе управления с обратной связью.

Сценарий действий, в общем случае, может задаваться иерархической моделью, которая представляется моделью верхнего уровня и рекурсивным множеством подстановок. Каждая из них заменяет в сценарии некоторый символ действия сценарием, так что в после выполнения всех подстановок сценарий будет представлен *частично упорядоченным* множеством элементарных (неделимых) действий. где термин «порядок» означает порядок следования во времени. Ниже представлен пример сценария, заданного таким образом:

$$\boldsymbol{AX} = \{\boldsymbol{X},\ >\} = \{\boldsymbol{X},\ \{(X_4{>}X_1),(X_3{>}X_1),\ (X_3{>}X_2),\ (X_5{>}X_2),\ (X_6{>}X_2),\ (X_7{>}X_4),\ (X_8{>}X_3),\ (X_9{>}X_3),\ (X_{10}{>}X_5),\ (X_{10}{>}X_6),\ (X_{12}{>}X_9),\ (X_{11}{>}X_{10}),\ (X_{12}{>}X_{11})\}\} \quad (1)$$

На рис.1 этот сценарий представлен графом. В нем задано 12 узлов (действий) и порядок их выполнени.

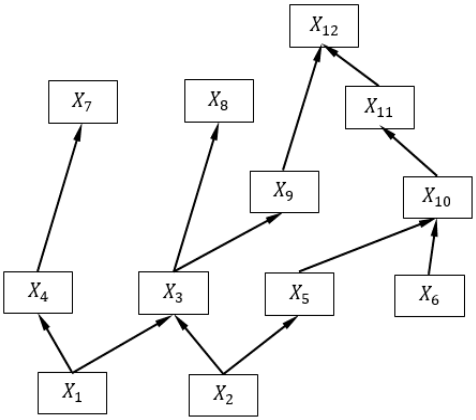


Рис.1. Пример представления сценария действий в виде графа

[2] В общем случае сценарий миссии может формироваться онлайн.

При исполнении сценария всё множество его действий в произвольный момент времени t можно разделить на три части:

- действия, которые уже исполнены; обозначим это подмножество символом $\boldsymbol{X}(\leq t)$;
- действия, которые исполняются, $\boldsymbol{X}(t)$;
- действия, исполнение которых не начато, $\boldsymbol{X}(\geq t)$.

Пример такого разбиения множества действий на три категории показан на рис.2.

Рис.2. Представление сценария действий в виде графа с разделением его узлов в зависимости от их текущих статусов

Информация о текущей ситуаци при исполнения сценария действий является критически важной для процессов оперативного группового управления, однако граф сценария действий подобной информации не имеет, и потому он не в состоянии представить динамику процесса исполнения сценария, в частности, выделить три указанные типа подмножеств действий.

Чтобы преодолеть эту проблему, в [27] предложено *расширение* графа отношения частичного порядка (рис.1), которое позволяет представлять динамику его эволюции. С этой целью в графе сценария для каждого действия X_j вводится дополнительный узел F_k, следующий за этим действием, и ему в соответствие ставится атрибут, со значением *текущий статус действия,* предшествующего ему. Узлы графа такого типа будем называть *СПД-узлами* (аббревиатура от названия атрибута узла – «Статус Предшествующего Действия»). На рис.3 показано, как

получается это расширение для каждого узла. Обратим внимание, что для преобразования расширенного графа сценария к стандартной форме, в которой должен быть один начальный и один конечный узел, обычно вводятся одноименные фиктивные узлы, и для них тоже вводятся СПД-узлы, как представлено на рис.3. На рис.4 показан расширенный граф, полученный из графа сценария действий, представленного на рис.1

Обсуждение, приведённое в данном подразделе, обосновывает тезис о том, что использование поведенческой модели ИИ и интеллекта, встроенного в окружающую среду, является важным принципом создания систем группового управления.

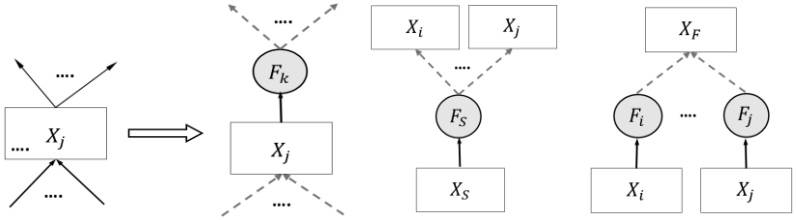


Рис.3. Преобразование графа сценария к расширенной форме: a) для произвольного узла исходного графа; b) для фиктивного начального узла X_S; c) для фиктивного финального узла X_F.

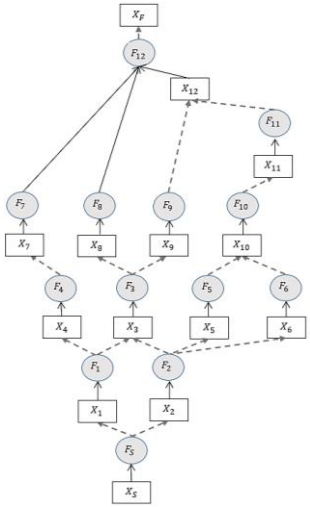


Рис.4. Расширенный граф сценария действий рис.1

4.2. Многоагентная архитектура

Для построение моделей группового поведения и систем группового управления, основу которых составляют интенсивные взаимодействия автономных сущностей в сетевой среде, с самого начала был сделан выбор в пользу модели интеллекта, встроенного в окружающую среду, который реализуется с помощью модели многоагентной системы (МАС) (см. раздел 3.2). Причины такого выбора кроются в свойствах агентов и МАС, которые идеально удовлетворяют требованиям поведенческих моделей систем группового управления.

В модели МАС агент есть автономная программа, способная к целенаправленному поведению в динамической непредсказуемо изменяющейся внешней среде. В качестве ключевых свойств агента выделяются его автономность и способность к проактивному поведению. *Автономность* агента понимается как его способность работать для достижения поставленной цели без вмешательства человека или других систем и при этом выполнять самоконтроль над своими действиями и внутренним состоянием. Способность агента к *проактивному* поведению означает, что при выборе поведения агент принимает во внимание не только информацию, полученную им онлайн из внешнего мира, но и предысторию своих действий и состояний внешней среды, которые нашли отражение в его текущем внутреннем состоянии. Например, агент может генерировать сообщения и посылать их другим агентам даже при отсутствии входных событий, в частности, по нарушению таймаута.

МАС определяется как сеть слабо связанных решателей (агентов) частных проблем, которые существуют в общей среде и взаимодействуют друг с другом и со средой для достижения тех или иных общих целей системы и/или своих частных целей. Взаимодействие агентов может выполняться либо напрямую – путём обмена сообщениями, либо неявно, когда одни агенты воспринимают присутствие других агентов и их поведение через изменения во внешней среде (как следствие воздействия на неё других агентов), в которой они существуют. Обмен сообщениями выполняется либо в форме диалогов, либо в форме протоколов, в исполнение которых может вовлекаться произвольное число агентов. Способность к обмену сообщениями определяет ещё одно важное отличительное свойство агентов, которое называют *интерактивностью*. Интерактивность определяется как способность агентов оказывать то или иное влияние друг на друга, и именно в этом смысле сеть агентов МАС называют «слабо связанной». «Из интерактивности и автономности вытекает

способность группы агентов генерировать решение сложных задач с помощью побочных эффектов от совместных скоординированных действий» [40], например, через эмерждентность.

Из описания свойств агента следует, что его модель и модель МАС идеально подходят для формализации системы, состоящей из множества автономных объектов, координирующих своё групповое поведение. В концепции МАС каждому автономному объекту сети ставится в соответствие автономный программный агент. Этот агент, с одной стороны, управляет *внутренним поведением* программных и/или аппаратных компонент узла сети в различных случаях использования (при исполнении узлом сети агентов той или иной роли). С другой стороны, этот агент является представителем своего узла во «внешнем мире», т.е. в сети программных агентов, где его главная функция – это взаимодействие с агентами других узлов сети путём обмена сообщениями с целью координация индивидуального поведения своего узла в различных задачах и подзадачах, которые решаются совместно какой-то группой узлов сети. Это поведение агента принято называть его *внешним поведением*. Обычно внешнее поведение агента – это упорядоченная последовательность его обменов сообщениями в диалогах или протоколах.

Важно отметить, что в настоящее время в классе приложений группового управления для модели и технологии МАС альтернативы просто нет. Это относится также и к модели цифрового двойника соперника, которую необходимо иметь в том случае, если команда агентов оперирует в среде с противодействием и использует цикл Бойда для прогнозирования фаз этого цикла соперничающей стороны [41]. Дополнительным обоснованием для такого утверждения является то, что с самого начала развития теории группового поведения и группового управления это научное направления рассматривалось как частная проблема теории и практики МАС.

Вышесказанное служит достаточным обоснованием тезиса о том, что использование МАС-модели группового управления и МАС-архитектуры соответствующего программного продукта является одним из базовых принципов, которому имеет смыл следовать при создании систем группового управления.

4.3. Автономность

Автономность – это ключевое свойство групп мобильных объектов, которые совместно выполняют некоторую миссию. Действительно, группа автономных объектов в состоянии решать значительно больше более сложных задачи по сравнению с теми

группами, которые не являются автономными или обладают ограниченным уровнем автономности. Действительно, на практике существует много задач, в которых использование операторов или телеоператоров просто невозможно. Автономные системы более оперативно разворачиваются и приводятся в рабочее состояние. Их легче интегрировать в цифровые инфраструктуры поддержки групповой работы и модифицировать. Это касается и групповой робототехники на сборочном производстве, и групповой работы беспилотных воздушных, подводных и наземных роботов разного назначения. Автономность особенно существенна в ситуациях с ограниченными возможностями коммуникационной среды, например, под водой – из-за ограниченной полосы пропускания. Автономность становится ключевым свойством при использовании систем на больших расстояниях от базы, когда критически становятся последствия случайных возмущений и ошибок каналов связи. Автономность очень важна и тогда, когда объекты оперируют в сложной непредсказуемой внешней среде, имея много различных сенсоров для её восприятия, если при этом решение сильно зависит от состояния внешней среды, а оператор не в состоянии воспринимать её многомерную динамику и управлять ситуацией с учётом этой динамики. Автономная система с управлением на основе обратной связи может, тем не менее, успешно справиться с этой задачей.

В работе [42] утверждается, что именно автономные подвижные объекты и их группы в состоянии реализовать свойства, которые требуются стратегическими планами развития вооружений и именно автономность есть надкжный путь трансформации вооружений.

Но автономные системы всегда сложны, и именно по этой причине в литературе активно обсуждается вопрос о балансе уровня автономности мобильных объектов, и сложности и надёжности системы поддержки автономности. Это соотношение в США регулируется стандартами NIST (National Institute of Standards and Technology), а в оборонном ведомстве имеется постоянная рабочая группа, которая регулирует этот вопрос, начиная с 2004, когда была разработана первая версия этого стандарта. Однако, все современные варианты уровней автономности касаются одиночных подвижных автономных объектов, в особенности, беспилотных автомобилей и дронов. В официальных документах США для военных приложений рассматривается несколько уровней автономности, каждый из которых характеризуется определённым распределением задач между человеком-оператором или телеоператором и системой управления группировки объектов. Однако,

пока нет единого мнения по поводу того, как и с какой детальностью эти уровни автономности задавать [42].

Из приведённого обсуждения следует, что автономность является важным и неотъемлемым свойством систем группового управления автономными мобильными объектами, и при создании таких систем принцип автономности должен рассматриваться в числе важнейших принципов построения систем группового управления.

4.4. Самоорганизация

Самоорганизация как принцип построения сложных систем имеет непосредственное отношение к задачам автономного группового управления. Более того, без активного использования самоорганизации на разных этапах и в разных случаях использования систему группового управления построить невозможно. Покажем это на примере.

Групповое управление исполнением автономной миссии обычно включает в себя ряд типовых подзадач, которые решаются группой автономно в процессе *формирования* сценария группового поведения и оперативного *управления* его исполнением до завершения миссии. Рис.5 иллюстрирует суть этих задач и порядок их исполнения в простейшем случае. Дадим краткие пояснения к этому рисунку.

Входная информация системы группового управления должна, как минимум, включать в себя данные о групповой цели команды автономных сущностей (о состояниях, которые должны быть достигнуты в миссии) и информацию, которая касается целеполагания, например, в терминах сценария групповых действий, представленного в том или ином виде, например, в виде частично упорядоченного множества действий, ведущих к достижнеию цели, как это представлено на рис.1, 2. Исполнителями действий являются автономные сущности, каждая из которых, в общем случае, способна выполнять лишь подмножество действий сценария. Рассмотрим типовую цепочку задач, которые должны решаться автономно в автономной миссии (рис.5).

Задача 1. Выделить из всего доступного множества автономных объектов (малых спутников, например) подмножество потенциальных исполнителей сценария миссии (рис.5). Например, в задаче космического наблюдения земной поверхности группировкой малых спутников исполнителями задания на сбор информации могут быть любые спутники группировки, которые (1) не загружены полностью в заданном временном интервале исполнением других сценариев, и (2) обладают способностями, которые требуются для выполнения тех или иных действий группового задания.

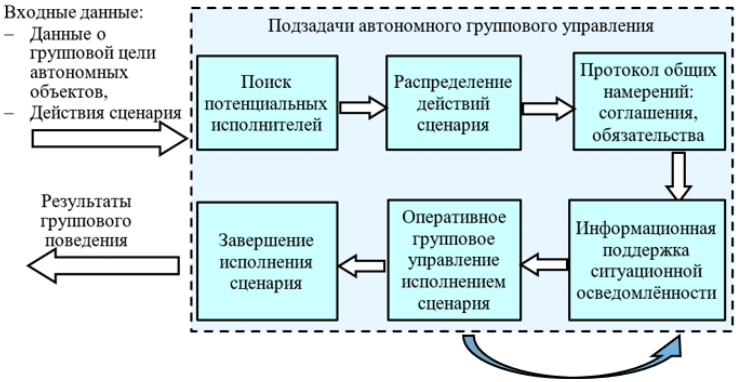


Рис.5. Типовая технология решения задачи автономного группового управления (упрощённый вариант)

Задача 2. Определить конкретных исполнителей действий сценария. Результатом её решения должнв быть конкретная *команда* исполнителей групповой работы, назначение конкретного исполнителя для решения задач сценария, а также групповые обязательства каждого участника команды в виде последовательности действий, которые он должен выполнить в процессе исполнения группового сценария.

Задача 3. Выполнить протокол общих намерений, который инициируется одним из членов команды. Этот протокол имеет целью рассылку остальным членам команды их групповых обязательств и получить от них подтверждения (готовность исполнять) эти обязательства в соответствии решением Задачи 2. Второй компонентой протокола является информация о соглашениях и получение от членов команды подтверждений об их готовности следовать этим соглашениям.

Задача 4. Обеспечение ситуационной осведомлённости членов команды исполнителей миссии (см. об этом подраздел 4.5). Эта задача обычно решается как компонента протокола оперативного управления исполнением сформированного сценария групповой работы, которая с помощью генерации событий и обмена информацией между компонентами системы реализует распределённую операционную семантику формальной модели группового поведения.

Задача 5. Автономное оперативное управление исполнением сценария группового поведения в реальном времени. Обычно такие задачи называются задачами диспетчерского управления. Эта задача имеет целью оперативное управление поведением группы автономных

объектов в соответствии в текущим сценарием и принятым планом распределения работ между участниками группы. В поведенческой модели группового управления эта задача решается на основе обратной связи по состоянию исполнения текущего сценария миссии.

Задача 6. Контроль выполнения условий окончания миссии, которые составляют содержание соглашений. Заметим, что одним из таких условий соглашения является как раз достижение командой целевого состояния или прекращение исполнения миссии по другим условиям, например, ввиду обнаруженной недостижимости цели.

Не останавливаясь на деталях алгоритмов решения задач 1 – 6, которые могут оказаться сложными, часто зависят от специфики предметной области (спутники, дроны, наземные или подводные роботы, сборочные или складские роботы, B2B-производства и т.д.), а также от выбора разработчика системы группового управления, отметим, что задачи 2, 3, 4 и 5 могут эффективно решаться только с использованием принципов самоорганизации. Примеры таких алгоритмов и их обоснование можно найти в [24-33]. Обзор алгоритмов самоорганизации и большое число примеров их использования дано в [43-45]. В разделе 3.7 приводится несколько примеров использования механизмов самоорганизации в модели активных знаний.

Отметим, что использование алгоритмов самоорганизации усиливает роль МАС как моделей систем группового управления, как архитектуры программного продукта и как их технологии разработки. Это утверждение связано с тем, что уже в течение более 30 лет теория и методы самоорганизации сложных распределённых систем развиваются в рамках МАС-моделей и технологий. Детали синергии распределённой самоорганизации и МАС можно найти в [43-45].

Обсуждение роли механизмов самоорганизации в задачах и системах группового управления, приведённое в данном подразделе, свидетельствует о том, что самоорганизация является одним из важных принципов построения автономных систем группового управления.

4.5. Ситуационная осведомлённость

В соответствии с протоколом общих намерений каждый агент команды имеет обязательства – список действий, которые он должен выполнить в общем сценарии миссии с заданными ограничениями на порядок исполнения множества действий сценария, и действия, которые он должен выполнять в соответствии с соглашениями. Понятие ситуационной осведомлённости – это об информации, которой должен обладать каждый агент команды исполнителей миссии, для того чтобы успешно координировать своё индивидуальное поведение в рамках

группового поведения при исполнении сценария миссии. Другими словами, существо проблемы ситуационной осведомлённости и круг задач, которые нужно решать в её рамках, включают в себя алгоритмы оценки ситуационной осведомлённости, методы распределения информации между агентами группы и организации информационного обмена между ними при оперативном управлении исполнением сценарии миссии, которые обеспечивают поддержание нужного уровня ситуационной осведомлённости всех исполнителей миссии. Если говорить кратко, то суть этой проблемы – это ответить на вопрос о том, что должен знать каждый агент (какой информацией он должен обладать) для того, чтобы однозначно определять своё *очередное действие* в групповом поведении в рамках сценария миссии и в соответствии с соглашениями, а также *моменты времени*, когда он должен начинать исполнение назначенных действий.

Понятие ситуационной осведомлённости (англ. situational awareness, далее SA) в литературе по управлению появилось в 1988 г. и формулировалось как «*восприятие* элементов окружающей среды в пределах определённого пространства и времени, *понимание* её статуса и *проекция* этого статуса на ближайшее будущее» [43]. В этом определении выделяются три компоненты процесса формирования SA, а именно *восприятие* ситуации, *понимание статуса* ситуации и *предсказание статуса ситуации* на ближайшее будущее. Это определение было введено применительно к поведению лётчика, и если принимать во внимание, что понимание будущего развития ситуации влечёт вполне конкретное решение лётчика, то последний этап можно интерпретировать также и как этап принятия решений. Автор определения различал два аспекта понятия SA. Первый – это *процесс* формирования её оценки, который называется *оценкой ситуации*, и продукт (*результат*), который называется *статусом* ситуации. Процесс оценки ситуации и его результат должны итеративно чередоваться во времени, формируя в итоге последовательность пар <процесс, результат>, привязанных ко времени. Этот процесс определяет динамику обновления оценки SA (для принятия решений) [44].

Практически в это же время понятие SA было обобщено до понятия распределённой SA, или SA членов команды автономных объектов (англ. shared SA). [45]. Однако авторы относительно недавней публикации ([44], 2016 год) отмечают, что к их удивлению, до указанного времени основное внимание уделяется индивидуальной S, а распределённый вариант этого понятия исследован совсем слабо.

Распределённая ситуационная осведомлённость определяется той же формулировкой, но касается восприятия, понимания и предсказания ситуации с целью последующего управления ситуацией каждым агентом индивидуально и выбора структуры и содержания процесса обмена информацией между объектами команды. Таким образом, распределённая SA команды автономных объектов характеризуется множеством последовательностей пар <процесс, результат> оценки ситуации с их привязкой ко времени и к принятой структуре информационного обмена между агентами во времени. И это уже совсем другое по сравнению с индивидуальной SA.

Действительно, каждый агент команды имеет свою информацию о контексте в процессе формирования своей части общей SA команды как по составу, так и по её достоверности. В распределённой команде агентов знания отдельного агента о внешнем мире принято называть его убеждениями, но не знаниями. И этот термин введён именно для того, чтобы различать достоверные знания агента и его недостоверные знания об окружающей среде и о других агентах команды. Кроме того, восприятие внешнего мира разными агентами команды может относиться к разным моментам времени, информация может быть получена ими из разных источников, она может содержать элементы намеренной дезинформации и т.д., и т.п.

Из этого обсуждения становится ясно, что понятие распределённой SA как процесса и как результата является достаточно сложным. Становится также понятно, что это понятие имеет принципиально важное значение в автономном групповом управлении в частности, в задачах распределённой координации поведения.

Рассмотрим несколько подробнее роль (распределённой) SA в задаче автономного группового управления. Будем говорить, что агент обладает *достаточной ситуационной осведомлённостью* в некоторый момент времени, если в этот момент он обладает такой информацией, которая совместно с его способностями по обработке информации позволяет ему корректно выполнять свои обязательства и соглашения на ближайшем горизонте групповой работы.

Напомним, что SA агента команды складывается из трёх компонент информации, а именно из (1) собственной информации (информации, которую он имеет в своей памяти и получает с помощью собственных сенсоров и источников, например, из облака); (2) информации, получаемой путём обмена сообщениями с другими агентами команды и (3) информации, вычисляемой с помощью собственных программ по информации, упомянутой в (1) и (2). Это говорит о том, что достичь SA в системах группового управления

можно многими вариантами, комбинируя эти три источника информации. Самый простой вариант – это централизованное управление распределённым поведением, когда некий агент-лидер просто рассылает агентам команды события, инициирующие выполнение того или иного действия групповых обязательств агентов или соглашений. Другой прямо противоположный вариант – все агенты определяют моменты исполнения своих действий в общем сценарии поведения в полностью распределённом варианте, т.е. без обмена сообщениями. Между ними находится большое количество промежуточных вариантов, и выбор конкретного варианта можно получать решением некоторой задачи выбора или оптимизации. Этот выбор может зависеть от многих факторов и здесь имеется широкое поле научных исследований, которое ещё только ждёт своих исследователей.

Можно, однако смело утверждать, что исследования распределённой SA в системах автономного группового управления и её важной роли как принципа построения систем группового управления являются весьма актуальными и нуждаются в глубокой теоретической и прикладной проработке. Интересно также исследовать вопрос о связи распределённой ситуационной осведомлённости и CAP-теоремы (теоремы Брюэра) [47] и выводы, которые из неё следуют.

4.6. Активные знания

По определению, база знаний называется активной, если в ней возможно выполнение не только тех действий, которые явно указывает пользователь. В них могут выполняться и другие действия в соответствии с правилами, заложенными в модель знаний. Обычно активность модели знаний используется для контроля и поддержания её непротиворечивости и целостности. В некоторых случаях в модель активных знаний включают вычисление каких-то атрибутов, значения которых инициируют проактивное поведение системы. Типичным примером такой проактивности в распределённой системе являются таймауты, контролирующие корректность протекания процессов системы во времени и генерирующие те или иные управляющие действия при нарушении порогов, заданных таймаутами.

Активные знания часто оказываются очень полезными в самоорганизующихся системах. Известно, что возможности систем автономного группового управления с механизмами самоорганизации, зависят от локального контекста, доступного механизму принятия решений. Поэтому расширение доступного локального контекста процесса принятия решений с помощью активных знаний является

одним из вариантов повышения автономности распределённых систем. Продемонстрируем возможности активных знаний расширять локальный контекст принятия решений механизмов самоорганизации в моделях группового управления на примерах.

Пример 1. Механизм самоорганизации группового поведения агентов с активной моделью знаний. Предположим, что рассматривается система оперативного управления групповым поведением роботов, выполняющих сборку некоторого изделия. Пусть сборку выполняют три автономных мобильных робота с разными способностями, а сценарий сборки представлен расширенным графом, изображённым на рис.4. Пусть в МАС-архитектуре системы группового управления используются агенты трёх классов:

- *Агент робота*. Агент этого класса ставится в соответствие каждому роботу-участнику сборочного процесса. Функционал роли – управление поведением робота в сценарии сборки в соответствии с его групповыми обязательствами и соглашениями.
- *Агент узла действия* – экземпляры агентов этого класса ставятся в соответствие узлам-действиям расширенного графа сценария;
- *Агент СПД-узла* – экземпляры агентов этого класса ставятся в соответствие СПД-узлам расширенного графа сценария.

Таким образом, МАС-архитектура системы автономной роботизированной сборки представляется множеством активных сущностей – программных автономных агентов, в которое входят также агенты, представляющие сценарную базу знаний. *Агентов узлов действий* и *агентов СПД-узлов* будем использовать в качестве источников активных знаний, нужных для поддержания SA *агентов роботов* при групповом управлении исполнением сценария.

Модель ситуации в сборочном процессе описывается тремя множествами действий сценария, а именно (1) $\boldsymbol{X}(\leq t)$ (*прошлое* системы), (2) $\boldsymbol{X}(t)$ совместно с их исполнителями (ситуация в *текущий* момент t), и (3) $\boldsymbol{X}(\geq t)$ совместно с их будущими исполнителями (то, что должно *произойти в будущем*). Поддержание SA *агентов роботов* может быть реализовано парными взаимодействиями агентов сети с помощью такого информационного обмена:

1. *Агент узла действия* X_j формирует проактивно информацию о его готовности к исполнению по информации, которую он получает от *агентов СПД-узлов*, непосредственно предшествующих ему.
2. *Агент узла-действия* X_j «знает» своего исполнителя (по протоколу общих намерений) и информирует его о своей готовности к исполнению после получении информации п. 1.

3. *Агент робота* R_i, назначенный исполнять это действие, «знает» об этом (в соответствии со своими обязательствами). Он начинает исполнение очередного действия, если он свободен и имеет информацию о готовности этого действия к исполнению; иначе он ждёт эту информацию, чтобы приступить к выполнению действия.

Схема взаимодействий описанных агентов, реализующих самоорганизующийся механизм распределённой координации трёх названных агентов на парной основе, представлена на рис.6. Схема их коммуникаций и обмена сообщениями в соответствии с этим алгоритмом реализуются с помощью протокола, который детально описан в [27]. Заметим, что этот протокол является предметно независимым и применим в любой системе оперативного группового управления, если сценарий представлен структурой расширенного графа, а модели агентов – конечными автоматами с внутренними состояниями. Заметим, что при отсутствии активности знаний описанного вида задача распределённой координации поведения роботов не была бы столь простой.

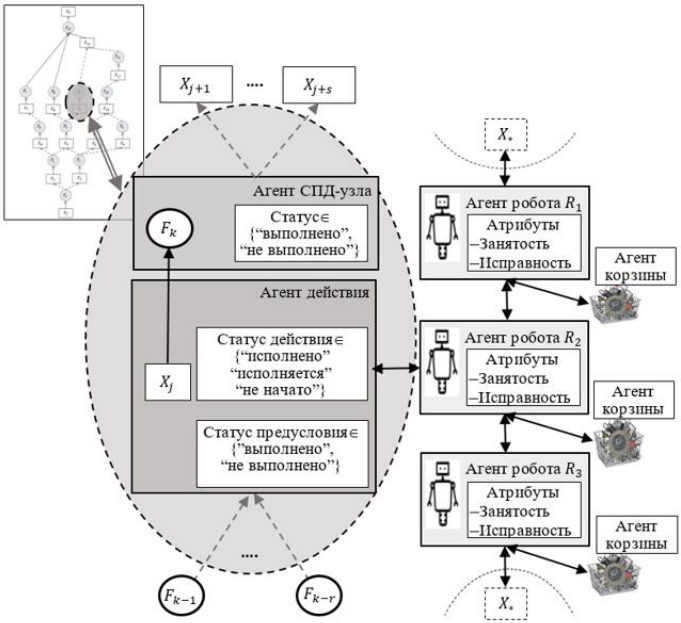


Рис.6. Агенты системы группового управления, внутренние состояния конечных автоматов, и схема взаимодействия агентов

Пример 2. Активная модель коммуникационной сети команды мобильных агентов. Ещё один пример модели активных знаний даёт концепция а*морфных вычислений*, предложенная в MIT в 2000 г. [48]. В её основе лежит модель самоорганизации, заимствованная из морфогенеза. В этой модели рассматривается векторная модель морфогена, в которой каждое его измерение может использоваться для управления тем или иным процессом, свойством и т.п. Эта модель содержит большое число одинаково запрограммированных простых устройств, которые распределены на поверхности или в некотором объёме случайным образом. Каждое устройство может воспринимать внешнюю среду и воздействовать на неё. Полагается, что устройства обладают очень ограниченными ресурсами и воспринимают весьма ограниченный объем локальной информации, а также могут выходить из строя. Полагается также, что каждое устройство имеет свою нить исполнения и способно генерировать случайные числа. Каждое устройство имеет внутреннее состояние, зависящее от его предыдущих действий. Устройства могут обмениваться сообщениями через канал связи с малой дистанцией достижимости. Устройства сети вначале ничего не знают о топологии сети связи, в ней нет централизованного источника информации, глобального времени и маяков для привязки к координатам. Коммуникационная среда поддерживает распространение цифрового поля каждого устройства, которое задаётся пространственно-зависимой структурой данных.

Оказывается, что такая весьма простая модель аморфных вычислений может использоваться для построения весьма эффективных механизмов самоорганизации за счёт распространения части глобального контекста по сети. Например, некоторое устройство-источник может посылать своим соседям своё имя и «морфоген» – число, равное нулю. Получив такое сообщение, каждый сосед пересылает его своим соседям, добавляя к значению «морфогена» с именем его источника единицу. Этот процесс продолжается до тех пор, пока не будут достигнуты все узлы сети связи. Каждое устройство может запомнить минимальное значение этого «морфогена». При необходимости устройство может использовать его как значение кратчайшего пути до узла-источника, если длина пути измеряется в терминах количества рёбер на нем. Далее каждый узел может определить «локальную ориентацию» узла, т.е. направление на источник или от него, запрашивая значение «морфогена» этого узла у соседей. Направление на источник определяется тем узлом (или узлами), в котором значение «морфогена» целевого узла имеет минимальное значение. Аналогично направление от источника

соответствует направлению на узлы со значением «морфогена» на единицу больше, чем собственное его значение.

Если в качестве источников цифрового поля используются агенты системы группового управления, то информацию о «локальной ориентации» узла сети на источник агент любого узла может получить путём опроса соседних узлов сети. Если источник является адресатом сообщения, то в результате этого опроса каждый узел может динамически определять первый участок маршрута передачи сообщения этому адресату. Далее так могут поступать и последующие узлы маршрута от источника к адресату. В итоге искомый маршрут передачи сообщения будет сформирован автоматически с помощью модели самоорганизации на основе аморфных вычислений.

Этот пример показывает важную роль активных знаний в решении задачи адресации сообщений в системах группового управления с мобильными объектами и ограниченной дальностью коммуникаций. Заметим, что в этом случае локальный контекст узла сети расширяется за счёт цифрового поля, которое доставляет в каждый узел распределённую информацию о глобальной связности коммуникационной сети.

Пример 3. Адаптивная реконфигурация плана исполнения сценария. При описании модели аморфных вычислений было указано, что информация, которую распространяет по сети морфоген, может быть различной и может носить векторный характер. Это может быть использовано для адаптивной реконфигурации плана исполнения сценария группового поведения по обратной связи о состоянии исполнения текущего сценария и его отклонениям от номинала. Такой алгоритм описан в работе [27]. Кратко его суть состоит в следующем.

Пусть исходный план исполнения сценария действий, представленного на рис.4, задаётся диаграммой Ганта на рис.7. Эта диаграмма заимствована из [27] для постановки задачи, в которой для каждого действия расширенного графа сценария (рис.4) указан тип действия и средняя продолжительность её выполнения каждым из роботов, если он способен это действие выполнять.

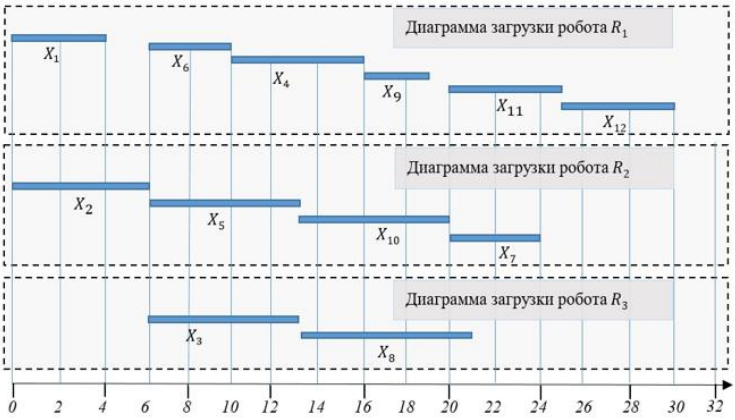


Рис.7. Диаграмма Ганта загрузки роботов в соответствии с исходным планом

Пусть в процессе исполнения сценария действий с заданным распределением сборочных операций на множестве роботов, представленным на рис.7, обнаружен выход из строя робота R_2 при исполнении им сборочной операции X_5. Этот факт может быть обнаружен агентом этого действия автономно по таймауту, контролирующему максимально допустимое время исполнения роботом R_2 действия X_5. При нарушении таймаута этот агент шлёт соответствующее сообщение агенту, который в текущий момент исполняет роль лидера.

На диаграмме Ганта рис.8 представлена ситуация в системе в момент отказа робота R_2. На ней полоски зелёного цвета отвечают действиям, которые к моменту обнаружения отказа робота R_2 уже выполнены, полоски жёлтого цвета – действиям, которые в этот момент находятся в процессе исполнения, а красная полоска отвечает действию X_5, в процессе исполнения которого произошёл отказ робота. Эта информация в системе формируется благодаря мониторингу распределённой работы некоторым агентом с ролью лидера.

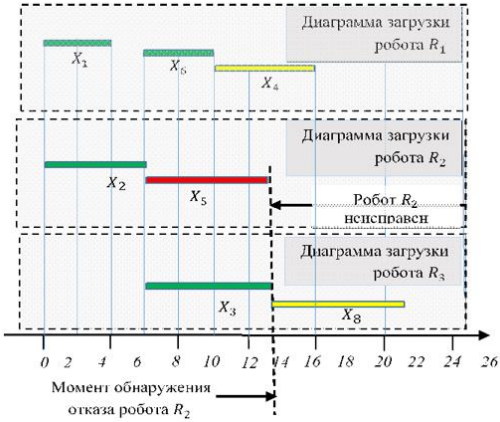


Рис.8. Исключительная ситуация как следствие отказа робота R_2, представленная диаграммой Ганта

Пусть *агент-лидера* отвечает за восстановления нормального функционирования системы, т.е. за составление нового плана исполнения сценария сборки изделия для его неисполненной части. Для этого используется эвристический алгоритм. Рабочая эвристика этого алгоритма состоит в том, что на очередном шаге итеративного планирования работ, готовых к исполнению, выбирается та, которая лежит на критическом пути множества возможных траекторий дальнейшего исполнения сценария. Здесь критическим путём называется путь, который начинается в одной из начальных вершин множества $\boldsymbol{X}(\geq t)$ и заканчивается в одной из конечных вершин, который имеет самую большую продолжительность в наихудшем варианте назначения, т.е. в варианте, когда для выполнения отдельных работ указанного пути назначаются роботы с наибольшей продолжительностью её исполнения. Алгоритм определения такой вершины может быть построен на основе модели аморфных вычислений при соответствующем выборе «морфогена».

Результат работы описанного алгоритма, т.е. новый план исполнения оставшейся части сценария, представлен на рис.9. Новый сценарий группового поведения использует только роботов R_1 и R_3, Из этого рисунка можно видеть, что распределение работ на множестве роботов существенно изменилось, а общее время исполнения групповой работы увеличилось на 6 условных единиц (примерно на 18%), в то время как задержка в системе из-за поломки робота составляет 7 условных единиц.

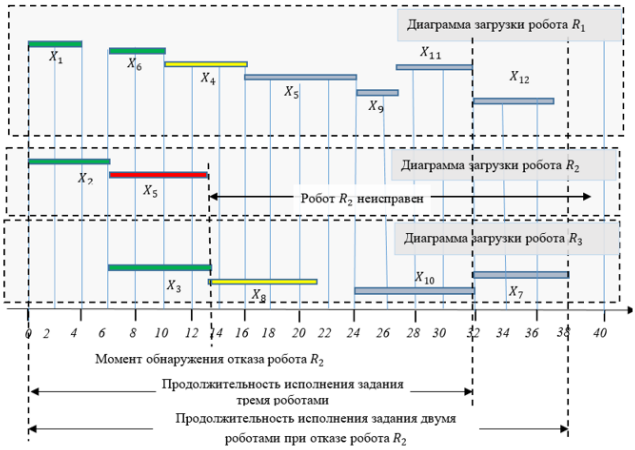


Рис.9. Новый сценарий группового поведения роботов после обработки отказа робота R_2, построенный автономно

Приведённые примеры показывают, что использование активных знаний в распределённых системах с самоорганизацией позволяют получать более эффективные решения за счёт «доставки» информации о глобальном контексте в локальные узлы принятия решений. Поэтому использование активных знаний целесообразно рассматривать как один их важных принципов построения систем группового управления.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрены и проанализированы принципы построения систем группового управления. Показано, что использование каждого из них может оказать заметное положительное влияние на различные характеристики системы группового управления, например, на упрощение механизма управления и повышение его устойчивости, на сложность коммуникационной компоненты и её загрузку в процессах информационного обмена, на сложность решаемых задач и процессов программирования. Следует обратить внимание на синергию различных принципов построения систем группового управления. Можно заметить, и это неоднократно отмечалось по ходу изложения, что совместное использование различные принципов из числа описанных усиливает роль каждого их них при их совместном использовании.

Представляется, что задача исследования принципов группового управления нуждается в более глубокой проработке принципов,

описанных в данной работе, а также тех, которые были упомянуты во введении или которые ещё предстоит сформулировать. Возможно, что основной результат данной работы состоит в том, что она намечает вехи исследований в области группового управления в ближайшем будущем.

Литература

1. Городецкий В.И., Юсупов Р.М. Искусственный интеллект: метафора, наука и информационная технология. Мехатроника, автоматизация, управление. 2020, 21(5), С. 282-293.
2. V.Gorodetsky and R.Yusupov. Artificial Intelligence at Present and Tomorrow. Journal of Physics: Conference series, 2021 (в печати).
3. Цетлин М.Л. Исследования по теории автоматов и моделирование биологических систем. – М.: Наука, 1969.
4. Варшавский В.И. Коллективное поведение автоматов. – М.: Наука, Главная редакция физико-атематической литературы, 1973.
5. Варшавский В.И., Поспелов Д.А. Оркестр играет без дирижёра. Размышления об эволюции некоторых технических систем и управлении ими. – М.: Наука, Главная редакция физико-атематической литературы, 1984.
6. Бонгард М.М., Лосев И.С., Смирнов М.С. Проект модели организации поведения – Животное. // Моделирование обучения и поведения. – М.: Наука, 1975.
7. Бонгард М.М., Лосев И.С., Максимов В.В., Смирнов М. С. Формальный язык описания ситуаций, использующий понятие связи. Моделирование обучения и поведения. – М.: Наука, 1975.
8. Cohen P and Levesque H.J. Teamwork. //Nous, 1991, № 25, P. 487-512.
9. Jennings N.R. Controlling Cooperative Problem Solving in Industrial Multi-Agent Systems Using Joint Intentions. // Artificial Intelligence, 1995, vol. 75, №5, P. 195-240.
10. Grosz B. and Kraus S. Collaborative Plans for Complex Group Actions. // Artificial Intelligence, 1996, vol. 86, № 2, P. 269 – 357.
11. Tambe M. Towards Flexible Teamwork. //Journal of Artificial Intelligence Research, 1997, №7, P. 83-124.
12. Sycara K., Paolucci M., Giampapa J., van Velsen M. The RETSINA Multi-agent Infrastructure. //Autonomous Agents and Multi-agent Systems, 2003, vol. 7, № 1, P. 29-48.
13. Tambe M., Shen W-M., Mataric M., Pynadath D., Goldberg D., Modi P.J., Qiu Z., Salemi B. Teamwork in Cyberspace: Using TEAMCORE to Make Agents Team-Ready. // Proceedings of AAAI Spring Symposium on Agents in Cyberspace, 1999, P. 136-141.
14. Городецкий В.И. Теория, модели, инфраструктуры и языки спецификации командного поведения автономных агентов: Обзор, Часть 1. // Искусственный интеллект и принятие решений, 2011, №2, С. 19-30. Часть 2. // Искусственный интеллект и принятие решений, 2011, №3, С. 34-47.

15. Geihs K. Engineering Challenges Ahead for Robot Teamwork in Dynamic Environments. Applied Sciences, 2020, Volume 10 Issue 4, 1368.
16. Карпов В.Э. Коллективное поведение роботов. Желаемое и действительное. // Современная мехатроника. Сборник научных трудов Всероссийской научной школы г. Орехово-Зуево, 2011, С. 35-51.
17. Карпов В.Э. Модели социального поведения в групповой робототехнике. // Управление большими системами, 2016, выпуск 59, С. 165-232.
18. Каляев И.А., Гайдук А.Р., Капустян С.Г. Модели и алгоритмы коллективного поведения в группах роботов. // Физматлит, М., 2009.
19. Кулинич А.А. Модель командного поведения агентов (роботов): когнитивный подход, // Управление большими системами, 2014, выпуск 51, С. 174-196.
20. Карпов В.Э., Карпова И.П., Кулинич А.А. Социальные сообщества роботов. // Серия «Науки об искусственном», № 19, URSS. 2019.
21. Федунов Б.Е. Интеллектуальные агенты в базах знаний бортовых оперативно-советующих экспертных системах типовых ситуаций функционирования антропоцентрического объекта. Известия РАН. Теория и системы управления. 2019, № 6, С. 90-102.
22. Федунов Б.Е. Бортовые интеллектуальные системы тактического уровня для антропоцентрических объектов. М.: Де`Либри, 2018, 246 с.
23. Gorodetsky V., Kotenko I. Scenario Knowledge Base: A Framework for Proactive Coordination of Coalition Operations. (Eds. M. Pechoucek and A. Tate) Proceedings of the Third International Conference on Knowledge Systems for Coalition Operation (KSCO-04), Florida, USA. October 2004, P. 83-88.
24. Gorodetsky V., Karsaev O., Samoylov V., Skormin V. Multi-agent Technology for Air Traffic Control and Incident Management in Airport Airspace. Proceedings of 7th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS 2008), In L. Padgham, Parkes, J. Mueller and S. Parsons (Eds.), May, 12-16,2008, Estoril, Portugal, IEEE, 2008. P. 119-125.
25. Городецкий В.И., Серебряков С.В., Троцкий Д.В. Средства спецификации и инструментальной поддержки командного поведения автономных агентов. Известия ЮФУ. Технические науки, №3, 2011, С. 116-133.
26. Городецкий В.И., Карсаев О.В. Самоорганизация группового поведения кластера малых спутников распределенной системы наблюдения. Журнал Известия Южного федерального университета. Технические науки. № 3, 2017, С. 141-155.
27. Gorodetsky V. Multi-agent Autonomous Group Control in Collective Robotics-Based Assembly. In CEUR-WS.org vol. 1, 2648/paper.pdf "Russian Advances in Artificial Intelligence: selected contributions to the Russian Conference on Artificial intelligence (RCAI 2020), October 10-16, 2020, Russia.
28. Городецкий В., Карсаев О., Самойлов В., Серебряков С. Многоагентные системы и групповое управление. В журнале "Искусственный интеллект и принятие решений, № 2, 2009.

29. Городецкий В.И. Самоорганизация и многоагентные системы. I. Модели многоагентной самоорганизации // Известия РАН. Теория и системы управления. 2012, № 2, С. 92-120.
30. Городецкий. В.И. Самоорганизация и многоагентные системы. II. Приложения и технология разработки // Известия РАН. Теория и системы управления. 2012. № 3, С. 102-123.
31. Gorodetsky V. Self-organizing Network of Autonomous Agents for Emerging IoT Applications (Invited Talk). In Proceedings of the IEEE FRUCT 2018: 22nd International Conference of Open Innovations Association FRUCT, University of Jyvaskyla, Jyvaskyla, Finland, May 15-18 2018. P. 424-426.
32. Городецкий В.И. Самоорганизующиеся сети агентов – базовая модель группового и кооперативного поведения автономных объектов. Сборник трудов Всероссийской конференции Искусственный интеллект: Проблемы и решения, 14-16 марта, 2018 г., Москва.
33. Городецкий В.И. Поведенческие модели кибер-физических систем и групповое управление: основные понятия // Известия ЮФУ. Технические науки. № 1. 2019. С. 133-152.
34. Martinet P., Patin B. PROTEUS: A platform to organize transfer inside French robotic community. // Proceedings of the 3rd National Conference on Control Architectures of Robots, Bourges, France, 2008.
35. Lemaignan S., Ros R., Mösenlechner L., Alami R., Beetz M. ORO – a knowledge management platform for cognitive architectures in robotics. // Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Taipei, Taiwan, 2010, P. 3548-3553.
36. Dhouib S., Kchir S., Stinckwich S., Ziadi T., Ziane M. RobotML, a Domain-Specific Language to Design, Simulate and Deploy Robotic Applications. // Noda, I., Ando, N., Brugali, D., Kuffner, J.J. (Eds.). Simulation, Modeling, and Programming for Autonomous Robots. Springer, 2012; Vol. 7628, P. 149-160.
37. Городецкий В.И., Самойлов В.В., Троцкий Д.В. Базовая онтология коллективного поведения автономных агентов и её расширения. // Известия РАН: Теория и системы управления. 2015, № 5, С. 102-121.
38. Tenorth M., Beetz M. Representations for robot knowledge in the KnowRob framework. //Artificial Intelligence, 2015, vol. 247, № 6, P. 151-169.
39. Li Xin, Bilbao S., Martín-Wanton T., Bastos J., and Rodriguez J. SWARMs ontology: a common information model for the cooperation of underwater robots. // Sensors 2017, vol. 17, № 3б P. 569-588.
40. Ferber J. Foreword. In Cossentino, M., Hilaire, V., Molesini, A., Seidita, V. (Eds.). Handbook on Agent-Oriented Design Processes. Springer. 2014. P. V – VI.
41. OODA loop/ https://en.wikipedia.org/wiki/OODA_loop.
42. National Research Council 2005. Autonomous Vehicles in Support of Naval Operations. Washington, DC: The National Academies Press. https://doi.org/10.17226/11379.
43. Endsley, M.R. Situation Awareness Global Assessment Technique (SAGAT). Proceedings of the National Aerospace and Electronics Conference, New York: IEEE, 1998, P. 789-795.

44. Salas E. and Dietz A.S. Introduction, In . E.Salas and A.S.Dietz (Eds.). Situational Awareness. Taylor&Francis Group, 2016, 512 pp.
45. Prince C., Ellis E., Brannick, M.T. and Salas, E. (2007), 'Measurement of Team Situation Awareness in Low Experience Aviators', International Journal of Aviation Psychology, 17(I), P. 41-57.
46. Matarić M.J., Michaud F. Behavior-Based Systems. In: Siciliano B., Khatib O. (Eds.) Springer Handbook of Robotics. Springer, Berlin, Heidelberg. 2008.
47. Brewer, E.A. Towards robust distributed systems // Proceedings of the XIX annual ACM symposium on Principles of distributed computing. Portland, OR: ACM, Vol. 19, no. 7. 2000.
48. Abelson H., Allen D., Coore D. et al. Amorphous Computing // Communication of the ACM. 2000. V. 43. № 5. P. 74-82.

УДК 004.89

МЕТОДЫ И СКВОЗНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ПОДГОТОВКИ И ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В ЕДИНОМ ИНФОРМАЦИОННОМ ПРОСТРАНСТВЕ

***Борисов В.В.**, д.т.н.*
e-mail: vbor67@mail.ru
Филиал НИУ «МЭИ» в г. Смоленске
***Агапов А.В.**, д.в.н.*
***Котов Д.В.**, д.т.н.*
ВА ГШ ВС РФ

1. ВВЕДЕНИЕ

Основными задачами управления в системах военного, двойного и специального назначения являются: непрерывный сбор, изучение и оценка сведений об обстановке, положении, состоянии, обеспеченности и действиях противоборствующей стороны и своих сил и средств, прогноз их развития при подготовке и в ходе выполнения поставленной задачи; подготовка исходных данных для моделирования действий, решения информационных и расчетных задач; подготовка предложений для принятия решений; своевременное информирование об изменениях в обстановке и отданных распоряжениях; организация и обеспечение устойчивого управления при выполнении поставленных задач; разработка документов и их своевременное представление; изучение, обобщение и тиражирование опыта принимаемых решений.

Особенностями этих задач, являются: изменение существующих и появление новых задач; постоянное возрастание их сложности; невозможность использования традиционных подходов к управлению сложными системами, основанных на точном описании проблемных ситуаций, и характеризующихся большим числом влияющих факторов, неопределенностью и нечеткостью информации, уникальностью ситуаций, влияющих на процессы принятия решений [1, 2].

В этих условиях возникает ряд проблем, заключающихся в [3, 4]:

- значительном увеличении времени, затрачиваемом на поиск и обработку информации, плотность потока которой не соответствует психофизиологическим возможностям лиц, принимающих решения (ЛПР);

- постоянном возрастании требований к оперативности и качеству принимаемых решений;
- необходимости обработки возрастающих объемов информации при принятии управленческих решений за отведенное время;
- невозможности решения задач управления без реализации комплексного подхода к интеллектуальной подготовке и поддержке принятия решений, обеспечивающего информационно-поисковое, информационно-аналитическое и интеллектуальное «сопровождение» всего комплекса решаемых задач: от сбора исходных данных и до выработки качественных и оперативных решений, а также автоматизированного учета опыта ранее принятых решений;
- не ориентированности существующих подходов к построению и применению средств и систем поддержки принятия решений к функционированию современных в едином информационном пространстве (ЕИП) и их несоответствие современному уровню развития интеллектуальных информационных технологий;
- невозможности автоматизации функций лиц, принимающих решения, без применения интеллектуальных информационных технологий.

Существующие средства и системы поддержки принятия решений в условиях быстроизменяющейся обстановки и новой среды не обеспечивают формирование решений, соответствующих заданным требованиям по оперативности и качеству, так как не позволяют осуществить интеллектуальный поиск и сбор информации с учетом информационных и информационно-аналитических потребностей каждого ЛПР. Они не адаптируются к изменению информационных ресурсов (ИР), в них не реализованы функции интеллектуального анализа больших данных, не в полной мере учитывается опыт ранее принятых решений, не используются интеллектуальные информационные технологии (ИИТ) накопления и представления знаний для описания проблемных ситуаций, отсутствуют встроенные модели, методы и алгоритмы выработки, принятия и согласования решений для оперативной и гибкой реакции на изменение ситуаций [5, 6].

Это, в свою очередь, требует развития существующих подходов к созданию и использованию средств и систем поддержки принятия решений в ЕИП.

2. КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ЕДИНОГО ИНФОРМАЦИОННОГО ПРОСТРАНСТВА

Предложена концептуальная многоуровневая модель ЕИП, органично объединяющая информационный, информационно-технологический, организационно-технический и технический уровни [3].

Информационный уровень представляет собой совокупность агрегированных ИР на основе условно-постоянной информации. Отметим, что в настоящее время ЕИП трактуется, в основном, только с этой точки зрения.

Информационно-технологический уровень представлен моделью хранения ИР и механизмом распределенной подписки на данные реального времени, обеспечивающие межуровневый доступ ЛПР к хранимым ИР в соответствии с поставленной задачей управления.

Организационно-технический уровень представлен многоуровневой моделью информационно-ориентированной службы распределения данных, обеспечивающей создание и реализацию регламентов, а также соответствующих служб, которые должны реализовывать и сопровождать процесс принятия решений в ЕИП.

Технический уровень реализуется посредством создания центров обработки данных, с возможностью доступа не только к хранимым ИР, но и вычислительным средствам для удовлетворения информационных и информационно-аналитических потребностей ЛПР в ЕИП.

В рамках обоснования предложенной концептуальной многоуровневой модели ЕИП, определены условия органичного взаимодействия и развития ее уровней.

3. ПРОЦЕСС ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ПОДГОТОВКИ И ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЯ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В ЕДИНОМ ИНФОРМАЦИОННОМ ПРОСТРАНСТВЕ

Интеллектуальная подготовка принятия решений представляет собой совокупность согласованных информационно-поисковых, информационно-аналитических и интеллектуальных задач, ориентированных на удовлетворение информационных потребностей ЛПР на основе интеллектуальных технологий. *Интеллектуальная поддержка принятия решений* – совокупность согласованных задач по формированию, оценке и выбору решений в ЕИП на основе интеллектуальных технологий.

Интеллектуальная подготовка и поддержка принятия решений (ИПиППР) – это конвергентные взаимообусловленные процессы интеллектуальной подготовки и поддержки принятия решений в ЕИП.

Для ИПиППР в ЕИП обоснованы следующие классы задач и соответствующие им ИР [3]:

- информационно-поисковые задачи (поиск необходимых ИР на основе запросов ЛПР к ЕИП для формирования информационно-поисковых ресурсов);
- информационно-аналитические задачи (группирование и обобщения данных (кластеризация, классификация, обнаружение зависимостей, прогнозирование) в требуемом для ЛПР виде для формирования информационно-аналитических ресурсов);
- интеллектуальные задачи (агрегирование извлеченных зависимостей с информационно-аналитическими ресурсами, определяющими описание поведения информационных объектов в ЕИП и формирование интеллектуальных информационных ресурсов).

Несмотря на то, что классы этих задач частично «пересекаются», друг от друга они отличаются степенью «интеллектуальности» используемых методов, моделей и технологий, а также последовательностью выполнения в рамках единого процесса ИПиППР, начиная от сбора исходных данных и заканчивая поддержкой принятия решений и учетом опыта принятых решений.

Реализацию соответствующих классов задач предлагается осуществить на основе оригинального метода функционально-информационного анализа процессов ИПиППР в ЕИП и композиционной онтологической модели (КОМ) [7]. Метод включает в себя: построение функционально-информационной модели процесса принятия решений, учитывающей взаимосвязанные задачи ЛПР и используемые для их выполнения ИР; создание КОМ в виде взаимосвязанных и согласованных онтологических моделей: задач, ИР, профилей ЛПР. Предложенный метод обеспечивает интероперабельное представление информации о ЛПР (их профилей), о выполняемых ими задачах и ИР, необходимых для поиска, обобщения и семантической интеграции структурированных, слабо структурированных и неструктурированных данных, извлечения зависимостей, формирования обобщенных прецедентных решений ЛПР в ЕИП.

4. МЕТОДЫ И ТЕХНОЛОГИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ПОДГОТОВКИ И ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В ЕДИНОМ ИНФОРМАЦИОННОМ ПРОСТРАНСТВЕ

Для реализации процесса ИПиППР в ЕИП можно выделить интеллектуальные методы, модели и технологии, в наибольшей степени соответствующие представленным выше классам задач. Так, для информационно-поисковых задач востребованными являются методы, модели и технологии поиска и обобщения «больших данных», для

информационно-аналитических задач – анализа данных, для интеллектуальных задач – извлечения знаний (зависимостей) из данных и формирования решений (вывода).

Авторами предложен метод ИПиППР в ЕИП, а также метод формирования и адаптации информационно-технологической среды (ИТС) для ИПиППР в ЕИП.

Метод ИПиППР ДЛОУ в ЕИП основывается на КОМ и включает в себя этапы: формирования информационно-поисковых и информационно-аналитических ИР для агрегирования описаний их информационных объектов (ИО) в ЕИП относительно поставленной ЛПР задачи управления; извлечение из этих ИР зависимостей типа «соответствие», «часть-целое», «влияние», «функциональная обусловленность» и других; формирования интеллектуальных ИР для решения поставленной задачи, содержащих прогнозные оценки состояний ИО в ЕИП; структурно-параметрическую адаптацию КОМ при изменении типов, структуры и параметров ИР в ЕИП; формирование выводов из оценки обстановки, предложений в решение ЛПР; разработку формализованных документов с учетом опыта ранее принятых решений в виде обобщенных прецедентных решений; формирование рекомендаций по изменению программных средств (ПС) и инструментально-программных средств (ИПС) в зависимости от изменений задач ЛПР и ИР в ЕИП.

Предложенный метод позволяет: удовлетворить информационные и информационно-аналитические потребности ЛПР в ЕИП с учетом изменений ИР; учитывать и обобщать опыт ранее принятых решений в виде обобщенных прецедентных решений.

Для реализации этапов метода ИПиППР в ЕИП предложена совокупность способов: интеллектуального информационного поиска в ЕИП; извлечения зависимостей и формирования интеллектуальных ИР в ЕИП; формирования обобщенных прецедентных решений в ЕИП [7, 8].

Комплексный характер применения интеллектуальных информационных технологий (ИИТ) является сквозным, при реализации которого должно обеспечиваться «бесшовное» согласование очередности их применения с учетом ролей пользователей, разработчиков ПС и разработчиков ИПС. С этой целью предложен метод формирования и адаптации ИТС для ИПиППР в ЕИП, заключающийся в том, что на основе композиционного онтологического подхода и технологии проектирования облачных информационных сред осуществляется построение онтологий: ИТС, ее сервисов, средств ИПиППР; разработка алгоритмов ИПС и ПС; разработка этих средств и их регламентов основных элементов ИТС

ИПиППР в ЕИП. Предложенный метод позволяет: сократить время на обновление ИР, ИПС, технических решений, ПС; осуществлять изменения соответствующих элементов КОМ для ИПиППР в ЕИП, обусловленные нормативными документами, потребностями ЛПР, требованиями к ИПС и ПС, развитием ИИТ; обеспечить «сквозной» характер ИИТ и «бесшовность» реализации процесса ИПиППР в ЕИП.

Предложена сквозная интеллектуальная технология ИПиППР в ЕИП, предназначенная для формирования последовательности применения компонентов ИТС путем комплексного применения базовых и прикладных ИИТ ИПиППР, включающая совокупности технологий (информационно-поисковых, инженерии знаний, интеллектуального анализа данных, поддержки принятия решений, учета опыта принимаемых решений технологий), начиная от сбора исходных данных и до принятия решений.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сформулированы проблемы реализации процессов ИПиППР в ЕИП для систем военного, двойного и специального назначения.

Описана концептуальная многоуровневая модель ЕИП, органично объединяющая информационный, информационно-технологический, организационно-технический и технический уровни.

Предложен метод функционально-информационного анализа процессов ИПиППР в ЕИП, обеспечивающий интероперабельное представление информации о ЛПР (их профилей), о выполняемых ими задачах и ИР, необходимых для поиска, обобщения и семантической интеграции структурированных, слабо структурированных и неструктурированных данных, извлечения зависимостей, формирования обобщенных прецедентных решений ЛПР в ЕИП.

Разработан метод ИПиППР ДЛОУ в ЕИП, основыванный на КОМ и позволяющий удовлетворить информационные и информационно-аналитические потребности ЛПР в ЕИП. Предложен метод формирования и адаптации ИТС, а также интеллектуальная технология ИПиППР в ЕИП, обеспечивающие «сквозной» характер и «бесшовность» реализации процесса ИПиППР в ЕИП.

Литература

1. Концепция развития системы управления ВС РФ до 2025. – М.: МО РФ.
2. Кукушкин М.А., Минх Д.Н. Методический подход к выбору рационального варианта деятельности должностных лиц органов управления при принятии решения командиром с применением средств автоматизации // Вестник Академии военных наук. 2019. №1(66). – С.50-56.

3. Борисов В.В., Котов Д.В., Молявко А.А., Злобинова М.В. Проблематика и теоретические основы интеллектуальной подготовки и поддержки принятия решений в ЕИП при организации ПВО общевойскового соединения: монография. – Смоленск: ВА ВПВО ВС РФ, 2020. – 144 с.
4. Кузьмин В.Н., Чарушников А.В., Карпов В.В. Методические основы поддержки принятия решений по планированию применения войск (сил) // Вестник академии военных наук. 2018. № 4(65). – С. 66-71.
5. Зернов, М И. Системы поддержки принятия решений – основа радикального повышения оперативности управления войсками / М. И. Зернов // Известия российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2018. №3(103). – С.26-29.
6. Панков А.В., Шевченко С.В. Обоснование роли и формирование концептуальной модели системы интеллектуальной обработки информации в едином информационном пространстве ВС РФ // Информатика и компьютерные технологии. Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2018. №1. – С. 38-43.
7. Borisov V., Kotov D., Molyavko A. Intelligent information search method based on a compositional ontological approach // Artificial Intelligence. RCAI 2020. Lecture Notes in Computer Science. 2020. Vol 12412. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-59535-7_27.
8. Котов Д.В., Молявко А.А., Прокопенков И.А. Способ формирования обобщенных прецедентных решений на основе композиционного онтологического подхода // Сб. тр. VIII Международной конференции «Нечеткие системы, мягкие вычисления и интеллектуальные технологии». – Смоленск: Универсум, 2020. В 2 т. Т. 2. – С. 128-135.

УДК 004.82: 004.891

СУБЪЕКТИВНОСТЬ И ОБЪЕКТИВНОСТЬ В МИРЕ МЕДИЦИНЫ: ВЗГЛЯД С ПОЗИЦИИ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ЗНАНИЙ ДЛЯ ГИБРИДНОЙ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

***Кобринский Б.А.**, д.м.н.*
e-mail: kba_05@mail.ru
ФИЦ ИУ РАН

1. ВВЕДЕНИЕ

… люди одно называют определенным,
а другое неопределенным
Цицерон

Врач трудится в условиях риска,
неопределенности и
противоречивых ситуаций
А.Ф. Билибин

В медицине традиционно принято считать объективными данные осмотра врача и результаты обследования пациента (лабораторные и инструментальные). Попробуем рассмотреть это с критической точки зрения. Врач в процессе осмотра выслушивает сердце, легкие и определяет перкуторно (тоже по звуку) размеры печение, селезенки, а также болевые точки в животе. В зависимости от опыта и слуха он получает различную по качеству информацию. Он может слышать при аускультации тоны и слабый (нежный) шум в сердце и может не слышать. Это же касается характера звуков в легких и состояния органов брюшной полости. Результатом инструментальных исследований являются заключения врачей, которые могут отличаться в зависимости от их опыта и сложности оценки нетипичной клинической картины. Таким образом получаемые данные являются субъективно-объективными или нечеткими. Поэтому одни медицинские организации не доверяют результатам других.

Нечеткость объекта познания в медицинской практике является отражением нечеткости в мире, классическим примером этого является

понятие красоты (красивый человек, красивые облака). В медицине соответствует характер внешнего вида больного (например, лицо как «маска Гиппократа», что является признаком тяжелого заболевания брюшной полости, или специфические лица больных с наследственными болезнями). Цветовая гамма включает до 48 оттенков, используемых художниками. Действительно, при взгляде на небо, мы можем видеть многочисленные сине-голубые переходы. Цвет кожи у человека может демонстрировать варианты от розового до бледно-серого и даже землисто-серого, также многочисленные, диагностически значимые оттенки встречаются при ожогах.

Оценка состояния здоровья человека в целом (напряжение регуляторных систем, предболезнь и др.), характеризуется непрерывностью изменений, которые квантуются врачами, использующими не всегда одни и те же концепты и атрибуты.

Рефлексия как один из аспектов мыслительного процесса может приводить к переоценке наблюдаемых фактов и высказываний пациента при их рассмотрении врачом (от субъективности к объективизации). Рефлексия пациента, врача, эксперта определяется особенностями индивидуума и зависит от ситуации (в частности, подавление рефлексии в условиях необходимости принятия решений в чрезвычайной ситуации).

Соответственно, объективизация медицинских нечетких субъективных представлений является необходимым условием формирования базы знаний для эффективной интеллектуальной системы.

2. ХАРАКТЕР УТОЧНЕНИЯ РЕЛЕВАНТНОСТИ НЕЧЕТКИХ КОНЦЕПТОВ

Мера доверия к нечетким клиническим проявлениям может быть получена с использованием факторов уверенности в относительно объективной форме, учитывая знания и рефлексию экспертов и когнитолога. При работе с группой экспертов приходится учитывать неоднозначность по Нариньяни [1], которая отражает с точки зрения семантики (правдоподобие, возможность, уверенность и т.п.) некоторое множество альтернатив.

Лингвистические шкалы для нечетких ранговых понятий необходимы при структуризации извлекаемых разными способами знаний. Однако и здесь подстерегают трудности. Нельзя, например, забывать, что для артериального давления на шкале должны быть предусмотрены два варианта – повышенное и повышенное по возрасту.

Признаки-триггеры, указывающие на потенциально возможный диагноз, могут быть и часто бывают мало заметными (умением их увидеть отличались выдающиеся терапевты С.П. Боткин, Г.А. Захарьин). Объективно существующие, они сильно зависят от субъективного взгляда врача на пациента. Это связано с визуальными представлениями, в частности с внешними (фенотипическими) характеристиками, которые могут быть представлены рядом сходных вариантов – образным рядом [2].

Динамика изменений при патологических процессах и трансформация визуальных образов во времени приводят пересмотру их вклада в принятие диагностических и прогностических решений.

Гранулярность в картине мира мы можем рассматривать как время на солнечных, обычных и атомных часах. Градация и грануляция играют ключевую роль в познании человека [3]. Лингвистическая шкала может рассматриваться как гранулированная последовательность знаков, значения которой являются лингвистическими метками гранул.

При обращении к НЕ-факторам [1] в отношении данных аппаратурных медицинских исследований мы сталкиваемся с недоопределенностью, которая является приблизительной, но корректной оценкой некоторой реальной величины, более точной по своей природе, чем возможно установить в данный момент времени с помощью используемого аппарата (например, разрешающая способность МРТ в 1,5 тесла не позволяет уточнить или увидеть изменения, доступные при 3 тесла). В связи с этим субъективность заключения по объективным данным аппаратурного исследования возрастает, как правило, при более низком разрешении, что не позволяет увидеть более мелкие гранулы.

Нечеткость и гранулярность позволяют рассматривать временную шкалу изменений, вызванных динамикой патологических проявлений. Для разных периодов нормы и патологии можно рассматривать разные гранулы, менее или более крупные (интегрированные). Гранулы разного размера могут соответствовать отдельным характеристикам клинических проявлений и степень их нечеткости может изменяться в процессе заболевания.

Грануляция информации опирается на неклассическое представление множества. Гранула есть совокупность неразличимых объектов, определяемая только их типом и количеством. Онтология гранул – это онтология представления сложных единиц информации и выявления знаний из данных. Сложными единицами информации в медицине являются комплексные понятия. К ним могут быть отнесены

симптомокомплексы и обобщенные понятия типа «грубые черты лица», которые включают форму лба, надбровные дуги, скуловые кости и другие элементы лицевого и мозгового черепа. То есть имеют место крупные и мелкие гранулы, характеристика которых определяет знания, отличающие одни заболевания от других.

В качестве метаонтологии Тарасовым В.Б. и соавторами [4] было предложено выбрать некоторую онтологию грануляции информации при условии формирования семейства целостных динамических информационных структур («зерен» информации). В анализе медицинских данных, получаемых различными способами можно условно ввести понятие метаонтологии для концептов верхнего уровня оценки патологических проявлений и набор онтологических гранул, характеризующих понятия более низкого уровня. Это будут отдельные наблюдаемые изменения, в том числе с нечеткими проявлениями.

Нечеткость гранул, их граничных элементов, затрудняет сопоставление признаков и дифференциальную диагностику болезней. В связи с этим возникает необходимость выявления гранул, отвечающих высокой релевантности признаков (симптомов). В конечном счете это должно способствовать построению онтологического дерева, учитывающего различный уровень изменений, характеризуемых лингвистическими шкалами. Возвращаясь к грубым чертам лица следует отметить, что незначительные изменения отдельных элементов лица (мелкие гранулы) будут соответствовать характеристике, которую можно именовать как незначительное огрубление черт лица, в то время как более крупные гранулы для отдельных элементов будут отвечать понятиям умеренно выраженных, сильно выраженных, очень сильно выраженных элементов и грубых черт лица. Таким образом может быть выстроена пирамида гранулярных онтологий для конкретного сложного понятия.

3. ОНТОЛОГИЧЕСКИЕ ГРАНУЛЫ В СИСТЕМЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ

Гранулярность информации в динамических интеллектуальных медицинских системах должна способствовать повышению эффективности мониторинга физиологических показателей и выделению релевантных для ситуационного контроля гранул. Соответственно этому следует организовать в киберфизических системах (КФС) процесс on-line взаимодействия вычислительных элементов, первично обрабатывающих биосигналы, и интеллектуальных решателей, обеспечивающих выдачу гипотез-заключений и рекомендаций (рис.1). Сочетание данных КФС с базой

нечетких правил, построенных на основе клинических знаний, позволит учитывать изменения при атипично протекающих заболеваниях.

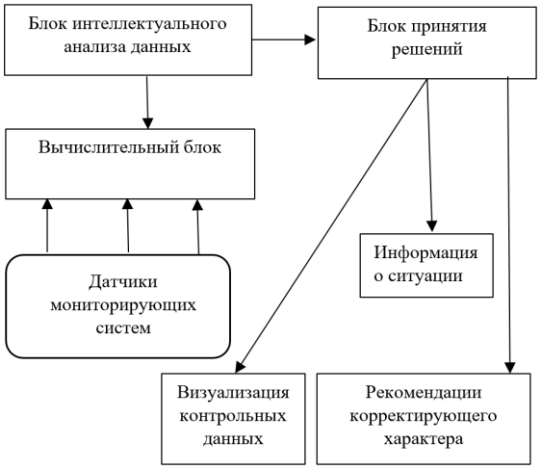


Рис.1. Архитектура интеллектуальной киберфизической системы медицинского назначения

Киберфизические системы находят применение в стационарах, в первую очередь в так называемых «умных» (smart) больницах [5, 6, 7]. Однако и в них до настоящего времени отсутствует глубокое проникновение интеллектуальных систем в динамику лечебно-диагностического процесса. Умную больницу ближайшего будущего можно охарактеризовать как интерактивную интеллектуальную цифровую среду, представляющую собой метасистему для управления клиническими путями на основе on-line мониторинга жизненно важных функций в сочетании с оперативным доступом персонала и больных к информации (включая виртуальные консилиумы) при широком использовании интеллектуальных мобильных приложений и робототехники [8].

В киберфизических системах отдельные компоненты работают в разных временных масштабах. Их мониторинг и выявление критических характеристик возможно при использовании интеллектуальных систем нечеткого вывода, в которых допускается наличие нескольких выходных переменных, значение каждой из которых определяется независимо друг от друга. В этом случае нечеткий вывод может быть организован как процесс накопления частичных результатов, вычисляемых для каждого активированного правила [9]. При реализации киберфизической интеллектуальной системы в виде мультиагентной среды, когнитивные агенты, осуществляющие контроль за отдельными показателями,

отвечающими гранулярным нечетким онтологиям [4], могут обеспечивать передачу данных, при определенных значениях показателей, интегрирующим когнитивным агентам. Это обеспечит более высокий уровень управления в системе.

4. ОБЪЕКТИВИЗАЦИЯ СУБЪЕКТИВНЫХ МНЕНИЙ ЭКСПЕРТОВ

Нечеткие представления в медицине заставили исследователей, уже с первых шагов создания экспертных систем обратиться к поиску способов их оценки. В первой медицинской системе MYCIN была предложена мера доверия эксперта к диагностической значимости признака, получившая название фактора уверенности [10]. Этот подход к экспертному определению значимости признаков многократно использовался. Модификация этого подхода позволяет получить независимые экспертные оценки для разных характеристик каждого из симптомов болезни [11].

В обзорной статье по медицинским экспертным системам автор [12] обращает внимание на значение нечеткой логики в поддержке принятия субъективных медицинских решений.

Снижение субъективности экспертных мнений осуществляется в групповых вариантах извлечения знаний. Для этого могут быть использованы различные подходы.

Рассмотрим вначале коротко два принципиально различных варианта, применявшихся для извлечения знаний в работе с группой экспертов. В обоих случаях можно говорить о снижении субъективности и вскрытии интуитивных представлений эксперта.

В процессе управляемой дискуссии [13], наиболее близким аналогом которой является диагностический консилиум, каждый из экспертов приводит свои аргументы, формулировки которых могут быть нечеткими. Такой вариант извлечения экспертных знаний при групповом принятии решений предполагает пассивно-активный (на разных этапах) характер процедуры общения когнитолога с экспертами. Однако один из ключевых моментов обсуждения – это достижение консенсуса или поиск точек равновесия в процессе дискуссии. Когнитолог должен, по возможности, направлять рассуждения экспертов, помогать сравнивать нечеткие характеристики клинической картины и находить локальные «экстремумы» в процессе аргументируемой дифференциальной диагностики. Важно оценить единство и расхождение мнений в отношении релевантных признаков и разнообразие нечетких оценок по отношению к сопутствующей симптоматике. Это связано с отсутствием четких границ значимости признаков в динамике патологического

процесса. Поэтому важной задачей когнитолога является уточнение диагностического ранга признаков в процессе дискуссии экспертов. Таким путем повышается объективность отдельных нечетких оценок.

Технология виртуальных статистик (ТВС) позволяет выявлять неявные противоречия в заключениях экспертов [14]. Экспертные знания в этом подходе формулировались в виде вероятностных заключений. При этом экспертам предоставлялась возможность нечетких словесных заключений типа «вероятность этого диагноза незначительна» (при предложенном наборе признаков). Полученные экспертные оценки проверялись на соответствие теореме Байеса и экспериментальным данным: порождаемые заключениями виртуальные встречаемости признаков должны были быть независимы от формы проявления одной и той же болезни, представленной в разных портретах, и принадлежать диапазону полученных из клинического опыта и/или известной из литературы встречаемости признаков (портреты – это формальные описания болезней по неполным данным, включавшие различные комбинации основных диагностически значимых симптомов). ТВС позволяет проверить согласованность оценок экспертов по разным клиническим портретам, характеризующим интервалы неопределенности в экспертных оценках.

К ТВС в некотором смысле близок метод обновления весов для группового принятия решений. Для учета мнений всех лиц из группы экспертов, у которых могут быть похожие или разные параметры оценки признаков, осуществляется пересчет для получения обновленных весов до тех пор, пока в качестве альтернативы не будет получен окончательный вес для группового решения [15]. Вначале каждый вводит начальный вес на основе классических методов. Начальный вес использует взвешивание «напрямую» или многокритериальное принятие решений. Этот подход должен обеспечить справедливость для всех лиц, принимающих решение, которые имеют различные знания в выборе параметров и оценке их веса. Для получения альтернативного решения использовалась техника выявления предпочтения по сходству с идеальным решением метода обновления веса. В другом исследовании каждый из 3 – 5 экспертов формулировал свое мнение по отдельности, но при расхождениях во мнении осуществлялось совместное обсуждение при модерировании когнитологом. Для этого использовалась кросс-валидация и общее голосование [16].

Для агрегации нечетких признаков, по типу симптомокомплексов, в экспертной системе для диагностики орфанных (редких) болезней реализована модель, включающая два факторы уверенности для каждого признака, позволяющие получить оценки для двух характеристик –

времени проявления и выраженности симптомов. Интегрированные эталонные оценки характеризуют каждое из диагностируемых заболеваний, а индивидуальные оценки для конкретного случая, сравниваемые с эталонными, позволяют упорядочивать их по сходству с ближайшими аналогами и выдвигать гипотезы [17].

Исключением в отношении интеграции мнений являются попытки достижения консенсуса между представителями различных медицинских школ.

5. МЕСТО НЕЧЕТКИХ ВИЗУАЛЬНЫХ ОБРАЗОВ В ДИАГНОСТИКЕ

У врача, имеющего большой опыт наблюдения больных, в определенных случаях первичная диагностическая гипотеза может формироваться на основе анализа внешнего вида пациента. Характерные внешние признаки особенно большое диагностическое значение имеют при генетических заболеваниях, хотя встречаются и при другой патологии. Исследование [18] демонстрирует потенциал распознавания трехмерных моделей формы лица в клинической диагностике с использованием в качестве дискриминирующих трех алгоритмов – ближайшее среднее, линейный дискриминантный анализ и машины опорных векторов. Другой подход использует машинное обучение для моделирования лицевого дисморфизма в многомерном «Пространстве клинического фенотипа лица» [19], в визуальной диагностической системе поддержки принятия решений [20]. Информационно-поисковая система, включающая более 20 000 фотографий, характерных внешних проявлений разных заболеваний, сопровождает их описаниями [21]. Однако ни одна из этих систем не предполагает комплексного анализа с использованием лингвистической и образной информации, что является необходимым для выдвижения окончательных диагностических гипотез. Кроме того, нельзя забывать о многообразии внешних проявлений каждого из заболеваний и изменений, которые происходят в процессе заболеваний.

Фактически фенотипические проявления разнообразны и представляют собой нечеткий образный ряд [2]. Образы одного визуального ряда имеют те или иные отличия друг от друга. Факторы уверенности позволяют преобразовать такой ряд в упорядоченный – от типичного или классического образа (архетип) до наименее сходных, выявление которых особенно трудно.

Когнитивные образные ряды могут служить основой для визуальной фенотипической диагностики (преддиагностики) заболеваний. Временная динамика характеризует множество вариантов образов

(временной образный ряд), обусловленных течением патологического процесса, в особенности при прогрессирующих заболеваниях.

Инженерия нечетких образных рядов предполагает их последующее включение в базы знаний как дополнение к правилам, построенным на основе лингвистической информации. Замена описания диагностически значимых внешних признаков изображениями будет способствовать снижению субъективности знаний, используемых в интеллектуальной системе.

6. ПОСТРОЕНИЕ ГИБРИДНОЙ СИСТЕМЫ

В медицинских и биотехнических системах для оценки данных нередко предполагается использование нечеткой логики в архитектуре гибридной интеллектуальной системы. По мнению Лотфи Заде [22], большинство систем с высоким «коэффициентом машинного интеллекта» будут гибридными системами. Автор рассматривает это как консорциум вычислительных методологий, которые коллективно обеспечивают основы для понимания, конструирования и развития интеллектуальных систем, в которых объединены нечеткая логика, нейровычисления, вероятностные вычисления, рассуждения на базе свидетельств (evidential reasoning) и другие подходы и технологии искусственного интеллекта. Заде отмечает, что мягкие вычисления являются более приспособленными для работы с неточными, неопределенными или частично истинными данными / знаниями. А руководящим принципом мягких вычислений являются терпимость к неточности, неопределенности, частичной истинности и лучшая согласованность с реальностью. Кроме того, нужно отметить, что традиционные логико-лингвистические интеллектуальные системы не обеспечивают однозначного представления некоторых трудно воспринимаемых визуальных характеристик болезни (например, птицеголовый карлик, гарголоидные черты лица), которые сложно сопоставить с их вербальной реализацией.

Развитие методов искусственного интеллекта позволяет сделать вывод о возможности интеграции в базе знаний вербализованных и визуальных представлений (фотографии, медицинские изображения, полученные инструментальными методами, в том числе трансформированные с использованием различных математических методов обработки в 3D модели и другие визуальные формы.

Рассмотрим вариант гибридной системы, которая должна включать нечеткую базу лингвистических правил, сопровождаемых визуальными образами с факторами уверенности, математическую модель и вычислительный модуль. Это можно продемонстрировать на примере проекта гибридной системы для диагностики и прогноза

цереброваскулярных нарушений (рис.2) [23]. Она характеризуется необходимостью отображения нейровизуальных радиологических рядов и полученных с помощью вычислительных методов изображений для оценки гемодинамических параметров (например, сосудистости [24]). Экспертные оценки позволят определить меру доверия не только к лингвистическим характеристикам, но и к изображениям с различной выраженностью патологических изменений.

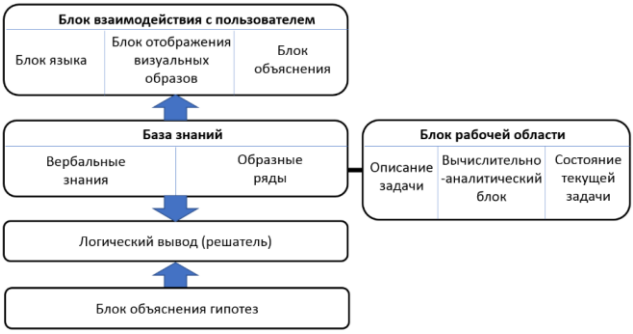


Рис.2. Архитектура гибридной системы для диагностики цереброваскулярной патологии

Необходимо отметить, что для анализа изображений в нейрорадиологии широко используются искусственные нейронные сети, в частности глубокого обучения [25, 26], однако эта технология не обеспечивает интерпретацию выдвигаемых гипотез. В то время как архитектура представленной гибридной системы предполагает наличие блока объяснения, который должен обеспечивать понимание пользователем различных отображаемых визуальных образов.

Поиск сходства и выдвижение гипотез в гибридной логико-лингво-образной системе будет осуществляться при сходстве лингвистических нечетких правил, сопровождаемых кортежами различных изображений.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Субъективность знаний, невольно проявляющаяся у экспертов, и относительная объективность аппаратурных данных, обусловленная меняющимся уровнем точности изделий, выпущенных в разное время, вызывает необходимость поиска новых подходов для их коррекции.

В отношении оценок экспертов следует использовать групповой подход к извлечению знаний, методика которого может быть различна. Нечеткость показателей может частично быть преодолена расширением

применения факторов уверенности к отдельным характеристикам признаков. Одновременно целесообразно использовать визуальные образы (взамен их вербализованных представлений) в форме кортежей изображений, сопровождающихся мерами доверия к каждому из представителей образной последовательности, что можно характеризовать как инженерию образных рядов. Создаваемые на такой основе гибридные системы будут включать традиционные нечеткие правила, дополненные визуальными образными рядами (включая 3D модели и другие подвергшиеся трансформации изображения). Предлагаемый подход должен повысить объективность экспертных знаний и эффективность интеллектуальных систем.

Литература

1. Нариньяни А.С. НЕ-факторы: неточность и недоопределенность – различие и взаимосвязь // Известия РАН, Теория и системы управления. – 2000. – №5. – С. 44-56.
2. Кобринский Б.А. Визуальные образы-символы в интеллектуальных системах // Четырнадцатая национальная конференция по искусственному интеллекту с международным участием КИИ-2014 (24-27 сентября 2014 г., г. Казань, Россия): Труды конференции. Т.1. – Казань: Изд-во РИЦ "Школа", 2014. – С.189-196.
3. Zadeh L.A. Fuzzy logic // Scholarpedia, – 2008. – Vol.3 – No.3. – P. 1766.
4. Тарасов В.Б., Калуцкая А.П., Святкина М.Н. Гранулярные, нечеткие и лингвистические онтологии для обеспечения взаимопонимания между когнитивными агентами // Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем. – 2012. – №2. – С. 267-278.
5. Yoo S., Lee K.H., Lee H.J. et al. Seoul National University Bundang Hospital's Electronic System for Total Care. Healthcare Informatics Research. – 2012. Vol.18. No.2. – pp. 145-152.
6. Frisch P. What is an intelligent hospital? // IEEE Pulse. – 2014. – Vol.5. – pp.10- 15.
7. Holzinger A., Rocker C., Ziefle M. From smart health to smart hospitals // Smart Health: Open Problems and Future Challenges / A. Holzinger et al. (Eds.). Cham: Springer International Publishing Switzerland. – 2015. – pp. 1-20.
8. Кобринский Б.А. «Умная» больница как инструмент цифровой медицины // Информационные технологии и вычислительные системы. – 2018. – №4. – С.3-14.
9. Литвинцева Л.В., Тятюшкина О.Ю., Ульянов С.В. Технологии интеллектуальных вычислений. Ч.1. Мягкие и дробные вычисления: учебно-методич. пособие. – М.: КУРС, 2020.
10. Shortliffe E.H. Computer-based medical consultation: MYCIN. – New York: Elsevier, 1976.
11. Кобринский Б.А. Триединство факторов уверенности в задачах медицинской диагностики // Искусственный интеллект и принятие решений. – 2018. – №2. – С. 62-72.

12. Prasath V., Lakshmi N., Nathiya M. et al. A Survey on the Applications of Fuzzy Logic in Medical Diagnosis // International Journal of Scientific & Engineering Research. – 2013. – Vol.4. – Iss.4. – pp. 1199-1203.
13. Кобринский Б.А. Извлечение экспертных знаний: групповой вариант // Новости искусственного интеллекта. – 2004. – №3. – С.58-66.
14. Марьянчик Б.В. Метод виртуальных статистик и его применение в партнерских системах для компьютерной диагностики // Компьютерная хроника. – 1996. – №5. – С. 65-74.
15. Hamdani H., Wardoy R., Mustofa K. A method of weight update in group decision-making to accommodate the interests of all the decision makers // International Journal of Intelligent Systems and Applications. – 2017. – Vol.9. – No.8. – pp. 1-10.
16. Киселев К.В., Ноева Е.А., Выборов О.Н. и др. Разработка архитектуры базы знаний системы поддержки принятия врачебных решений, основанной на графовой базе данных // Медицинские технологии. Оценка и выбор. – 2018. – № 3 (33). – С. 42-48.
17. Blagosklonov N.A., Kobrinskii B.A. Model of Integral Evaluation of Expert Knowledge for the Diagnosis of Lysosomal Storage Diseases // CEUR Workshop Proceedings. Vol.2648. Proceedings of the Russian Advances in Artificial Intelligence 2020 (Moscow, Russia, October 10-16, 2020). – 2020. – P. 250-264.
18. Hammond P., Hutton T.J., Allanson J.E. et al. Discriminating Power of Localized Three-Dimensional Facial Morphology // American Journal of Human Genetics. – 2005. – Vol.77. – No.6. – pp. 999-1010.
19. Ferry Q., Steinberg J., Webber C. et al. Diagnostically relevant facial gestalt information from ordinary photos // eLife. – 2014. – Vol.3: – e02020.
20. Kuru K., Niranjan M., Tunca Y., Osvank E., Azim T. Biomedical visual data analysis to build an intelligent diagnostic decision support system in medical genetics // Artificial intelligence in medicine. – 2014. – Vol.62. – Iss.2. – pp. 105-118.
21. Vardell E., Bou-Crick C. VisualDx: A Visual Diagnostic Decision Support Tool // Medical Reference Services Quarterly. – 2012. – Vol. 31. – No.4. – pp. 414-424.
22. Заде Л.А. Роль мягких вычислений и нечеткой логики в понимании, конструировании и развитии информационных / интеллектуальных систем // Искусственный интеллект. – 2001. – №2-3. – С. 7-11.
23. Кобринский Б.А., Долотова Д.Д., Донитова В.В., Гаврилов А.В. Радиологические изображения в построении гибридной интеллектуальной системы // Врач и информационные технологии. – 2020. – №4. – С. 43-50.
24. Jerman T., Pernus F., Likar B., Spiclin Z. Enhancement of Vascular Structures in 3D and 2D Angiographic Images // IEEE Transactions on Medical Imaging. – 2016. – Vol.35. – No.9. – pp. 2107-2118.
25. Abedi V., Goyal N., Tsivgoulis G. et al. Novel Screening Tool for Stroke Using Artificial Neural Network // Stroke. – 2017. – Vol.48. – No.6. – pp. 1678-1681.
26. Soffer S., Ben-Cohen A., Shimon O. et al. Convolutional Neural Networks for Radiologic Images: A Radiologist's Guide // Radiology. – 2019. – Vol.290. – No.3. – pp. 590-606.

УДК 004.89

ОНТОЛОГИЧЕСКИЕ ИНФРАСТРУКТУРЫ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ЗАДАЧ*

***Грибова В.В.**, д.т.н*
e-mail: gribova@iacp.dvo.ru
ИАПУ ДВО РАН, ДВФУ
***Шалфеева Е.А.**., к.т.н.*
e-mail: shalf@iacp.dvo.ru
ИАПУ ДВО РАН

1. ВВЕДЕНИЕ

Разработка интеллектуальных систем (ИС) перешла из стадии теоретических исследований с реализацией демонстрационных прототипов к стадии практического использования. При практическом использовании от программной системы ожидается, что она, решая реальные, а не упрощенные задачи, будет использоваться как можно более длительный срок, а затраты, направленные на ее разработку и сопровождение, будут окупаться реальной пользой, которую принесет ее применение. Вместе с тем по оценкам исследовательской компании Gartner только 53% прототипов проектов в области искусственного интеллекта имеют реальное практическое использование. Основная проблема – сложная масштабируемость решений в области ИИ, поскольку имеющиеся инструменты не ориентированы на создание сложных систем и управление их жизненным циклом [1].

Для снижения трудоемкости создания и сопровождения программных систем (ПС) известны и широко применяются следующие механизмы: архитектурные решения (разделение на слабо сцепленные компоненты с логически понятными функциями); декларативное представление компонентов ПС; средства автоматизации построения фрагментов кода, связывания компонентов друг с другом; использование типовых архитектурных решений; разделение компетенций между разными типами разработчиков; повторное использование готовых решений. Известные методы создания ПС, поддерживаемые технологические решения и инструментарий играют

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проекты № 19-29-01077 и № 20-07-00670

существенную роль в этом процессе. Однако, когда в качестве ПС выступает система на основе знаний, предложенные методы, технологии и инструментальные средства практически не применимы. В первую очередь это связано с тем, что в архитектуре такой системы имеется дополнительный архитектурный компонент – база знаний и появляется новый тип разработчиков – эксперты предметной области, что принципиально меняет методы, инструменты и технологию разработки такого класса систем.

Несмотря на существенные успехи в области создания систем с базами знаний необходимо констатировать, что методам и инструментам создания и, прежде всего их последующего развития, не уделено достаточного внимания, из-за чего предлагаемый инструментарий применим лишь для создания демонстрационных прототипов. Таким образом, несмотря на современные достижения в программной инженерии и инженерии знаний проблема обеспечения жизнеспособности интеллектуальных систем с базами знаний, которые могут продолжительное время быть полезными специалистам, решающим сложные и ответственные задачи, остается актуальной.

2. ФОРМУЛИРОВКА ПРОБЛЕМЫ

Основная проблема, поставленная авторами, – снижение трудоемкости создания и сопровождения систем с базами знаний или повышение их жизнеспособности, лежит в области технологической и инструментальной поддержки разработки такого класса систем. Тем не менее, очевидно, что эта проблема порождает множество, в первую очередь, научных задач. Выделим основные группы проблем, которые, по мнению авторов, направлены на решение основной проблемы.

Архитектурные решения, обеспечивающие разделение на слабо сцепленные компоненты с логически понятными функциями, декларативное представление компонентов. Характерной особенностью систем с базами знаний (БЗ) является явное выделение БЗ в качестве отдельного компонента. Однако при использовании продукционной модели знаний часть предметных знаний встраивается в машину логического вывода, при этом проблемно-независимая модель знаний неудобна и зачастую непонятна экспертам. Этот подход пригоден для областей, где число правил измеряется сотнями. Далее их создание и развитие особенно силами экспертов становится исключительно трудоемким процессом [2-4]. Использование онтологий, как семантической надстройки, значительно упростило процесс формирования знаний, но и здесь, несмотря на их использование, декларативно описывается только та часть знаний, где для сущностей можно определить

свойства, ввести бинарные связи и выявить иерархии классов таких сущностей. Отдельной проблемой является «связность» онтологии и знаний, что при изменении последних ведет к необходимости изменения решателя.

Включение в процесс проектирования экспертов предметной области. Использование онтологий, отражающих терминологию предметной области, структурные связи между понятиями, направлено именно на включение в процесс разработки предметных специалистов, однако модель знаний также играет существенную роль. Объектно-ориентированная парадигма представления онтологических знаний неудобна и непонятна большинству экспертов. Известным решением является семантическая (графовая) модель представления знаний, обеспечивающая последовательно «сверху-вниз» их формирование.

Повторное использование типовых архитектурных решений, стандартизация сервисов и интерфейсов, повторное использование готовых решений (через библиотеку повторно-используемых компонентов). Опыт в отношении создания систем с базами знаний (СБЗ) через библиотеки накапливаемых элементов решенных задач для повторного их использования не стал эффективным, поскольку размещаемые туда компоненты привязаны к частным задачам и не помогают при автоматизации новых задач и деятельностей. Вместе с тем в области решения интеллектуальных задач на протяжении нескольких десятилетий обсуждалась идея выделения их классов, формулировке постановок. Предполагалось, что полный обзор таких задач может позволить разработать методы их решения и перейти в этой области от искусства разработки систем, основанных на знаниях, к технологии. В то же время представляемые классификации интеллектуальных задач не были основаны на единых принципах, каждый автор описывал некоторый набор задач в «своих» терминах, чаще всего в виде текста, без формальных постановок.

Учитывая вышесказанное, достижение поставленной проблемы авторы видят через решение следующих задач:

- Выделения спектра задач интеллектуальной деятельности, решаемых на основе формализуемых знаний, описание их формальных характеристик, алгоритмов обработки;
- Развитие онтологического подхода к формированию баз декларативных знаний, основанное на явном отделении онтологии и базы знаний, их семантическое представление;
- Разработку методов декларирования и конструирования онтологических решателей с повторной используемостью готовых решений;

- Формирование принципиально важного набора компонентов инфраструктуры для построения систем с БЗ и их непрерывной адаптации к развитию предметной области (ПрОбл).

3. ПОСТАНОВКИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ЗАДАЧ

В зависимости от того, заданы ли в качестве входных данных результаты наблюдения ситуации или условия на решение задачи, можно различать задачи анализа результатов наблюдений и задачи анализа условий (ограничений) на решения. Чаще всего речь идет о задаче поиска гипотезы о решении, реже – о критике гипотезы или решения. Для тех и других создают в помощь специалисту системы с базами знаний. Практическую потребность\значимость имеют задачи, специализирующие комбинации этих абстрактных задач.

Задача поиска гипотез, объясняющих результаты наблюдений, рассматривается как комбинация задачи поиска гипотез и задачи анализа результатов наблюдений, в которой заданы БЗ и результаты наблюдений ситуации; требуется найти все гипотезы, соответствующие результатам наблюдений и формализованным знаниям.

Задача проектирования рассматривается как комбинация задачи поиска гипотез и задачи анализа ограничений на решение, в которой заданы БЗ и непустое множество ограничений на результат решения задачи; требуется найти все проекты, соответствующие БЗ и ограничениям на решение задачи.

Аналогичны Задача критики гипотезы, выдаваемой по анализу результатов наблюдений (заданы БЗ и результаты наблюдения ситуации и гипотеза и требуется установить, соответствует ли она базе знаний) и Задача критики проекта, в которой требуется проверить соответствие проекта базе знаний и ограничениям, которым он должен удовлетворять.

Во многих ПрОбл существуют классы ситуаций и решаются задачи, учитывающие эти классификации: поиск гипотез о классах, критики гипотез, формирование знаний о классах по обучающей выборке ситуаций, представленных результатами наблюдений. Они рассматриваются как уточнение вышеназванных абстрактных задач.

Во многих ПрОбл анализируются или проектируются сложные объекты или системы, состоящие из компонентов, и решаются задачи, учитывающие эти компоненты и отношения между ними (в том числе пространственные). Некоторые задачи связаны с моделями знаний, обязательно включающими термины, денотаты которых являются функциональными соответствиями и отношениями, зависящими от времени. Задачи анализа, критики гипотез, проектирования, критики

проекта могут ставиться для динамических или статических систем; в задачах проектирования динамической системы присутствуют формулы, учитывающие временные аспекты развивающейся или функционирующей системы.

Задачи прогноза, мониторинга – уточнение задачи поиска гипотез, объясняющих результаты наблюдений. В задаче мониторинга требуется определить те наблюдения динамической системы, по результатам которых можно отслеживать критические состояния системы. Во многих ПрОбл решаются задачи, рассматривающие действия (упорядоченные хотя бы частично), которые должны привести к некоторой заданной цели.

В ряде ПрОбл решаются задачи относительно систем, в которых во времени протекают процессы, связанные между собой посредством причинно-следственных отношений. Процессы, протекающие в такой системе, условно можно разделить на внешние (наблюдаемые) и внутренние. В соответствии с такой классификацией задач, сформирована иерархия их постановок, выраженных в терминах единых математических абстракций для всех содержательных понятий.

Примеры формальных постанвок задач.

Задача прогноза

Дано: Kn, согласованная с AS; упорядоченное множество моментов времени {t0, …, tk}; R (t0, ..., tk); t’ ∉ {t0, … tk}; q’ ∈ Ft u Prt;

Найти: все такие значения q’(…, t’,…), для каждого из которых существует такая AS (<R (t0, ..., tk), q’(…, t’,…)>), что все предложения из Kn истинны относительно нее.

Задача диагностики

Дано: R (результаты наблюдения признаков, характеристик системы и произошедших событий); Kn (база знаний).

Найти: все возможные причинно-следственные модели (AS(R)) системы, согласованные с результатами наблюдений (R), относительно которых все предложения из Kn истинны. При этом диагноз (обозначаемый Δ) в каждой такой модели – это внутренний процесс, не присущий системе (т.е. отклонение от нормы, часто - критическое).

Этой классификацией охвачен практически весь спектр задач, относящихся к области разработки систем, основанных на знаниях. Вместе с тем классификация является открытой, допускающей введение в неё абстракций новых понятий и новых задач. На практике в информационной поддержке нуждаются как задачи одного из классов, так и композиции нескольких таких задач.

Для выявления общих, повторяемых методов, алгоритмов и процедур решения задач из представленной классификации проведен

их анализ с применением обобщенных онтологий соответствующих знаний.

Так, например, онтология знаний о вариантах признаков класса ситуаций, о вариантах возможных стимулов (причин) появления процесса, о вариантах реакции на события позволяет описывать знания о развивающемся процессе (или динамической ситуации) для решения задач распознавания класса критической ситуации, определения стадии развития процесса, прогнозировании состояния. Развитие процесса зависит от некоторых признаков или характеристик (напр., длина, возраст). Отмечается, что приходится иметь дело с процессами, основным «параметром» которых является время, наблюдение их представляют, в частности, временными рядами.

В областях и задачах анализа результатов наблюдений развивающийся во времени процесс может отклоняться от нормального случая, а управляемая система – от нормального функционирования. Все виды связи таких отклонений с причинами, факторами, внешними проявлениями должны поддерживаться онтологией. В обобщенной онтологии причинно-следственных связей определены основные типы и подтипы предложений для представления связей отклонений в функционировании системы (объекта) с причинами, факторами, проявлениями.

На такой онтологии решаются задачи диагностики, задачи запроса дополнительной информации для распознавания, «простой» задачи управления, прогнозирования последствий управляющих воздействий. Для них модель знаний включает дополнительно предложения о законах изменения свойств, атрибутов ситуаций (каждого класса) при появлении отклонений от нормы.

Естественно ожидать, что методы и алгоритмы решения задач, «опирающихся» на единую онтологию, будут иметь общие шаги\этапы\фрагменты. Их выявление и систематизация позволят вывести разработку онтологических решателей на новый уровень через широкий спектр возможностей и способов повторного использования существующего и систематически накапливаемого опыта (ранее предложенных и вновь создаваемых решений).

Выявлено общее множество вычислительных операций, требуемых для реализации решателей задач разных типов: проверить выполнение условий рассмотрения гипотезы-диагноза; проверить выполнение условий признакового комплекса; найти факты наблюдения для признакового комплекса; проверить соответствие результатов наблюдения вариантам динамики признака и т.д.

Алгоритмы программных компонентов (специализированных) решателей для таких задач предлагается создавать с использованием специфицированных операций.

4. ОНТОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЗНАНИЙ

Онтологическая база знаний предполагает, что онтология ПрОбл включает как часть онтологию знаний о связях между понятиями разных типов, которые учитываются при решении задач. Это связи о вариантах признаков класса ситуаций, о вариантах возможных стимулов (причин) появления процесса, о вариантах реакции на события и т.д. Такая онтология представляется отдельным ресурсом, в семантическом (понятном человеку - инженеру знаний и эксперту) представлении. Иерархии классов понятий (подход Protégé [5]) для решения задач, отличных от классификации, недостаточно. Но иерархичность структуры в онтологии описания сущностей и явлений уместна, т.к. облегчает работу эксперта, давая возможность постепенно переходить от общих понятий к деталям, элементам, уточняющим общие понятия и сущности. При этом обеспечивает целостность создаваемых документов.

Т.о. основными характеристиками онтологических моделей знаний являются [6]:

- явное отделение онтологии от базы знаний, с обеспечением соответствия между ними; при изменении онтологии все порожденные на ее основе базы знаний должны автоматически приводиться в вид, согласованный с измененной моделью;
- декларативное графовое (семантическое) представление онтологии и базы знаний, обеспечивающее возможность разработчикам описывать необходимую базу знаний "сверху-вниз", постепенно переходя от общих понятий к деталям, элементам, уточняющим общие понятия и сущности, при этом само описание должно быть целостным, а не «раздробленным» на отдельные переменные и сущности;
- описание онтологии на декларативном языке, который должен быть достаточно простым и в то же время мощным, позволяющим описывать произвольные онтологии, ориентированные и адаптированные на терминологию и форму, принятую у разработчиков компонентов систем с БЗ;
- автоматическая генерация редакторов баз знаний по онтологии, обеспечивающая возможность экспертам формировать и сопровождать базы знаний без посредников.

Поскольку знания ПрОбл динамичны (они расширяются и корректируются), важно не только отделение декларативных знаний от процедур их использования, но и обеспечение условий для развития БЗ в течение всего процесса использования без участия программистов, а желательно и без инженеров по знаниям. В работе [7] авторами детально описана онтологическая модель знаний, обладающая указанными характеристиками.

5. ОНТОЛОГИЧЕСКИЙ РЕШАТЕЛЬ

Для проведения «рассуждения», выдвижения и объяснения гипотез на основе формализованных знаний Решателю требуется проводить обход Базы знаний (на основе знания ее структуры и онтологии в целом).

Решатель обрабатывает входную информацию, сопоставляя знания входным данным (фактам или условиям), выдвигает гипотезы на основе онтологических соглашений, структуры предложений и ограничений на интерпретацию. При этом Решатель сохраняет аргументы в пользу гипотез о решении – строит объяснение, фиксируя шаги принятия или отклонения возможных логических заключений.

Его логический вывод, в отличие от логических выводов, реализованных как исчисления, создается как алгоритм последовательного подтверждения или опровержения подцелей, соответствующих элементам формализованных знаний. Это делается через сопоставление фактов элементам знаний на основе онтологических соглашений и перехода к их анализу. Логический вывод решателя для задач планирования, проектирования, управления – последовательная проверка подцелей, соответствующих элементам знаний, и поиск соответствующих им элементов или действий, полная совокупность которых, согласованная с онтологией, становится гипотезой.

Решатель (умеющий выдвигать гипотезы и объяснять их) проектируется из программных единиц (ПрЕд) разных типов, с доступом и без доступа к информационным компонентам, для вычислений или связи с внешним окружением.

ПрЕд для поиска фактов получает значения наблюдений, список условий (события и прочие факторы), ищет во входном описании (документе) факты с такими названиями, сравнивает и дает ответ: {данные соответствуют; противоречат \ не соответствуют; отсутствуют}.

Удобно различать ПрЕд «верхнего слоя» - для промежуточных заключений типа подтверждения или опровержения подцелей при «отработке гипотез» и ПрЕд «следующего слоя» - поиска информации (среди значений наблюдений или целевых параметров-ограничений), а

также выбора элементов формализованных знаний (из описываемых множеств или вариантов).

Поскольку Решатель реализует процедурную часть знаний (а точнее – знание о правильном использовании декларативных знаний), то его развитие (как программной подсистемы) происходит в соответствии с традициями технологии программирования. Ориентированность его компонентов на онтологию ПрОбл становится главным «условием» независимости процессов его разработки и сопровождения от процессов создания и развития БЗ.

Проектирование архитектуры решателей задач в соответствии с типом решаемой задачи и набором рассматриваемых структурных и причинно-следственных связей между сущностями, сборка решателя из заменяемых программных компонентов, – обеспечивают прозрачность его архитектуры. Это особенно важно в условиях коллективной разработки систем с БЗ и их развития.

6. КОМПОНЕНТЫ ОНТОЛОГИЧЕСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

Типичная инфраструктура – среда для разработки и развития систем с БЗ – представляет собой:

- онтологию ПрОбл (включая базу терминов);
- сгенерированные (на основе онтологии ПрОбл) редакторы БЗ и баз данных;
- инструменты декларирования решателя и ПрЕд, а также среда для их кодирования;
- множество подготовленных и проверенных информационных компонентов (БЗ, архивов и баз данных);
- библиотека подготовленных и протестированных ПрЕд, обрабатывающих информационные компоненты;
- множество подготовленных решателей задач, созданных из подготовленных ПрЕд.

В состав расширенной среды разработки и развития систем с БЗ включаются средства оценивания БЗ, средства индуктивного формирования БЗ и другие инструменты их усовершенствования.

Технология разработки и развития СБЗ реализуется с помощью инструментального комплекса – облачной инструментальной среды развития на облачной платформе IACPaaS [8]. На ее основе разработан ряд онтологических инфраструктур для решения интеллектуальных задач в различных предметных областях – медицина, математика, компьютерная безопасность, лазерное аддитивное производство и др.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основная проблема, поставленная авторами в статье, – снижение трудоемкости создания и сопровождения систем с базами знаний и повышение их жизнеспособности. Ее решение авторы видят в классификации задач интеллектуальной деятельности, основанной на принципе усложнения свойств ПрОбл и позволяющей определить место решаемой задачи ПрОбл среди множества известных задач и готовых решений. Единые формальные постановки задач обеспечивают основу для поиска готовых решателей и конструирования повторно используемых компонентов систем. Онтологический решатель вместе с пользовательским интерфейсом многократно используется для множества систем с базами знаний. Он не зависит от наполнения баз знаний (использует ее как параметр), поэтому их полнота и качество могут улучшаться бесконечно, интегрируясь с решателем в новые и разные версии полезных систем. Тем самым обеспечивается возможность усовершенствования баз знаний без участия программистов, т.е. в условиях уже существующих программных компонентов.

Литература

1. Gartner Identifies the Top Strategic Technology Trends for 2021 https://www.gartner.com/en/newsroom/press-releases/2020-10-19-gartner-identifies-the-top-strategic-technology-trends-for-2021
2. Mohammad Islam, Vinodani Katiyar Development of a software maintenance cost estimation model: 4th gl perspective // International Journal of Technical Research and Applications e-ISSN: 2320-8163, www.ijtra.com Vol. 2, Issue 6, 2014, pp. 65-68.
3. T. J. Lydiard Overview of current practice and researchinitiatives for the verification and validation ofKBS The Knowledge Engineering Review, Vol 7:2, 1992, 101-113.
4. Michael Wilson ,David Duce and Dan Simpson Life cycles in software and knowledge engineering: a comparative review The Knowledge Engineering Review , Volume 4, Issue 3, September 1989, pp. 189-204.
5. Musen M. The Protégé Project: A Look Back and a Look Forward // AI Matters. 2015 Jun; 1(4), pp. 4-12.
6. Грибова В.В., Клещев А.С., Москаленко Ф.М., Тимченко В.А., Шалфеева Е.А. Расширяемый инструментарий для создания жизнеспособных систем с базами знаний // Программная инженерия. 2018. Т. 9, № 8. С. 339-348.
7. Gribova V.V., Kleshchev A.S., Moskalenko F.M., Timchenko V.A. Implementation of a Model of a Metainformation_Controlled Editor of Information Units with a Complex Structure // Automatic Documentation and Mathematical Linguistics. 2016. Vol.50. N. 1. pp. 14–25.
8. Valeria Gribova, Alexander Kleschev, Philip Moskalenko, Vadim Timchenko, Leonid Fedorischev, Elena Shalfeeva. The IACPaaS Cloud Platform: Features and Perspectives // 2017 Second Russia and Pacific Conference on Computer Technology and Applications (RPC) (Vladivostok, Russia, 25-29 sept. 2017). IEEE. 2017. pp. 80-84.

УДК 004.8

О ЛОГИЧЕСКОМ ПОДХОДЕ К АНАЛИЗУ РАЦИОНАЛЬНОСТИ МНЕНИЙ

***Михеенкова М.А.**, д.т.н.*
e-mail: m.mikheyenkova@yandex.ru
***Финн В.К.**, д.т.н.*
e-mail: ira.finn@gmail.com
ФИЦ ИУ РАН, РГГУ

1. ВВЕДЕНИЕ

Рациональная составляющая социального действия с учётом его субъективного смысла впервые была выделена создателем понимающей социологии М. Вебером, отметившим как наиболее осмысляемые два типа социального поведения: целерациональное и ценностно-рациональное [1]. Целерациональное поведение составило основу развития моделей практической рациональности [2], прежде всего – теории полезности, предполагающей выбор наилучших альтернатив действия с целью максимизировать прибыль и минимизировать убытки. Включение в понятие «полезности» нормативной составляющей означает конвергенцию целерационального и ценностно-рационального поведения. Таким образом, общее представление о рациональном поведении может быть сведено к поиску оптимального соотношения между целью действия и имеющимися знаниями, объективными возможностями и избранными средствами. Такое универсальное представление принято и в современных работах в области искусственного интеллекта (ИИ) при описании поведения искусственных агентов и их коллективов [3].

Совершенствование теории принятии решений естественным образом привело к включению вопросов, связанных с когнитивными механизмами человеческой рациональности, в круг её задач [4]. Осознание потребности в обеспечении формальными инструментами анализа рационального выбора заставило обратиться к широким возможностям методов ИИ, по признанию специалистов, вносящих существенный вклад в развитие когнитивной науки [5].

Идейным основанием искусственного интеллекта как научной и прикладной области является точная эпистемология, представляющая собой исследование взаимодействия познающего субъекта и

соответствующего ему объекта посредством эвристик и логик рассуждения, порождающих новое знание и его принятие [6]. Формализация средств точной эпистемологии – языков представления знаний и логик рассуждений – и их практическая реализация в компьютерных системах обеспечивает конструктивную имитацию и усиление некоторых сторон интеллектуальной деятельности (прежде всего, познавательной) человека.

2. ФОРМАЛЬНОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ СОЦИОЛОГИЧЕСКОГО ОПРОСА

Социально обусловленные аспекты и особенности когнитивных процессов восприятия, формирования мнений, рассуждения, принятия решений индивидов и их групп являются полем исследований когнитивной социологии. Наряду с настороженным отношением радикально настроенных исследователей к использованию методов точных наук при изучении тонких особенностей социокультурной жизни [7], существует и более толерантная точка зрения, предполагающая интеграцию таких методов с традиционными [8].

Универсальным и наиболее широко практикующимся источником получения эмпирического материала в социологии является опрос, для обработки результатов которого традиционно используются статистические методы. Для корректного описания социальной действительности не последним оказывается вопрос о рациональном восприятии респондентами элементов опросной анкеты и степень рациональности индивидов и их групп. Совершенствованию опросных методологий в этом направлении может до некоторой степени способствовать усилия когнитивной психологии [9]. Для решения других сторон этой проблемы полезными оказываются формальные средства и методы искусственного интеллекта.

С точки зрения точной эпистемологии решение задач когнитивной социологии предполагает формализацию собственно познавательной деятельности социолога с включением эффектов социальной когнитивности, в частности – мотивации поведения и его рациональности.

Научным и конструктивно реализованным аппаратом точной эпистемологии является ДСМ-метода автоматизированной поддержки исследований (ДСМ-метод АПИ) [10, см. также 6]. ДСМ-метод является методологией создания интеллектуальных систем и средством формализации, имитации и усиления интеллектуальных процессов. Метод воспроизводит и реализует в интеллектуальных системах исследовательские эвристики действующих социологов. Это позволяет

решать задачи качественного (неколичественного) анализа социологических данных (с распознаванием эмпирических закономерностей) средствами интеллектуального анализа данных (ИАД) [11, 12]. К числу таких задач относятся: исследование индивидуального поведения и обнаружение его детерминант с последующей типологизацией социума на их основе, учет влияния ситуации (контекста поведения), анализ и прогнозирование мнений.

Анализ и прогнозирование мнений на основе результатов социологического опроса и анализ рациональности потребовали развития языка ДСМ-метода. Были предложены логические средства для представления такого специфического вида поведения как мнения [13, 14], а также формальное представление закрытого m-значного ($m \geq 3$, m – число возможных вариантов ответа) социологического опроса [15]. Такой опрос является обобщением булевского опроса со шкалой оценок {0, 1}, где 0 – истинностное значение «ложь» (оценка для ответа «нет»), а 1 – истинностное значение «истина» (оценка ответа «да»).

Первым шагом на пути к рационализации мнений является представление опроса по теме T как принятие через множество утверждений (параметров опроса) $P = \{p_1, \ldots, p_n\}$, раскрывающих её содержание. Отношение респондентов к соответствующим утверждениям из P устанавливается в результате опроса. Заметим, что полнота характеризации темы элементами P решается исследователем на уровне формирования содержания модели.

Рассмотрим для начала булевский опрос, формализуемый средствами двузначной логики. Элементы P являются пропозициональными переменными, функция оценки $v[p_j] = \sigma_j \in \{1, 0\}$, $j = 1, \ldots, n$. Каждому элементу p_j ($j = 1, \ldots, n$) каркаса P темы T соответствует вопрос $?p_j$ – «Верно ли, что $v[p_j] = 1$?», ответом на который является $p_j^{\sigma_j}$, $\sigma_j \in \{1, 0\}$, $j = 1, \ldots, n$. Соответственно, в случае ответа «да» $v[p_j] = 1$, в случае ответа «нет» $v[p_j] = 0$.

Ответом i-го респондента по теме T будем называть максимальную конъюнкцию $C_i \rightleftharpoons p_1^{\sigma_1^{(i)}} \&\ldots\& p_n^{\sigma_n^{(i)}}$ (напомним, что $p^\sigma = p$, если $\sigma = 1$, $p^\sigma = \neg p$, если $\sigma = 0$; $\rightleftharpoons$ – графическое равенство). Такой ответ, представляющий собой понимание i-м респондентом темы T, назовём *мнением*. Множество всех возможных ответов по теме T с каркасом P обозначим K, число возможных ответов $|K|=2^n$. $K = \{C_i \mid C_i \rightleftharpoons p_1^{\sigma_1^{(i)}} \&\ldots\& p_n^{\sigma_n^{(i)}}, \sigma_j^{(i)} \in \{1, 0\}, j = 1, \ldots, n, i = 1, \ldots, 2^n\}$.

Пусть в реальном опросе с участием респондентов из множества R получено множество ответов $K' = \{C_1, \ldots, C_k\}$, $k \leq 2^n$, $K' \subseteq K$.

Множество R разбивается на подмножества респондентов R_i , имеющих, соответственно, мнение $C_i \in K'$, $R = R_1 \cup \ldots \cup R_k$, $R_i \cap R_j$, $i \neq j$; $i, j = 1,\ldots, k$.

Если при расширении множества опрашиваемых K' не изменяется, мы имеем дело с экспериментально достигнутым стабилизированным множеством ответов. Очевидно, реальное число участвующих в опросе респондентов, может превышать 2^n – некоторые респонденты могут иметь одинаковые ответы.

Для стабилизированного множества ответов K' $T(p_1, \ldots, p_n) = (C_1 \vee \ldots \vee C_k)$ будем называть *представлением темы* T в булевском опросе. Поскольку $C_i \in K'$ ($i = 1, \ldots, k$) – максимальные конъюнкции, можно использовать стандартную процедуру приведения $T(p_1, \ldots, p_n)$ к сокращённой ДНФ. Если при этом окажется, что некоторые $p_{i_1}, \ldots, p_{i_m}$ являются несущественными (не входят в $T(p_1, \ldots, p_n)$ после сокращения), эти переменные можно исключить, что позволит упростить опрос.

Рассмотрим множество формул двузначной логики $\Sigma = \{\varphi_1, \ldots, \varphi_s\}$, выражающих логические зависимости между $p_1, \ldots, p_n$. Разумеется, реальный опрос может быть организован таким образом, что утверждения из P независимы по содержанию. В этом случае $\Sigma = \varnothing$.

Пусть $\Sigma \neq \varnothing$, множество $\Sigma = \{\varphi_1, \ldots, \varphi_s\}$ непротиворечиво, причём $\bar{\varphi} = \varphi_1 \& \ldots \& \varphi_s$ не является тавтологией, *consis*(Σ) – метапредикат непротиворечивости множества формул (Σ). Непротиворечивость Σ установим методом аналитических таблиц.

Аналитической таблицей $\mathcal{T}_\Sigma$ для множества формул $\Sigma = \{\varphi_1, \ldots, \varphi_s\}$ будем называть аналитическую таблицу такую, что её началом является последовательность формул $\varphi_1, \ldots, \varphi_s$.

$$\left.\begin{matrix}\varphi_1 \\ \vdots \\ \varphi_s\end{matrix}\right\} \mathcal{T}_\Sigma$$

Аналитическая таблица $\mathcal{T}_\Sigma$ равносильна по замкнутости аналитической таблице $\mathcal{T}_{\bar{\varphi}}$ с корнем $\bar{\varphi}$. Для непротиворечивого множества Σ $\mathcal{T}_\Sigma$ ($\mathcal{T}_{\bar{\varphi}}$) не замкнута.

Таким образом, закрытый опрос O по теме T реализуется средствами дедуктивной логики L и может быть представлен в виде $O = \langle L, P, \Sigma, K', R\rangle$, причем K' задается исследователем-социологом в результате эмпирического получения стабилизированного множества ответов. Такое задание K' есть один из возможных подходов к формированию репрезентативной (в логическом, а не статистическом смысле) выборки R. Множество Σ также задаётся исследователем, и его

представление логическими средствами является элементом формализованной эвристики. Разумеется, вопрос о семантической полноте описания зависимостей между элементами P в Σ не может быть решён в рамках формального аппарата и остаётся прерогативой специалиста. В противоположность этому, именно логический подход позволяет отследить непротиворечивость предложенных зависимостей между $p_1, \ldots, p_n$. и избежать тавтологичности $\bar{\varphi}$.

3. ЛОГИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА АНАЛИЗА НЕПРОТИВОРЕЧИВОСТИ ОПРОСА

Рационально мыслящий субъект (и при этом добросовестно относящийся к своей роли респондента) способен различать заложенные исследователем связи между утверждениями, описывающими заданную тему. Задание множества Σ является рациональным представлением темы и позволяет выделить мнения, которые не противоречат этим зависимостям.

В [15, см. также 6, с. 273-289] было введено понятие непротиворечивости опроса как одного из представлений рациональности мнений. Обозначим множество всех X (ответов респондентов, т.е. мнений – максимальных конъюнкций), не противоречащих Σ, обозначим $K^+ = \{X \mid consis(\Sigma \cup \{X\}) \& (X \in K)\}$. Тогда непротиворечивостью реального опроса назовём долю мнений, не противоречащих Σ: $\eta(K', K^+) = \frac{|K' \cap K^+|}{|K'|}$.

Упростим определение непротиворечивости. Пусть $K^* = \{X \mid consis(\Sigma \cup \{X\}) \& (X \in K')\}$, т.е. $K^* = (K' \cap K^+)$. Тогда степень непротиворечивости опроса $\delta(K^*, K') = \frac{|K^*|}{|K'|}$. Такое определение не требует построения множества K^+, т.е. вычисления открытых ветвей аналитической таблицы $\mathcal{T}_\Sigma$. С точки зрения вычислительной сложности может быть более эффективной процедура построения множества аналитических таблиц $\bar{\mathcal{T}} = \{\mathcal{T}_{\Sigma \cup \{C_1\}}, \ldots, \mathcal{T}_{\Sigma \cup \{C_k\}}\}$ для мнений из K', $\bar{\mathcal{T}} = \{\mathcal{T}_{\Sigma \cup \{X\}} \mid (X \in K')\}$, аналогично $\mathcal{T}^* = \{\mathcal{T}_{\Sigma \cup \{X\}} \mid (X \in K^*)\}$, $\mathcal{T}^* \subseteq \bar{\mathcal{T}}$. Использование логических средств позволяет дополнить формальное определение опроса степенью его непротиворечивости: $O = \langle L, P, \Sigma, K', R, \delta \rangle$.

Покажем, что непротиворечивость опроса зависит от логики распознавания рациональности. Напомним, что обобщением двузначного булевского опроса является m-значный ($m \geq 3$) опрос с m социологически интерпретируемых вариантов ответа. Рассмотрим

трёхзначный опрос, введя истинностное значение $\frac{1}{2}$, как правило, представленное вариантом ответа «не знаю». Логическими средствами формализации таких опросов являются трёхзначные логики, в которых $\frac{1}{2}$ может интерпретироваться, как «бессмыслица» («сильная бессмыслица»), «слабая бессмыслица» и «неопределенность». В соответствии с интерпретацией определяются логические связки, общим для всех является определение отрицания ~, которое задаётся истинностной таблицей (p – пропозициональная переменная). 1 – выделенное истинностное значение, соответствующее тавтологиям.

p	$\sim p$
0	1
$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
1	0

Рассмотрим варианты опросов $O = \langle L, P, \Sigma, K', \mathrm{R}, \delta\rangle$ для некоторых трёхзначных логик с истинностными значениями $\nu \in \{0, \frac{1}{2}, 1\}$ [16]. Полное описание соответствующих логик находится за рамками нашего изложения. Приведём лишь несколько определений, существенных для целей работы.

3.1. Логика Бочвара B_3

$O = \langle B_3, P, \Sigma, K', \mathrm{R}, \delta\rangle$.

В трёхзначной логике B_3, предложенной Д.А. Бочваром для анализа парадоксов [17], $\frac{1}{2}$ интерпретируется, как сильная бессмысленность: если атомарное высказывание p бессмысленно, то сложное высказывание $\varphi(p)$, содержащее вхождение p, также бессмысленно.

Логические связки $\cap$, $\cup$, $\rightarrow$ – конъюнкция, дизъюнкция и импликация – определяются соответствующими истинностными таблицами, отрицание ~ определено выше, определение формулы стандартно.

Д.А. Бочваром были введены логические связки J_ν, где $\nu \in \{0, \frac{1}{2}, 1\}$, названные впоследствии J-операторами (Россера-Тюркетта).

$J_\nu p = \begin{cases} 1, & \text{если } v[p] = \nu \\ 0, & \text{если } v[p] \neq \nu \end{cases}$. Таким образом, J_ν-операторам соответствуют характеристические функции, распознающие истинностные значения $\nu \in \{0, \frac{1}{2}, 1\}$. Логические связки B_3 разделяются на два множества. Внутренними связками являются ~, $\cap$ и $\cup$, областью

значений которых является множество $\{0, \frac{1}{2}, 1\}$; импликация $\rightarrow$ является внешней связкой с областью значений $\{0, 1\}$. Внутренние формулы (включающее переменные, которые не находятся в сфере действия внешней связки) используются для представления фактов, внешние – для представления и доказательства утверждений о фактах. Таким образом, в методе аналитических таблиц используются так называемые помеченные формулы $J_\nu\varphi$, где φ – непомеченная формула. Контрарными парами для помеченных формул являются $J_\nu\varphi$, $J_\mu\varphi$, где $\nu\neq\mu$, $\nu[(J_\nu\varphi \cap J_\mu\varphi)] = 0$ для любой формулы φ и ν, $\mu\in\{0, \frac{1}{2}, 1\}$. Формулируются соответствующие α-правила (правила конъюнктивного типа), β-правила (правила дизъюнктивного типа) и χ-правила (использование которых расщепляет вершину дерева на три ветви), которые мы не будем здесь приводить, а перейдём сразу к вычислению степени непротиворечивости опроса на простом примере.

Уточним для начала формальное определение мнения в выбранной логике.

Пусть, как и прежде, тема опроса T характеризуется утверждениями $P = \{p_1, \ldots, p_n\}$. Каждому элементу p_j ($j = 1, \ldots, n$) соответствует вопрос $?p_j$ – «Какова оценка ν корня вопроса p_j ?», $\nu\in\{0, \frac{1}{2}, 1\}$, ответом на который является высказывание $J_\nu p_j$. Тогда ответ i-го респондента по теме T представляется максимальной конъюнкцией логики B_3 $C_i = J_{\nu_1^{(i)}}p_1 \cap \ldots \cap J_{\nu_n^{(i)}}p_n$. ($\nu^{(i)}[p_j] = \nu_j^{(i)}$, $\nu_j\in\nu\in\{0, \frac{1}{2}, 1\}$). Эта конъюнкция определяется по аналогии с максимальной конъюнкцией двузначной логики, т.е. для каждой p_k в C_i входит без повторений $J_{\nu_k^{(i)}}p_k$ (k=1, …, n), а $J_{\nu_k^{(i)}}p_k$ и $J_{\nu_j^{(i)}}p_k$, где $\nu_k^{(i)}\neq\nu_j^{(i)}$, одновременно в C_i не входят.

Пусть некоторый опрос по теме T характеризуется утверждениями $P = \{p, q, r\}$, при этом $\Sigma = \{p\rightarrow(q \cup r)\}$.

Пусть в результате опроса достигнуто стабилизированное множество ответов $K' = \{C_1, C_2, C_3\}$, где $C_1 = J_1p \cap J_1q \cap J_1r$, $C_2 = J_1p \cap J_1q \cap J_0r$, $C_3 = J_1p \cap J_1q \cap J_{\frac{1}{2}}r$.

Чтобы проверить, не противоречат ли C_i ($i = 1, 2, 3$) Σ (принадлежат ли C_i, $i = 1, 2, 3$, непротиворечивому множеству мнений K^*) и вычислить степень непротиворечивости опроса $\delta(K^*, K')$, построим аналитические таблицы с корнями $\Sigma\cup C_i$, $i = 1, 2, 3$.

Для этого воспользуемся соответствующими χ-правилами

$$\frac{J_1(\varphi\to\psi)}{J_0\varphi \mid J_{\frac{1}{2}}\varphi \mid J_1\psi} \text{ и } \frac{J_1(\varphi\cup\psi)}{J_1\varphi, J_0\psi \mid J_1\varphi, J_1\psi \mid J_0\varphi, J_1\psi}$$

и соответствующим α-правилом $\frac{J_1(\varphi\cap\psi)}{J_1\varphi, J_1\psi}$ логики B_3.

Здесь φ, ψ – формулы логики B_3.

Легко убедиться, что аналитические таблицы $\mathcal{T}_{\Sigma\cup\{C_1\}}$ и $\mathcal{T}_{\Sigma\cup\{C_2\}}$ для C_1 и C_2, соответственно, не замкнуты, т.е. $C_1 \in K^*$ и $C_2, \in K^*$. Проверим, так ли это для C_3, построив аналитическую таблицу $\mathcal{T}_{\Sigma\cup\{C_3\}}$.

$J_1(p\to(q \cup r))$
J_1p
J_1q
$J_{\frac{1}{2}}r$

J_0p	$J_{\frac{1}{2}}p$	$J_1(q \cup r)$		
*	*	J_1q	J_1q	J_0q
		J_0r	J_1r	J_1r
		*	*	*

Рис.1. Пример построения аналитической таблицы для B_3

Таблица замкнута, нет открытых ветвей, следовательно, C_3 противоречит Σ, $C_3 \notin K^*$.

K' = {C_1, C_2, C_3}, K^* = {C_1, C_2}, $K^* \subseteq K' \subseteq K$, степень непротиворечивости опроса $\delta(K^*, K') = \frac{2}{3}$.

3.2. Логика Эббингхауза E_3

Рассмотрим опрос, который реализуется средствами логики Эббингхауза E_3, являющейся расширением логики B_3.

$O = \langle E_3, P, \Sigma, K', R, \delta\rangle$.

В E_3 $\frac{1}{2}$ интерпретируется, как слабая бессмысленность: сложное высказывание $\varphi(p_1, \ldots, p_n)$ бессмысленно тогда и только тогда, когда все атомарные высказывания p_1, …, p_n, входящие в φ, являются бессмысленными.

Логические связки $\cap$, $\vee$, $\to$ – конъюнкция, дизъюнкция и импликация – определяются соответствующими истинностными таблицами, отрицание $\sim$ определено выше, определение формулы стандартно.

Рассмотрим описанный выше опрос по теме T, характеризующийся утверждениями $P = \{p, q, r\}$, при этом $\Sigma = \{p \to (q \vee r)\}$.

Стабилизированное множество ответов прежнее, $K' = \{C_1, C_2, C_3\}$, $C_1 = J_1p \cap J_1q \cap J_1r$, $C_2 = J_1p \cap J_1q \cap J_0r$, $C_3 = J_1p \cap J_1q \cap J_{\frac{1}{2}}r$.

Для вычисления степени непротиворечивости опроса $\delta(K^*, K')$ построим аналитические таблицы с корнями $\Sigma \cup C_i$, $i = 1, 2, 3$.

Для этого воспользуемся соответствующими

α-правилом $\frac{J_1(\varphi \cap \psi)}{J_1\varphi, J_1\psi}$, χ-правилом $\frac{J_1(\varphi \to \psi)}{J_0\varphi \mid J_{\frac{1}{2}}\varphi \mid J_1\psi}$ и β-правилом $\frac{J_1(\varphi \vee \psi)}{J_1\varphi \mid J_1\psi}$

логики E_3.

Здесь φ, ψ – формулы логики E_3.

Легко убедиться, что аналитические таблицы $\mathcal{T}_{\Sigma \cup \{C_1\}}$ и $\mathcal{T}_{\Sigma \cup \{C_2\}}$ для C_1 и C_2, соответственно, как и аналогичные таблицы логики B_3, не замкнуты, т.е. $C_1 \in K^*$ и $C_2, \in K^*$.

Построим аналитическую таблицу $\mathcal{T}_{\Sigma \cup \{C_3\}}$.

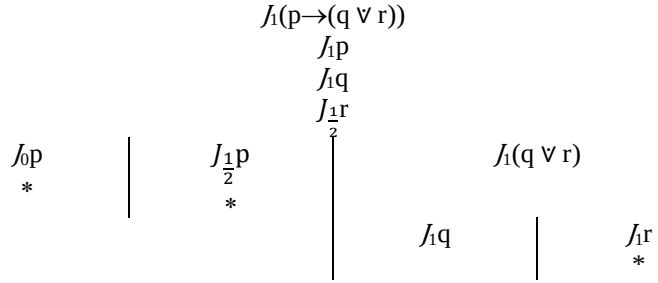


Рис.2. Пример построения аналитической таблицы для E_3.

Таблица не замкнута, есть открытая ветвь, следовательно, C_3 не противоречит Σ, $C_3 \in K^*$.

$K' = \{C_1, C_2, C_3\}$, $K^* = \{C_1, C_2, C_3\}$, $K^* = K' \subseteq K$, $\delta(K^*, K') = 1$. Опрос тотально непротиворечив.

3.3. Логика Лукасевича L'_3

Наконец, рассмотрим логику L'_3 (предложенный В.К. Финном вариант логики Лукасевича L_3 [18]), являющуюся расширением логики E_3.

$O = \langle L'_3, P, \Sigma, K', R, \delta \rangle$.

Здесь $\frac{1}{2}$ как интерпретируется как неопределённость: высказывание p либо истинно, либо ложно, но его оценка неизвестна.

Логические связки $\&$, $\vee$, $\rightarrow$ – конъюнкция, дизъюнкция и импликация – определяются соответствующими истинностными таблицами, отрицание $\sim$ определено выше, определение формулы стандартно.

Вновь рассмотрим описанный выше опрос по теме T, характеризующийся утверждениями $P = \{p, q, r\}$, теперь $\Sigma = \{p \rightarrow (q \vee r)\}$.

Стабилизированное множество ответов $K' = \{C_1, C_2, C_3\}$, где $C_1 = J_1 p \& J_1 q \& J_1 r$, $C_2 = J_1 p \& J_1 q \& J_0 r$, $C_3 = J_1 p \& J_1 q \& J_{\frac{1}{2}} r$.

Для вычисления степени непротиворечивости опроса $\delta(K^*, K')$ построим аналитические таблицы $\mathcal{T}_{\Sigma \cup \{C_i\}}$, $i = 1, 2, 3$.

Для этого нам понадобятся соответствующие

α-правило $\frac{J_1(\varphi \& \psi)}{J_1\varphi, J_1\psi}$, χ-правило $\frac{J_1(\varphi \rightarrow \psi)}{J_0\varphi \mid J_{\frac{1}{2}}\varphi \mid J_1\psi}$ и β-правило $\frac{J_1(\varphi \vee \psi)}{J_1\varphi \mid J_1\psi}$

логики L'_3.

Здесь φ, ψ – формулы логики L'_3.

Легко видеть, что так же, как и для E_3, все три таблицы имеют открытые ветви, а значит, $K^* = K' \subseteq K$, $\delta(K^*, K') = 1$, и опрос тотально непротиворечив.

Во всех приведённых примерах представлен опрос по теме T с одним и тем же каркасом $P = \{p_1, \ldots, p_n\}$, но с разными логиками анализа рациональности. При этом зависимости между элементами каркаса подобны с точностью до определения дизъюнкции в соответствующей логике. Из этих примеров видно, что степень непротиворечивости опроса зависит от выбранной логики, т.е. – в конечном итоге – от семантики оценок опроса и их социологической интерпретируемости.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создание инструментов ИИ, ориентированных на имитацию рациональной феноменологии человеческого интеллекта, требует формализации таких составляющих познавательного процесса, как отбор посылок, адекватных цели рассуждения, и порождение достаточных оснований для принятия решений. Отсюда растущий интерес к изучению аргументации [19] – как логических теорий аргументации, так и практических приложений, в частности, использования аргументации при принятии решений, анализе конфликтов, взаимодействии агентов в многоагентных системах,

представлении знаний в интеллектуальных системах. Обстоятельный обзор исследований аргументации содержится в [20]. Существенный интерес представляет применение средств аргументации при выборе респондентами решений, что означает усиление имитации рациональности мнений.

В структуре эмпирического опроса аргументированное отношение участников к теме исследования T опирается на оценки респондентом утверждений из $P = \{p_1, \ldots, p_n\}$. Рациональность отношения респондента к теме опроса T может быть усилена, если и само мнение (оценка элементов $\{p_1, \ldots, p_n\}$) формируется с использованием некоторой аргументации, в частности, аргументационной семантики логики A_4 [21] (см. также [13]). Это означает рассмотрение нескольких уровней аргументации и обеспечивает возможность учёта влияния когнитивной деятельности на социальное поведение.

Предложенная формализация аргументированного формирования мнений (не сводимого к дедуктивному рассуждению) является уточнением логическими средствами рационального поведения. Задание множества Σ является рациональным представлением темы, а предложенные логические средства позволяют выделить мнения, которые не противоречат этим зависимостям, и сформировать социальные общности, состоящие из рационально воспринимающих тему респондентов. Такие сообщества могут изучаться затем средствами ДСМ-метода автоматизированной поддержки исследований для выявления детерминаций поведения и его типологизации. Это обеспечивает полноту анализа социальной жизни и повышает его объективность.

Литература

1. Вебер М. Основные социологические понятия / в кн. Вебер М. Избранное: протестантская этика и дух капитализма – М.: РОССПЭН, 2006. – С. 453-482.
2. Девятко И.Ф. Социологические теории деятельности и практической рациональности. – М.: АВАНТИ ПЛЮС, 2003.
3. Рассел С., Норвиг П. Искусственный интеллект. Современный подход. – Изд.2-е. – М.: Вильямс, 2018.
4. Кузнецов О.П. Ограниченная рациональность и принятие решений // Искусственный интеллект и принятие решений. – 2019. – №1. – С. 3-15.
5. Boden M. A. AI. Its nature and future. – Oxford: Oxford University Press, 2016.
6. Финн В.К. Эпистемологические основания искусственного интеллекта / в кн. Финн В.К. Интеллект, информационное общество, гуманитарное знание и образование. – М.: ЛЕНАНД, 2021. С. 27-98.

7. Zerubavel E. Social mindscape. An Invitation to cognitive sociology. – L.: Harvard University Press, 1997.
8. Ignatow G. Ontology and Method in Cognitive Sociology // Sociological Forum. – 2014. – Vol. 29 – No. 4. – P. 990-994. DOI: 10.1111/socf.12131.
9. Schwarz N. Cognitive aspects of survey methodology // Applied Cognitive Psychology. – 2007. – Vol. 21 – Issue 2. – P. 277-287.
10. Автоматическое порождение гипотез в интеллектуальных системах. Под общ. ред. В.К. Финна. – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2020 (изд. 2-е стереотип.).
11. Михеенкова М.А., Климова С.Г. Интеллектуальный анализ данных в социологических исследованиях // НТИ, сер. 2. – 2018. – № 12. – С. 12-24.
12. Mikheyenkova M.A. Cognitive Knowledge Discovery in Social Sciences // Communications in Computer and Information Science. 2020. Vol 1282. P. 48-63. DOI 10.1007/978-3-030-60447-9_4
13. Finn V.K., Mikheyenkova M.A. Plausible Reasoning for the Problems of Cognitive Sociology // Logic and Logical Philosophy. 2011. Vol. 20. P. 113-139.
14. Финн В.К., Михеенкова М.А. О логических средствах концептуализации анализа мнений / в кн. Многозначные логики и их применения, т. 2: Логики в системах искусственного интеллекта (под ред. В.К. Финна) – М.: URSS, 2020. С. 152-199.
15. Михеенкова М.А., Финн В.К. Интеллектуальный анализ данных и проблемы когнитивной социологии // Математическое моделирование социальных процессов, М.: Спутник, 2012, вып. 12-13, с. 68-85.
16. Финн В.К., Аншаков О.М., Григолия Р.Ш., Забежайло М.И. Многозначные логики как фрагменты формализованной семантики / в кн. Многозначные логики и их применения, т. 1: Логические исчисления, алгебры и функциональные свойства (под ред. В.К. Финна) – М.: URSS, 2020. С. 323-356.
17. Бочвар Д.А. Об одном трёхзначном исчислении и его применении к анализу парадоксов классического расширенного функционального исчисления / Там же. С. 25-46.
18. Финн В.К. Аксиоматизация некоторых трёхзначных исчислений высказываний и их алгебр / Там же. С. 64-104.
19. Bench-Capon T.J.M., Dunne Paul E. Argumentation in Artificial Intelligence // Artificial Intelligence. – 2007. – Vol.171. – P.619-641.
20. Вагин В.Н. Знания и убеждения в интеллектуальном анализе данных. – М.: Физматлит, 2019.
21. Финн В.К. Двенадцать тезисов об аргументационных системах // НТИ, сер. 2. – 2012. – № 11. – С. 20-32.

УДК 623.74

ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ НА БОРТУ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

***Федунов Б.Е.**, д.т.н.*
e-mail: boris_fed@gosniias.ru
ГНЦ, НИИАС

1. ВВЕДЕНИЕ

На борту пилотируемых или многофункциональных беспилотных летательных аппаратов размещаются компьютерные бортовые интеллектуальные системы миссии (БИС-миссии) и информационно-объяснительные интеллектуальные системы. Системы миссии в процессе выполнения летательным аппаратом полетного задания конструктивно решают задачи (1) оперативного целеполагания и (2) конструирования способа достижения оперативно назначенной цели полета. Эти задачи возникают, когда на выполняемом этапе полета появляется коллизия «Выполняемый этап полета – Непосредственная угроза его выполнению».

Информационно-объяснительные интеллектуальные системы решают задачи, обеспечивающие решение задач миссии. В них входят задачи: (1) формирование образа наблюдаемого объекта по текущей информации от бортовых измерительных систем, (2) выделения среди наблюдаемых потенциальных угроз непосредственных угроз, (3) выявление частичной потери работоспособности бортовых систем ЛА и определение их оставшейся работоспособности, (4) определение степени работоспособности экипажа.

2. КОНЦЕПЦИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ПОДДЕРЖКИ ЭКИПАЖА В РЕШЕНИИ ИМ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ МИССИИ

В 2010 г в РФ разработана «Концепция интеллектуальной поддержки тактических решений экипажей (командиров групп) авиационных комплексов при выполнении боевых задач» (далее Концепция) [1], которая подытожила результаты отечественных разработок и ориентировала авиационных инженеров на разработку компьютерных БИС-миссии.

В Концепции подчеркивается:

- бортовые интеллектуальные системы миссии должны оперативно вырабатывать рекомендации экипажу с учетом заданной группе летательных аппаратов (ЛА) генеральной задачи вылета, выполняемого этапа полета и ранга ЛА группе, при этом ранг ЛА может быть изменен в процессе полета;
- все рекомендации бортовых интеллектуальных систем миссии могут быть реализованы только при согласии экипажа ЛА;
- реализованная рекомендация должна эффективно решать возникшую проблему, что требует глубокого (выразительного) представления в базе знаний бортовых интеллектуальных систем миссии отражения конкретики предметной области и адекватных методов решения ее проблем.

3. КОНЦЕПТУАЛЬНА МОДЕЛЬ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА «ЭТАП» ДЛЯ РАЗРАБОТКИ БОРТОВЫХ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ ТАКТИЧЕСКОГО УРОВНЯ

Модель «Этап» [2], используемая в разработке БИС-миссии:

- представляет сферу деятельности ЛА через: (1) заданный Заказчиком набор генеральных задач вылета, (2) представление каждой генеральной задачи вылета через семантическую сеть типовых ситуаций/этапов полета (ТС) и (3) представление каждой ТС через семантическую сеть ее проблемных субситуаций (ПрС/С);
- выделяет на борту ЛА три глобальные уровни управления (ГлУУ), где задача оперативного целеполагания (первый I-ГлУУ) интерпретируется как задача назначения текущей ТС полета, а задача конструирования способа достижения оперативно назначенной текущей цели полета (II-ГлУУ) – как задача построения семантической сети ПрС/С для этой активизированной ТС;
- следуя Концепции утверждает, что интеллектуальную поддержку экипажу в решении им задач миссии в процессе выполнения полетного задания должны оказывать интеллектуальные системы, имеющие облик бортовых оперативно советующих экспертных систем (БОСЭС).

Задача оперативного целеполагания решается двумя интеллектуальными системами:

- информационно-объяснительная интеллектуальная информационная система «Ситуационная осведомленность экипажа» (ИИС СОЭ), которая выделяет среди потенциальных угроз

выполнению текущего этапа полета непосредственную угрозу его выполнению. Выделенная угроза активизирует БОСЭС-целеполагание, которая рекомендует экипажу (1) текущую цель полета и (2) (текущий этап полета (текущую ТС).

Сигнал экипажа на реализацию этих рекомендаций включает соответствующую БОСЭС ТС, которая рекомендует экипажу способ достижения оперативно назначенной текущей цели полета.

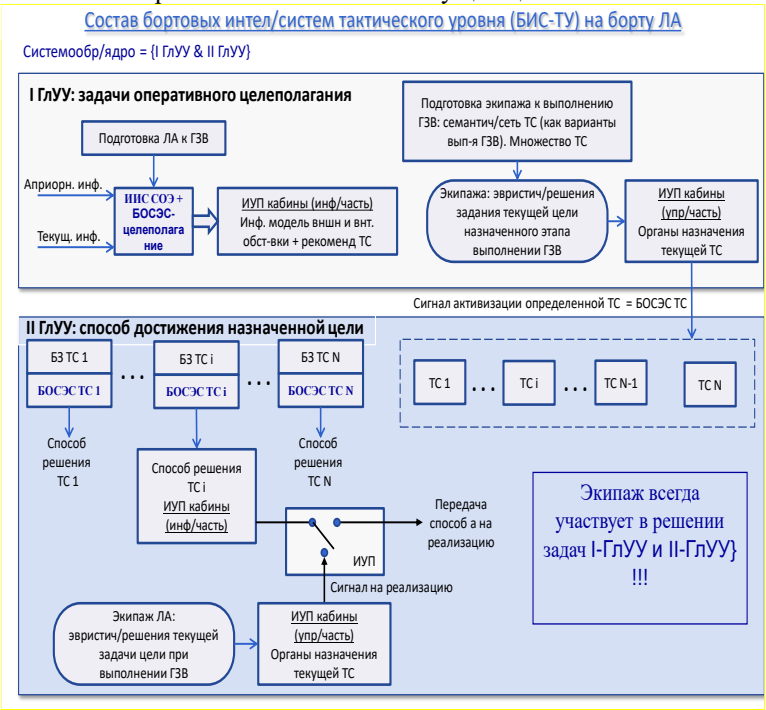


Рис.1. Состав и взаимодействие бортовых интеллектуальных систем миссии

Состав БИС-ТУ должен обеспечивать экипаж рекомендациями при возникновении любых возможных коллизий «Выполняемый этап полета – Непосредственная угроза его выполнению» на всех этапах полета выполнения полученного полетного задания (миссии).

Полный состав БИС-миссии, размещаемых на борту каждого самолета группы для поддержки решения задач миссии, показан на рис.1. Он включает в себя:

- для решения задач оперативного целеполагания интеллектуальную информационную систему «Ситуационная осведомленность экипажа» (ИИС СОЭ) и бортовую оперативно советующую экспертную систему «Оперативное целеполагание» (БОСЭС-целеполагание);
- для решения задач конструирования способа достижения оперативно назначенной текущей цели полета (текущей ТС) бортовые оперативно советующие экспертные системы этапов (типовых ситуаций (ТС)) полета (БОСЭС-ТС).

4. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ПОДДЕРЖКА РЕШЕНИЯ ЭКИПАЖЕМ ЗАДАЧИ ОПЕРАТИВНОГО ЦЕЛЕПОЛАГАНИЯ

Интеллектуальную поддержку экипажу в решении задачи оперативного целеполагания оказывают две компьютерные бортовые интеллектуальные системы миссии: бортовая интеллектуальная информационная система «Ситуационная осведомленность экипажа» (ИИС СОЭ) и бортовая оперативно советующая экспертная система «Оперативное целеполагание» (БОСЭС-целеполагание) [3].

Бортовая интеллектуальная информационная система «Ситуационная осведомленность экипажа» (ИИС СОЭ) среди всех наблюдаемых потенциальных угроз выполняемому этапу полета выявляет непосредственную угрозу – фиксирует коллизию «Выполняемый этап полета – Непосредственная угроза его выполнению». В базу знаний ИИС СОЭ входят математические модели угроз, позволяющие прогнозировать развитие угрозы и определять те моменты времени (*точки невозврата*), после которых эффективно противодействовать непосредственной угрозе наличными бортовыми средствами ЛА уже невозможно.

Компьютерная система БОСЭС-целеполагания для выявленной ИИС СОЭ коллизии рекомендует экипажу:

- новую текущую цель полета, т.е. рекомендует экипажу назначить новый этап полета, признак которого она предъявляет экипажу на информационно управляющем поле кабины (ИУП);
- или разрешить коллизию в рамках выполняемого этапа полета, подключив БОСЭС выполняемого этапа полета (БОСЭС-ТС), в базе знаний которой возникшей коллизии предусмотрена соответствующая проблемная субситуация (ПрС/С), в которой вырабатывается конструктивный способ достижения цели этой ПрС/С.

В базе знаний БОЭС-целеполагание используется метод решения проблемы по прецеденту.

Взаимодействие ИИС СОЭ, БОСЭС-целеполагание и экипажа показано на рис.2.

Рис.2. Бортовые интеллектуальные системы поддержки решения задачи оперативного целеполагания: состав, взаимодействие с экипажем. Обозначения на рисунке: ГЗВ – генеральная задача вылета группы, БОСЭС Ц/П – БОСЭС-целеполагания

Бортовые оперативно советующие экспертные системы «Оперативное целеполагание» (БОСЭС-целеполагание) проходят только начальные стадии этапа создания научно технического задела для их разработки:

- стадию выявления возможных коллизий «Этап полета в рассматриваемой генеральной задаче вылета группы летательных аппаратов – Непосредственная угроза выполнению этапа»;
- стадию накопления прецедентов по каждой коллизии, возможной на этом этапе полета, и разработка для нее фрагмента базы знаний БОСЭС-целеполагание.

5. ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ПОДДЕРЖКА РЕШЕНИЯ ЭКИПАЖЕМ ЗАДАЧИ КОНСТРУИРОВАНИЯ СПОСОБА ДОСТИЖЕНИЯ ОПЕРАТИВНО НАЗНАЧЕННОЙ ТЕКУЩЕЙ ЦЕЛИ ПОЛЕТА: БОРТОВЫЕ ОПЕРАТИВНО СОВЕТУЮЩИЕ ЭКСПЕРТНЫЕ СИСТЕМЫ ЭТАПОВ ПОЛЕТА (БОСЭС ТС)

База знаний БОСЭС этапа полета имеет два иерархических уровня (рис.3). На первом (I) иерархическом уровне с помощью продукционных правил вырабатывается признак той ПрС/С, которая адекватна наблюдаемой внешней обстановке. В левые части правил входят координаты ситуационного вектора SV (ТС – ПрС/С). Количественные значения координат оперативно определяются по текущей информации о внешние обстановки.

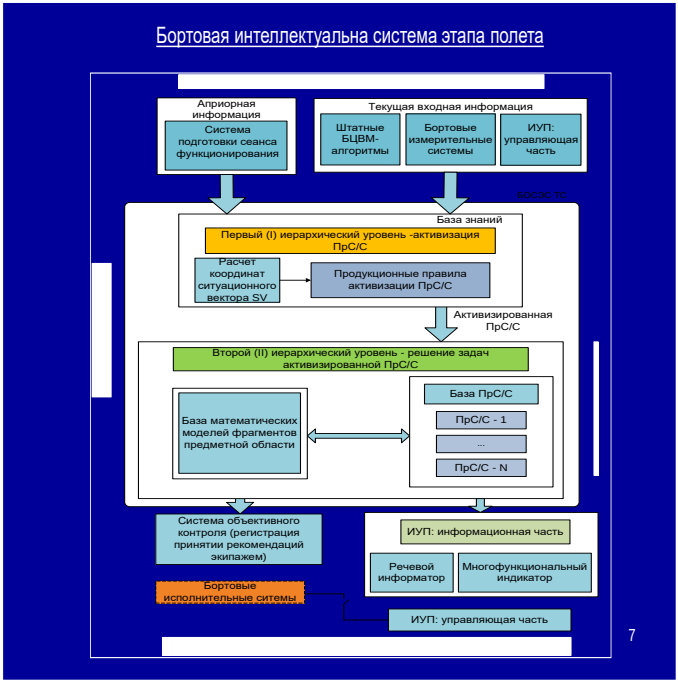


Рис.3. БОСЭС ТБС: структура базы знаний, источники входной информации, предъявление выходной информации

Признак активизированной ПрС/С передается на второй (II) иерархический уровень базы знаний БОСЭС ТС.

При формализации предметной области, в которой действуют ЛА, выделились следующие конструктивные методы решения задач в базах знаний БОСЭС ТС:

- метод многокритериального выбора альтернативы;
- метод решения задачи по прецеденту;
- оптимизационный метод;
- метод продукционных правил.

Для каждого типа ПрС/С на II иерархическом уровне создан свой блок математических моделей (мат/моделей) фрагментов предметной области.

Системы БОСЭС - ТС проходят завершающую стадию этапа создания научно технического задела (НТЗ) для разработки их демонстрационных образцов.

Завершением этапа создания НТЗ является демонстрационный образец БОСЭС - конкретного этапа полета конкретного типа ЛА.

На завершающей стадии создания НТЗ осуществляется:

- (1) разработка базы знаний (БЗ) для БОСЭС – конкретного этапа полета для конкретной генеральной задачи вылета и конкретного ранга самолета в группе;
- (2) создание систем имитационного моделирования фрагментов базы знаний (СИМ-фрагмент) БОСЭС- этапа полета;
- (3) математическое моделирование работы фрагментов БЗ на соответствующих СИМ-фрагмент;
- (4) создание демонстрационного образца конкретной БОСЭС-этапа полета.

Демонстрационный образец конкретной БОСЭС-этапа полета позволяет переходить к этапу разработки опытного образца БОСЭС-этого этапа полета, ориентированного на бортовую информационную среду выбранного ЛА.

6. ОПЕРАТИВНЫЙ МЕТОД МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОГО ВЫБОРА АЛЬТЕРНАТИВЫ В БАЗАХ ЗНАНИЙ БИС-МИССИИ

Подход Т.Саати [3] для решения этой задачи предусматривает предваритеное построение с экспертами матриц парных сравнений альтернатив по каждому критерию с достижением их согласованности, что в условиях применения БИС-ТУ невозможно. Покажем как определяются приоритеты альтернатив по каждому критерию в базах знаний БОСЭС ТС.

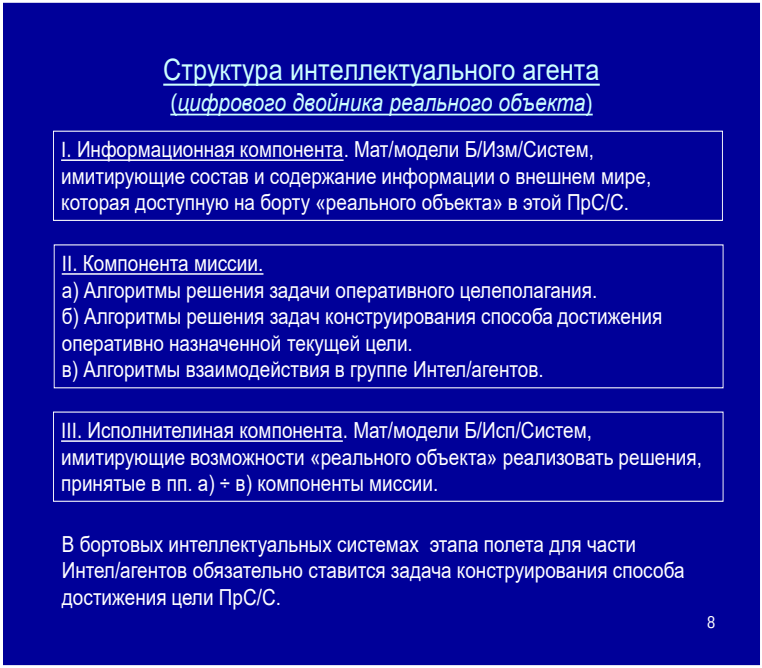


Рис.4. Компоненты интеллектуального агента, адекватно представляющие возможности реального объекта

Пусть задано множество альтернатив $A_1,\ldots, A_j, \ldots, A_n$ и множество критериев $K_1,\ldots, K_i, \ldots, K_k$.

Предлагается получать приоритеты альтернатив A_j по каждому критерию K_i по материалам математического моделирования сценария применения каждой альтернативы.

Эта мат/модель содержит интеллектуальные агенты – цифровые двойники реальных объектов (рис.4) – и процедуры их взаимодействия. При моделировании применения каждой альтернативы рассчитываются значения $K_1,\ldots, K_i, \ldots, K_k$..

Последовательно промоделировав все альтернативы A_j, на математической модели «Сценарий использования альтернативы» получим матрицу приоритетов альтернатив по каждому критерию. Применяя процедуру умножение этой матрицы справа на вектор приоритетов критериев (из задания на миссию с возможной оперативной корректировкой вектора экипажем), получим вектор итоговых приоритетов альтернатив.

Альтернатива с наибольшим приоритетом рекомендуется экипажу для реализации.

Метод подробно описан в [4].

7. ОПЕРАТИВНЫЙ МЕТОД РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ПО ПРЕЦЕДЕНТУ В БАЗАХ ЗНАНИЙ БИС-МИССИИ

1. Прецеденты.

Пусть рассматриваемая задачи не уникальна и есть набор «аналогичных» задач, которые были успешно решены в прошлом.

«Аналогичные задачи»: постановка задачи, вид и содержание решения задачи, условия всего набора аналогичных задач описываются одним и тем же ситуационным вектором (*SV*), координаты которого суть лингвистические переменные (ЛП). Конкретные условия возникновения конкретной аналогичной задачи описываются ситуационным вектором, каждая координата которого есть терм соответствующей ЛП.

Решение аналогичной задачи становится прецедентом для рассматриваемой задачи. Ее решение представлено в форме, позволяющей его использовать в условиях рассматриваемой задачи.

Для каждой задачи все накопленные прецеденты возможных ее решений представляются: (1) в виде «экспериментальной» матрицы знаний и (2) присоединенных к ней наборов нечетких множеств.

Таблица 1. «Экспериментальная» матрица знаний

№ п/п (реализация)	SV (Задача – Прецеденты)			Прецеденты
	ЛП-1	ЛП-2	ЛП-3	
	Терм-1.1	Терм-2.1	Терм-3.1	
	Терм-1.2	Терм-2.2	Терм-3.2	
	Терм-1.3	Терм-2.3	Терм-3.3	
1.1	Терм-1.1	Терм-2.3	Терм-3.1	Прц-1
1.2	Терм-1.2	Терм-2.2	Терм-3.2	
2.1	Терм-1.2	Терм-2.1	Терм-3.2	Прц-2
2.2	Терм-1.3	Терм-2.3	Терм-3.1	

А. «Экспериментальная» матрица знаний имеет следующую структуру (таблица 1):

- блоки матрицы соответствуют включенным в матрицу прецедентам;
- строки блока содержат условия (термы), в которых реализовался прецедент блока;
- столбцы блока – координаты ситуационного вектора *SV* (Задача – Прецеденты).

2. Набор нечеткие множества (НМ) для каждой координаты *SV* (Задача – Прецеденты) содержит нечеткие множества, поставленные во взаимно однозначное соответствие термам этой лингвистической переменной.

Пример присоединенных нечетких множеств, поставленных в соответствие лингвистической переменной ЛП «Скорость самолета» (рис.5).

ЛП «Скорость самолета» = {Малая (Мл), Средняя (Срд), Большая (Блш)}

Каждый терм лингвистической переменной представляется в виде нечеткого множества, выражающееся через универсальное множество, на котором определяется это нечеткое множество и функция принадлежности точек универсального множества, рассматриваемого нечеткого множества. Функция принадлежности принимает значения от 0 до 1 и показывает степень принадлежности точки универсального множества к нечеткому множеству. Представление ансамбля функций принадлежности нечетких множеств, поставленных в соответствие термам ЛП «Скорость самолета» показано на рис.5.

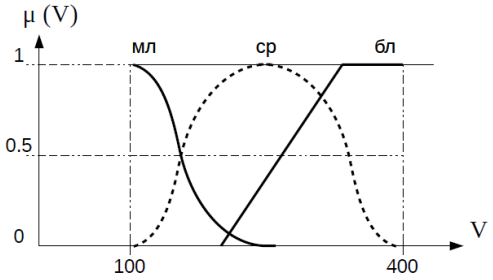


Рис.5. Ансамбли ФП для ЛП «Скорость самолета»

Каждому терму лингвистической переменной «Скорость самолета» поставлено в соответствие нечеткое множество (НМ):

НМ «Малая»: универсальное множество (УМ) = [100÷400] м/с, ФП (см. рис.5).

НМ «Средняя»: УМ = [100÷400] м/с, ФП (см. рис.5).

НМ «Большая»: УМ = [100÷400] м/с, ФП (см. рис.5).

Свойства ансамбля функции принадлежности:

1. На границах УМ найдется функция принадлежности (ФП) нечеткого множества, принимающее там значения 1;
2. Для каждой точки УМ найдется ФП, значение которой больше 0,5.

Все НМ, которыми представлена ЛП, определены на одном и том же универсальном множестве.

Б. Процедурная матрица знаний является инструментом для выбора предпочтительного прецедента.

Процедурная матрица знаний содержит две компоненты (таблица 2):

- «экспериментальную» матрицу знаний с набором прецедентов и с присоединенными к ней нечеткими множествами;
- процедуры вычисления приоритетов прецедентов, которые соответствуют блокам матрицы.

Таблица 2. Процедурная матрица знаний

№ п/п (реализация)	SV (Задача – Прецеденты)			Операция нечеткого отношения (min)	Операция объединения (max)	Прецеденты
	ЛП-1	ЛП-2	ЛП-3			
	Терм-1.1	Терм-2.1	Терм-3.1			
	Терм-1.2	Терм-2.2	Терм-3.2			
	Терм-1.3	Терм-2.3	Терм-3.3			
1.1	Терм-1.1	Терм-2.3	Терм-3.1	“min” Термов	ФП прецедент 1 (приоритет Прц-1)	Прц-1
1.2	Терм-1.2	Терм-2.2	Терм-3.2	“min” Термов		
2.1	Терм-1.2	Терм-2.1	Терм-3.2	“min” Термов	ФП прецедент 2 (приоритет Прц-2)	Прц-2
2.2	Терм-1.3	Терм-2.3	Терм-3.1	“min” Термов		

В каждом блоке матрицы по каждой его строке определена операция нечетного отношения нечетких множеств, стоящих в этой строке. В результате выполнения нечеткого отношения находится нечеткое множество, определенное на декартовом произведении нечетких множеств, стоящих в этой строке. Это универсальное множество одно и тоже для всех строк этого блока. Отметим, что это же универсальное множество получается также для других блоков процедурной матрицы.

Над полученными строчными нечеткими множествами выполняется операция нечеткого объединения, в результате которой получается нечеткое множество «Прецедент этого блока». По функции принадлежности этого нечеткого множества, в точке универсального множества, соответствующей координате *SV* (Задача – Прецеденты), координаты которого определены количественно по текущему описанию наблюдаемой внешней обстановки, определяется приоритет прецедента.

Прецедент с наибольшим приоритетом является решением задачи.

8. НЕОБХОДИМОСТЬ ПОДДЕРЖКИ ЭКИПАЖА ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ МИССИИ В УСЛОВИЯХ ЧАСТИЧНОЙ ПОТЕРИ РАБОТОСПОСОБНОСТИ БОРТА ЛА И ЭКИПАЖА

Разработанные в настоящее время демонстрационные образцы БИС-миссии ориентированы на работу в бортовой информационной среде полностью работоспособного ЛА и полностью работоспособного экипажа. Однако в ряде случаев экипаж может/должен выполнять полетное задание даже при частичной потере работоспособности того и другого. Именно для таких случаев в базу знаний разрабатываемых БИС-миссии должна поступать информация о внутрибортовых угрозах выполнению текущего этапа полета:

- об оставшейся работоспособности борта ЛА,
- об оставшейся работоспособности и экипажа.

Эту информацию могут поставлять в базу знаний БИС-миссии адаптированные к этим проблемам:

- бортовые (интеллектуальные) системы «борьбы с отказами бортовых систем ЛА» [5];
- бортовые (интеллектуальные) системы «борьбы с потерей работоспособности экипажа» [6].

С учетом этой информации бортовые интеллектуальные системы миссии должны вырабатывать рекомендации экипажу по решению возникшей коллизии «Выполняемый этап полета – Непосредственная внешняя и/или внутрибортовая угроза его выполнению».

Поиск решения задачи оперативного целеполагания в БОСЭС-целеполагание при возникновении коллизии такого вида должен осуществляться среди возможных текущих целей полета: экстренная посадка на неподготовленную площадку, возврат на аэродром; этап полета в интересах частичного выполнения полетного задания (миссии).

Задачу конструирования способа достижения оперативно назначенной текущей цели полета соответствующая БОСЭС-этап полета должна решать с учетом оставшейся работоспособности бортовых комплексов ЛА и текущей работоспособности экипажа.

9. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Необходимость интеллектуальной поддержки экипажа в процессе решения им тактических задач возникает, когда на выполняемом этапе полетного задания появляется коллизия «Выполняемый этап полета – Непосредственная угроза его выполнению». Эта поддержка оказывается в форме рекомендуемой текущей цели полета (решение задачи оперативного целеполагания) и рекомендуемого конструктивного способа достижение этой цели (решение задачи конструирования способа).

Задачу оперативного целеполагания решает бортовая оперативно советующая экспертная система (БОСЭС-целеполагание), в базе знаний которой проблема решается по прецеденту для каждой коллизии «Выполняемый этап полета – Непосредственная угроза его выполнению».

Задачи конструирования способа достижения оперативно назначенной текущей цели полета решают бортовые оперативно советующие экспертные системы этапов полета (БОСЭС-этапа полета), в базе знаний которых используются «глубокие математические модели соответствующего этапа полета» и сочетания различных оперативных методов решения возникающих проблем: (1) метод многокритериального выбора альтернативы, (2) метод решения по прецеденту, (3) оптимизационный метод решения, (4) метод продукционных правил.

2 Разработка баз знаний *БОСЭС-целеполагание* проходит начальные стадии этапа накопления знаний, предусматривающие накопление и формализацию коллизий «Выполняемый этап полета – Непосредственная угроза его выполнению» и накопления успешных прецедентов их решений».

Разработка баз знаний различных *БОСЭС-этап полета* проходит для выбранных этапов полета завершающие стадии этапа накопления знаний. На этих стадиях создаются демонстрационные образцы *БОСЭС-этапа полета*. Созданный демонстрационный образец, вырабатывающий рекомендации экипажу по способу решения задач с достаточной для непосредственной реализации способа глубиной, позволяет переходить к разработке опытного образца *БОСЭС-этап полет*, который ориентирован на бортовую информационную среду конкретного типа ЛА. Отдельные фрагменты баз знаний *БОСЭС-этап полета* уже появляются на модернизированных самолетах истребителях поколения 4++.

3. Ключевым и наиболее трудоемким моментом создания практически значимых *БОСЭС-целеполагание* и *БОСЭС-этап полета*

является разработка их баз знаний (БЗ), адекватных задачам и знаниям высококвалифицированных экипажей (летчиков) и совершенствование их БЗ в процессе эксплуатации.

Литература

1. Концепция интеллектуальной поддержки тактических решений экипажей (командиров групп) авиационных комплексов при выполнении боевых задач. Министерство обороны РФ. Москва, 2010.
2. Федунов Б.Е. Бортовые интеллектуальные системы тактического уровня для антропоцентрических объектов (примеры для пилотируемых летательных аппаратов). – М.: Де Либри. 2018. – 246 с.
3. Саати Т., Керн К. Аналитическое планирование Теория и практика. М: Радио и связь, 1991.
4. Федунов Б.Е., Юневич Н.Д. «Оперативный способ решения задач многокритериального выбора альтернативы в базах знаний бортовых оперативно советующих экспертных систем». «Известия РАН. Теория и системы управления» (ТиСУ) №3. 2021 г.
5. Жмеренецкий В.Ф., Полулях К.Д. Акбашев О.Ф. Активное обеспечение безопасности полета летательного аппарата. – М.: ЛЕНАНД, 2019. – 320 с.
6. Чунтул А.В. Человек в вертолете. – М.: Когито-Центр, 2018. – 320 с.

УДК 004.896

НЕЧЕТКИЕ МОДЕЛИ В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ И КОЛЛАБОРАТИВНОЙ РОБОТОТЕХНИКЕ*

Ющенко А.С., *д.т.н.*
e-mail: arkadyus@mail.ru
МГТУ им. Н.Э. Баумана

1. ВВЕДЕНИЕ

Основная тенденция современной робототехники – это приближение робота к человеку и, в конечном счете, создание нового социума, частью которого будут роботы и робототехнические системы. Одним из проявлений такой тенденции стало появление и широкое распространение коллаборативных робототехнических систем (КРТС), в которых человек функционирует совместно с роботом в одном и том же рабочем пространстве, причем безопасно для человека. Принципиальное отличие КРТС от автономных систем с элементами искусственного интеллекта заключается в том, что функционирование человека в контуре управления не может быть описано обычными математическими отношениями. Эти отношения теперь являются нечеткими. Причем, это касается как восприятия информации человеком, так и принятия решений и выполнения отдельных действий. Таким образом, и вся коллаборативная РТС становится нечеткой системой.

Заметим, что при использовании систем с искусственным интеллектом, построенных с применением нейронных сетей, которые работают автономно, также используется опыт человека. В этом случае он применяется «опосредованно» - на этапе обучения системы. Тем не менее, формализация этого опыта также требует привлечения понятий лингвистических переменных и нечеткого вывода.

Ниже рассматриваются нечеткие модели, используемые на этапе представления ситуации, на этапе принятия решений, и, наконец, на этапе действий робототехнической системы во внешнем мире во взаимодействии с человеком.

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект №18-07-01313

2. ПРЕДСТАВЛЕНИЕ СИТУАЦИИ В СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ РОБОТАМИ

Для представления информации о текущей ситуации в робототехнике целесообразно использовать пространственно-семантическое представление рабочего пространства, которое соответствует восприятию пространства человеком. Это и обеспечивает возможность использования опыта человека при управлении роботами.

В общем случае пространственно-семантическое представление пространства включает нечеткое описание объектов рабочей сцены и пространственно-временных отношений между ними. Это представление создаётся с участием человека – либо заранее, либо непосредственно в процессе работы.

К пространственным относятся нечеткие (*экстенциальные*) отношения положения и ориентации объектов, которые были определены в [1] как естественные, поскольку они соответствуют восприятию этих отношений человеком. Например, «*объект a1 далеко, впереди справа и немного выше объекта a2*». Эти отношения задаются с помощью функций принадлежности. Для полноты описания к ним добавляются *интенциальные* отношения, такие как *R1* – соприкасаться; *R2* – быть внутри; *R3* – быть на одной плоскости, и т.д. Используя заранее сформированные в базе знаний функции принадлежности, робот самостоятельно может описывать ситуацию в терминах естественных пространственных отношений и сообщать об этом оператору в лингвистической форме. Эти же отношения могут использоваться оператором при формировании заданий роботу в процессе диалога [2], [3]. Заметим, что из совокупности элементарных пространственных отношений, используя формальные логические правила коньюнкции и дизьюнкции, можно получить практически любые отношения, встречающиеся на практике. Сами объекты рабочей сцены описываются субфреймами, содержащими их геометрические и физические признаки, выраженные с использованием лингвистических переменных. Нечеткие признаки объектов (протяженность, высота, размер, цвет и т.п.) также могут быть заданы функциями принадлежности соответствующих лингвистических переменных [4]. В этой части описания на этапе обучения, или распознавания новой ситуации необходимо участие оператора, после чего система способна самостоятельно распознавать характерные объекты. Заметим, однако, что получившие в последнее время конволюционные (сверточные) нейронные сети способны самостоятельно определять характерные признаки распознаваемых объектов, если они были заранее известны.

В этом случае построению «внутренней» для робота модели объекта должно предшествовать обучение соответствующей нейросети [5].

Текущая ситуация, включающая *M* объектов, включая робот или внешнего наблюдателя, описывается системой бинарных фреймов (<*объект m*>, <*отношение*>, <*объект n*>), *m, n*=1, 2, …, *M*. Если заранее установлены нечеткие бинарные отношения между всеми объектами, которые могут наблюдаться роботом в процессе движения, то мы получим нечеткую пространственно-семантическую сеть, или нечеткую карту. Используя такую карту, можно, в частности, осуществлять навигацию робота по наблюдаемым реперам, т.е. по объектам, положение которых было заранее известно. Используя сформированную нечеткую карту местности, робот способен выполнять задачи, сформированные оператором, автономно.

Поскольку внешний мир непрерывно изменяется как за счет движения наблюдаемых объектов, так и за счет движения самого робота, то и описание ситуации изменяется во времени. Это обстоятельство требует учета в общем случае не только пространственных, но и временных отношений во внешнем мире, таких как «быть одновременно», «быть раньше», «следовать за». Такие отношения приходится использовать, в частности, при управлении мобильными роботами, перемещающимися в пространстве, содержащем другие движущиеся объекты [6]. Они позволяют обеспечить автоматическое сопровождение подвижных объектов, или избежать столкновения с ними.

В общем случае текущая ситуация *S* определяется фреймом, слотами которого служат имена объектов внешнего мира, естественные отношения между объектами, как пространственные, так и временные, а также другие признаки, характеризующие ситуацию. Получаемая таким образом оценка ситуации роботом представляет собой не что иное, как формализованную и осредненную оценку аналогичной ситуации человеком.

Совокупность обозначений (имен) заданных объектов в пространстве рабочей сцены и нечетких отношений между ними составляют словарь формального языка описания ситуации. Используя введенную Д.А. Поспеловым терминологию, можно назвать язык используемых для описания ситуаций формально-логических отношений, ситуационным языком. На ситуационном языке может быть организован диалог между роботом и человеком при анализе ситуации. Предполагается, что речь идёт об ограниченном профессионально-ориентированном языке.

3. МОДЕЛИ НЕЧЕТКОГО УПРАВЛЕНИЯ РОБОТАМИ

Система управления КМР имеет двухуровневую архитектуру, состоящую из базового блока и блока расширения. Базовый блок системы управления осуществляет сбор и анализ сенсорной информации о состоянии робота и внешней среды, формирование карты рабочей зоны, локализацию робота и окружающих объектов, а также планирование маршрута и управление движением робота с использованием продукционных правил и нечеткого вывода. По существу, это структура системы управления автономным мобильным роботом. Дополнительно в структуре системы управления коллаборативным роботом вводится блок диалогового интерфейса, который обеспечивает взаимодействие робота с человеком-оператором путем диалога на профессионально-ориентированном языке, близком к естественному. С помощью этого интерфейса человеком формируется последовательность рабочих задач робота. Обобщенная функциональная схема коллаборативной робототехнической системы (КРТС) приведена на рис.1.

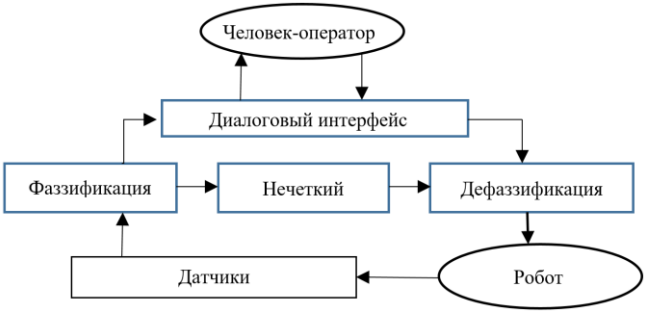


Рис.1. Функциональная схема КРТС

Заметим, что эта схема имеет принципиальное отличие от традиционной системы управления, поскольку в ней отсутствуют как управляющий субъект, так и объект управления. Эта система работы двух партнеров, один из которых – человек-оператор является ведущим, а второй – партнером-ассистентом. Каждый из партнеров обладает своей собственной системой получения и представления информации, базой знаний и системой принятия решений. Задача разработчика такой системы состоит в наилучшем согласовании особенностей каждого из партнеров при решении определенного круга профессиональных задач.

Учитывая необходимость постоянного обмена информацией с оператором, целесообразно и программно-алгоритмическую часть системы формировать на базе естественных пространственно-

временных отношений и нечеткого логического вывода. Аппаратная часть системы может быть реализована на базе обучаемых нейро- и нейро-нечетких сетей.

Можно априори выделить стереотипы поведения, определяемые сложившейся ситуацией. Эти стереотипы поведения имеют вид продукционных правил: «*если ситуация есть* S_i, *то тактика* T_i». Нечеткие модели ситуации рассмотрены выше. Под тактикой мы понимаем совокупность правил поведения, выраженных с помощью лингвистических переменных и определяемых поставленной целью. Эти правила ставят в соответствие типовой ситуации заранее определенное типовое движение робота. В свою очередь, каждое типовое движение также представляется совокупностью нечетких правил, связывающих показания датчиков робота и управляющие сигналы. Типовые ситуации можно заранее заложить в нечеткую базу знаний робота. С использованием этой базы можно составить набор правил поведения (тактик). Применительно к мобильным роботам это могут быть тактики преследования, или сопровождения движущегося объекта, тактики планирования траектории в пространстве с препятствиями, в том числе, проходу в дверной проем, обходу внезапно появившегося препятствия на пути к цели и т.п. Наличие тактик, полученных роботом заранее, или в процессе обучения, существенно упрощает задачу оператора, избавляя его от управления роботом при решении рутинных задач.

Заметим, что в том случае, когда ставится задача автономного обучения системы, или усовершенствования её работы в изменяющихся условиях, к упомянутым продукционным правилам добавляется и оценка результата, т.е. «*если ситуация есть* S_i *и тактика* T_i, *то результат* R_i». Эта оценка позволяет обеспечивать адаптацию системы к условиям работы. В том числе, и к особенностям работы оператора [7].

При использовании составленной базы нечетких моделей поведения и нечеткого речевого интерфейса оператор может сообщить роботу только конечную цель движения в пространстве с частично известной структурой. При этом возникает задача автономного планирования движения роботом, которая может быть решена методами нечеткого логического вывода [8]. Одним из методов автономного планирования поведения робота, заимствованных из практики принятия решений человеком, является метод разрешения противоречий [9].

Специфика управления мобильным роботом в динамической среде состоит в том, что движение препятствий нельзя рассчитать

заранее. Чтобы избежать столкновений с движущимися препятствиями, необходимо предсказывать траекторию их движения по имеющимся результатам наблюдения, как это делает и сам человек. Поскольку мобильный робот имеет информацию о движении всех объектов в некоторой окрестности, то такая задача также может быть решена автономно [10].

Для наведения КР на подвижный объект и его преследования, или сопровождения могут быть использованы методы пропорциональной навигации. Так как движение робота осуществляется в среде с препятствиями, то на тактическом уровне предлагается использование нечеткого контроллера, допускающего лингвистическое описание ситуации при возникновении препятствий и позволяющего осуществлять управление роботом с использованием лингвистических команд. Основными правилами в разработанной базе правил являются правила пропорционального наведения и правила, обеспечивающие безопасность движения при возникновении препятствий в зоне действий робота [11].

4. РЕЧЕВОЙ ИНТЕРФЕЙС И ОРГАНИЗАЦИЯ ДИАЛОГА

Речевой интерфейс является основным способом задания управляющей информации для диалоговой системы управления коллаборативным роботом. При этом предполагается, что диалог ведется на профессионально-ориентированном языке и не предполагает специальных знаний оператора в области робототехники. Речевой интерфейс включает в себя модуль распознавания и лингвистический модуль (рис.2). Модуль распознавания представляет собой устройство для преобразования речевых сигналов и их интерпретации в качестве отдельных слов или фраз. Лингвистический анализатор осуществляет синтаксический и семантический разбор высказывания, в результате которого должны быть заполнены слоты фрейма для описания действий.

Рис.2. Функциональная схема системы диалогового управления роботом

Высказывания, представленные на языке ситуационного управления, могут быть выражены на внутреннем семиотическом языке, сведены к последовательности символов. В свою очередь, команда оператора, поступающая от модуля распознавания речи, также является последовательностью символов. Таким образом, взаимодействие модуля распознавания и лингвистического модуля сводится к преобразованию одной последовательности символов в другую на базе грамматики, построенной экспертом. При этом сам лингвистический анализатор может быть представлен в форме конечного автомата [12-13].

Практически все, используемые в настоящее время способы распознавания речи, основаны на сравнении произносимых слов с эталоном. Учитывая, что словарь языка ситуационного управления ограничен, целесообразно предварительно составить базу используемых слов и иметь возможность в реальных условиях дополнять базу робота (дообучать его) новым словам, которые отсутствуют в базовом словаре. В большинстве работ, использующих такую концепцию, предполагается реализация модуля распознавания с помощью нейронных сетей. Так, в [14] для распознавания слов естественного языка используется трехслойная сеть Хэмминга. Сеть предварительно обучается на произношение базовых слов команды определенным пользователем. Этим, в частности, решается и задача обеспечения информационной безопасности системы управления, т.е. устраняется возможность доступа постороннего пользователя к управлению КР. Система речевого диалога может быть реализована и с помощью глубоких нейронных сетей без использования больших массивов данных, если речь идёт о профессионально –ориентированном диалоге, например, в задачах управления роботами медицинского назначения [15].

Диалог представляет собой последовательность речевых сообщений, которыми обмениваются робот и оператор. Заранее могут быть сформированы типовые сценарии диалога, такие как уточнение указаний оператора, уточнение плана операции, уточнение наблюдаемой роботом ситуации и т.д. Одними из успешно реализованных моделей диалога человека и робота оказались модели, основанные на использовании модифицированных сетей Петри [12]. Позициям сети Петри соответствуют состояния или текущие процессы в робототехнической системе, а переходам – поступающие события от других модулей системы диалога. Менеджер диалога в процессе своей работы в разработанной системе речевого диалогового управления обращается к модулю планирования и запрашивает предсказания

дальнейшего состояния модели мира и решения по дальнейшим действиям вплоть для достижения цели.

Интерфейс коллаборативного робота может не сводиться к обмену речевыми сообщениями, но включать также и жесты [16-17]. Дальнейшим развитием многомодального интерфейса является его дополнение системой двусторонней оценки эмоционального состояния оператора и имитации такого состояния роботом- партнером [18]. Для воспроизведения эмоций предлагались различные способы – чаще всего это либо компьютерная графика, либо антропоморфная конструкция, обтянутая искусственной кожей и, как правило, являющаяся копией лица конкретного человека. В последнем случае используется группа мимических сервоприводов (актуаторов), которые деформируют силиконовую кожу «головы» и непосредственно участвуют в синтезе эмоций. Результатом является синтез определенного выражения, соответствующего эмоции, воспринимаемой человеком. Например, эмоции тревоги, спокойного ожидания, напряжения и т.д.

Формализации эмоций по описанию мимического состояния лица человека может быть представлена в виде массива «показателей движения» (*action unit*, AU), характеризующих определенное эмоциональное состояние [19]. Формализовав это состояние с использованием лингвистических переменных, можно реализовать адаптивную нейросеть, основанную на системе нечеткого вывода и позволяющую определить эмоциональное состояние по наблюдаемому мимическому состоянию лица человека. Может быть решена и обратная задача – воспроизведение определенного мимического состояния на «лице» робота. Доказано, что использование модели «эмоционального» состояния в качестве артикуляции речи, т.е. её «эмоционального сопровождения» значительно облегчает восприятие сообщений человеком, что особенно важно в экстремальных ситуациях.

Отметим, что система речевого диалога может быть реализована с помощью глубоких нейронных сетей без использования больших массивов данных, если речь идёт о профессионально –ориентированном диалоге, например, в задачах управления роботами медицинского назначения [13].

5. О МОДЕЛИ ЧЕЛОВЕКА-ОПЕРАТОРА

Вопрос о моделировании работы человека-оператора в системах «человек-техника» имеет длительную историю. Можно заключить, что отдельные аспекты проблемы достаточно хорошо проработаны, в том числе, модели нервно-мышечной системы. Однако, практика показала, что применение традиционных математических моделей для описания

интеллектуальной деятельности человека бесперспективно. Именно нечеткая логика открывает новые возможности для создания моделей деятельности человека. Тем более, что большая часть нечетких моделей, используемых при управлении роботами, заимствована из опыта деятельности самого человека. Значение этих моделей для практики, прежде всего в том, что они позволяют построить модель эргатической коллаборативной системы (рис.1) в целом, включая деятельность человека–оператора. Такая модель может быть положена в основу эргономического проектирования КРТС. Другой аспект состоит в том, что для конкретной КРТС может быть создана модель деятельности человека-оператора, обеспечивающая её успешное функционирование. Такая «эталонная» модель может использоваться для отбора и обучения операторов. В общем случае, она содержит минимальные требования к человеку, способному управлять КРТС.

Не претендуя на описание деятельности человека-оператора робототехническими системами в целом, остановимся только на двух аспектах этой деятельности – восприятия информации и принятия решений. В работах Д.В. Поспелова и его коллег приводятся экспериментально полученные шкалы восприятия человеком наблюдаемых размеров объектов и расстояний между ними [1]. Аналогичные шкалы в дальнейшем были построены для восприятия сил и моментов, как по величине, так и по направлению, для восприятия цвета объектов, четкости изображений и по другим признакам. При этом, как правило, выдерживается принцип Дж. Миллера, хорошо известный в эргономике, который состоит в том, что число значений соответствующей переменной, воспринимаемых рецепторами человека не превышает 7±2. Это даёт основание представить соответствующий информационный канал оператора как фаззификатор, преобразующий физический сигнал в нечеткую лингвистическую переменную, имеющую конечное число значений.

В результате работы этого «естественного» анализатора человек может составить представление (умственную модель) обстановки, включая состояние управляемого объекта. Конечно, успешность решения этого этапа зависит от индивидуального уровня пространственного мышления человека, который может быть установлен с помощью предварительных экспериментальных исследований. Тем не менее, это представление и является основой для последующего принятия решений. В тех случаях, когда робот обладает системой, позволяющей автономно решать целый ряд задач, связанных с перемещением в пространстве с заранее неизвестной структурой, включая движущиеся объекты, это решение заключается в постановке

терминальной задачи. Например, связанно с выходом мобильного робота в заданное на карте положение. В более сложных случаях возникает проблема предварительного планирования последовательности задач, которые нужно решить, чтобы выполнить конечную цель операции. Тогда в качестве описания процедуры принятия последовательности решений, т.е. планирования действий человеком может быть использована уже упомянутая выше процедура разрешения противоречий, т.е. обратного (нечеткого) логического вывода, в ходе которой человек последовательно просматривает варианты решения задач, начиная с этапа её окончания и вплоть до текущего состояния ситуации [9]. Эта процедура вполне соответствует реальному процессу мышления человека, планирующему решение сложной ситуационной задачи.

Особую роль в изучении проблем управления коллаборативными роботами, включая построение моделей управляющей деятельности человека должны играть вопросы психологии взаимодействия человека и робота [20-21]. Эти проблемы еще ждут своих исследователей.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Широкое внедрение робототехники в процессы профессиональной деятельности предполагает доступность управления роботами для человека, не обладающего специальной подготовкой в области робототехники. Теперь оператор управляет не движениями робота, а предметной деятельностью, или поведением робота путем постановки задач подобно тому, как он работал бы с человеком-ассистентом. Однако, реализация такого способа управления требует привлечения «нечетких» способов взаимодействия человека с роботом, таких как речевой диалог, жестикуляция. В свою очередь, эти способы предполагают применение лингвистических переменных, методов нечеткого вывода, нечетких моделей поведения. Большое значение для обеспечения эффективности управления приобретает и анализ психологических проблем взаимодействия человека и «интеллектуальной» робототехнической системы, связанных с «взаимным пониманием» ситуации и поставленных задач, а также выборе наиболее целесообразного поведения для достижения поставленной цели.

Задача «взаимопонимания» человека и КРТС может быть облегчена за счет средств имитации «эмоционального состояния» робота, и анализа состояния самого оператора. К новым задачам, которые требуют внимания исследователей КР, следует отнести задачу «смешанного» многоагентного управления, т.е. задачи управления

группами, включающими как людей, так и роботов. Недостаточно изучены и проблемы психологии взаимодействия человека и робота.

Литература

1. Кандрашина Е.Ю., Литвинцева И.В., Поспелов Д.А. Представление знаний о пространстве и времени в интеллектуальных системах. – М.: Наука, 1989.
2. Kharlamov A., Ermishin K. Voice Dialogue with a Collaborative Robot Driven by Multimodal Semantics. Interactive Collaborative Robotics. First international Conference, ICR 2016 // Ed. by A.Ronzhin, G. Rigoll, R. Meshcheryakov. – Springer, LNAI 9812 P. 225-233.
3. Ющенко А.С. Диалоговое управление роботами на основе нечеткой логики. // Экстремальная робототехника: Сборник докладов всероссийской научно-технической конференции. – Изд-во «Политехника-сервис» – С-Пб: 2015, С. 143-146.
4. Володин Ю.С., Михайлов Б.Б., Ющенко А.С. Нечеткая классификация препятствий мобильным роботом с использованием телевизионной системы пространственного зрения // Сб. научных трудов 6-й международной научно-практической конференции «Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте». – М.: Физ.-мат. лит., 2011. Т.1. С. 372-380.
5. Shuai Yin, ArkadyYuschenko Object Recognition of the Robotic System with Using a Parallel Convolutional Neural Network //Industry 4.0 Issues & New Intelligent Control Paradigms //Ed. By A.G.Kravetz - Springer, 2019, P. 3-12.
6. Михайлов Б.Б.., Назарова А.В., Ющенко А.С. Автономные мобильные роботы-навигация и управление // Известия ЮФУ. Технические науки, №2, С. 48-67.
7. Жданов А.А. Автономный искусственный интеллект.: Изд-во «БИНОМ. Лаборатория знаний». – М.: 2008, 359 С.
8. Ющенко А.С. Интеллектуальное планирование в деятельности роботов.// Мехатроника, автоматизация, управление. 2005. №3. С. 5-18.
9. Магазов С.С. Когнитивные процессы и модели. – М.: Изд. ЛКИ, 2007, 248 с.
10. Герасимов В.Н. К вопросу управления движением мобильного робота в динамической среде// Робототехника и техническая кибернетика. 2014. № 1(2). С. 44-51.
11. Ющенко А.С., Тачков А.А. Интегрированная система управления пожарным разведывательным роботом. // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Приборостроение. Спецвыпуск №6. «Робототехнические системы», 2012, С. 106-111.
12. Жонин А.А. Алгоритм обучения менеджера диалога речевой диалоговой системы управления роботом. // Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте. Сб. научных трудов международной конференции. - М.: Изд-во Физ. мат. лит, 2011, С. 395-406.
13. Инь Шуай, Ющенко. А. С. Диалоговая система управления роботом на базе теории конечных автоматов // Мехатроника, Автоматизация, Управление. -ISSN 1684-6427, Т. 20, 2019, №11, С.686-695.
14. Majewski M., Kacalak W. Speech-Based Interfaces with Augmented Reality and Interactive Systems for Controlling Mobile Cranes. - First international Conference,

ICR 2016 // Ed. by A.Ronzhin, G. Rigoll, R. Meshcheryakov. Springer, LNAI 9812 P. 89-98.
15. Shuai Yin, Arkady Yuschenko The application of the convolutional neural network to organize the work of a collaborative robot - surgeon assistant. //4-th International Conference Interactive Collaborative Robotics. ICR-2019/Ed. by A. Ronzhin, G. Rigoll, R. Meshcheryakov. Springer, LNAI11659, August 2019. P. 287-297.
16. Rogalla O., Ehrenmann M., Zöllner R., Becher R., Dillmann R. Using gesture and speech control for commanding a robot assistant.// Proceedings of the 11th IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication (ROMAN), Berlin, September 2002, – P. 454-459.
17. Gruber I., Ryumin D., Hruz M., Karpov A. Sign Language Numerical Gestures Recognition Using Convolutional Neural Network. //Third International Conference, ICR 2018 // Ed. by A. Ronzhin, G. Rigoll, R. Meshcheryakov. Springer, LNAI 11097 P. 70-77.
18. Yuschenko A., Vorotnikov S., Konyshev D., Zhonin A. Mimic Recognition and Reproduction in Bilateral Human-Robot Speech Communication. // Interactive Collaborative Robotics. First international Conference, ICR 2016 // Ed. by A. Ronzhin, G. Rigoll, R. Meshcheryakov. Springer, LNAI 9812. P. 133-142
19. Ekman P., Friesen W., Hager J. Facial Action Coding System (FACS), [Электронный ресурс] http://www.paulekman.com/facs/, 2002 – Date of access 01.08.2014.
20. Ющенко А.С. Эргономические проблемы коллаборативной робототехники// «Робототехника и техническая кибернетика» – С.-Пб.: Изд-во ЦНИИ РТК, 2019, №7 (2). С. 85-93.
21. Ющенко А.С. Коллаборативная робототехника и человеческий фактор // Труды Института психологии РАН, «Актуальные проблемы психологии труда инженерной психологии и эргономики», вып. 9 // Под ред. А.А. Обознова и А.Л. Журавлева. – М.:, Изд-во Института психологии РАН, 2020, С.83-103.

УДК 004.4, 681.3

ПРЕДИКТИВНАЯ АНАЛИТИКА НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКИХ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ*

***Ярушкина Н.Г.**, д.т.н.*
e-mail: jng@ulstu.ru
УлГТУ

1. ВВЕДЕНИЕ

Предиктивная аналитика – класс методов анализа данных и прогнозирования будущего поведения объектов и субъектов. Предиктивная аналитика использует как статистические методы, так и методы интеллектуального анализа данных. Методы искусственного интеллекта в задачах предиктивной аналитики представляют знания о взаимодействии многих факторов проблемной области (ПрО).

Для решения задач предиктивной аналитики используют модели проблемной ситуации, которые обладают следующими свойствами:

- представляют динамику развития ситуации;
- используют знания о проблемной ситуации, о взаимодействии многих факторов;
- учитывают факторы неопределенности.

В настоящей статье рассмотрим применимость методов нечетких временных рядов и онтологического инжиниринга применительно к задачам предиктивной аналитики. Соответствие свойств предиктивной аналитики и исследуемых методов интеллектуального анализа данных представим в таблице 1.

Большое количество современных работ по предиктивной аналитике [1] построено в логике использования машинного обучения, примененного к большим данным. В таких работах обычно не рассматривается структура наборов данных, основания для предварительной обработки данных, в результате модели проблемной ситуации и эвристики проблемной области остаются латентными.

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 18-47-730019 р_а

Таблица 1. Соответствие свойств предиктивной аналитики и методов интеллектуального анализа данных

Свойство предиктивной аналитики	Метод интеллектуального анализа данных
Представление динамики данных	Нечеткие временные ряды (НВР), в том числе ряды нечетких тенденций и нечеткие временные ряды второго рода
Представление знаний о проблемной ситуации, о контексте проблемной ситуации, требующей прогнозирования будущего поведения	Онтологии, информационные гранулы
Факторы неопределенности	Нечеткие системы
Учет взаимодействия многих факторов	Использование для прогнозирования множества временных рядов, интегральных оценок

Набор выбранных методов использован для построения средств прогнозирования успешности проектов разработки программного обеспечения.

2. НЕЧЕТКИЕ ВРЕМЕННЫЕ РЯДЫ КАК СРЕДСТВО ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ДИНАМИКИ ПРОБЛЕМНОЙ СИТУАЦИИ

2.1. Нечеткий временной ряд. Временной ряд нечетких тенденций

В отличие от стохастической неопределенности нечеткость может быть использована для принятия предметно-ориентированных решений на основе приближенных рассуждений человека. Формализация интеллектуальных операций, моделирующих нечеткие высказывания человека о состоянии и поведении сложных явлений, образует сегодня самостоятельное направление научно-прикладных исследований, получившее название «нечеткое моделирование» [2]. Указанное направление включает комплекс задач, методология решения которых опирается на теорию нечетких множеств, нечеткой логики, нечетких моделей (систем) и гранулярных вычислений. Для решения задач предиктивной аналитики необходимы новые методы, одними из которых могут быть гранулярные вычисления [3]. В данном случае информационная гранула будет характеризовать отрезки временного ряда по трем позициям: направление, интенсивность и длительность изменения. Это позволит применять экспертные суждения вида: «если наблюдается длительный интенсивный рост, то

это означает что...» для анализа поведения фактора проблемной ситуации.

Понятия, определения, методы обработки, в том числе прогнозирования на основе нечетких временных рядов, рядов нечетких тенденций изложены в [7].

2.2. Нечеткий временной ряд с неопределенностью второго рода

Отличительной особенностью моделирования объектов для задач предиктивной аналитики является наличие неопределенности, имеющей разную природу: порождаемая высказываниями эксперта, неопределенность значений показателей, косвенное влияние скрытых факторов и зависимостей. В современных условиях немаловажное значение приобретают системы прогнозирования, способные эффективно моделировать и представлять процессы и объекты, оказывающие большое влияние на достижение целей управления.

Нечеткие множества первого порядка (типа 1) используется для представления или моделирования неопределенностей предметной области. Подробное изложение методов можно найти в [4]. В 1975 г. Л.А. Заде представил нечеткие множества второго порядка (типа 2) и нечеткие множества более высоких порядков, для устранения недостатков нечетких множеств типа 1. Эти недостатки можно отнести к проблеме представления функций принадлежности точными действительными числами. Решением данной проблемы может стать применение нечетких множеств типа 2, в которых границы областей принадлежности сами являются нечеткими. При каждом значении переменной x из универсума X значение само является функцией, а не значением в точке. Такая функция представляет нечеткое множество типа 2, которое является трехмерным, а само третье измерение добавляет новую степень свободы для обработки неопределенностей. В [4] Дж. Мендель определяет и дифференцирует два типа неопределенностей, случайных и лингвистических. Первый тип характерен, например, для обработки статистических сигналов, а характеристика лингвистических неопределенностей содержится в системах с неточностями на основе данных, определяемых, например, через высказывания эксперта. Над нечеткими множествами типа 2 можно выполнять операции объединения, пересечения и дополнения. Так как нечеткие множества типа 2 имеют расширенное представление неопределенностей, то это создает дополнительную вычислительную сложность. При использовании нечеткой функции принадлежности второго типа формируют область, которая называется отпечатком неопределенности (footprint of uncertainty, FOU). В отличие от случая

использования функции принадлежности с четкими границами, значения функции принадлежности типа 2 сами являются нечеткими функциями. Такой подход дает преимущество в виде приближения нечеткой модели к словесной. Люди могут иметь разные оценки одной и той же неопределенности. Особенно это касается оценочных выражений. Поэтому и возникла необходимость исключить однозначное сопоставление полученного значения степени функции принадлежности. Таким образом, при задании экспертом степеней принадлежности уменьшается риск накопления ошибок из-за не включения точек, расположенных около границ функции и находящихся под сомнением. Размытие границ – это первый шаг в переходе от нечетких множеств типа 1 к нечетким множествам типа 2. На втором шаге требуется выбирать вид функции принадлежности, как это делаем для нечетких множеств типа 1. Для снижения вычислительной сложности прогнозирования нечетких временных рядов типа 2 часто используют интеграцию интервальных и нечетких множеств.

2.3. Потенциал прогнозирования на основе нечетких временных рядов

Для прогнозирования нечетких временных рядов типа 2 был разработан специальный алгоритм [5,6].

Алгоритм прогнозирования временного ряда, смоделированного при помощи нечетких множеств типа 2:

1. Определить универсум для значений ряда, минимальное и максимальное значение временного ряда соответственно.
2. Задать функции принадлежности для временного ряда и количество функций принадлежности нечетким множествам. Количество функций принадлежности и, соответственно, количество нечетких множеств выбирается достаточно небольшим. Мотивация данного решения – многоуровневый подход к моделированию временного ряда. На каждом уровне выгодно сокращать количество нечетких множеств для сокращения размерности множества отношений. Разумеется, это приведет к снижению качества аппроксимации исходного временного ряда. Однако задание собственного набора функций принадлежности на втором и более высоких уровнях приведет к повышению точности аппроксимации с увеличением числа уровней.
3. Определить нечеткие множества для ряда.
4. Фаззифицировать ряд
5. Произвести фаззификацию второго уровня.

6. Установить отношения. Правила фиксируются в виде пар нечетких множеств в части антецедентов и консеквентов.
7. По набору правил произвести вывод прогноза для первого и второго уровней. Прогноз вычисляется центроидным методом сначала на нечетких множествах типа 1 затем на нечетких множествах типа 2.
8. Оценить ошибки.

Модели, а также алгоритмы анализа и прогнозирования НВР подробно описаны в работе [5].

3. ОНТОЛОГИЧЕСКОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ЗНАНИЙ О ПРОБЛЕМНОЙ СИТУАЦИИ, ТРЕБУЮЩЕЙ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ БУДУЩЕГО ПОВЕДЕНИЯ

3.1. Нечеткие онтологии, информационные гранулы

Задача трансляции НВР в нечеткие онтологии обусловлена необходимостью учета особенностей и правил предметной области, к которой относится объект наблюдения для задач предиктивной аналитики, которые подразумевают не только использование регрессионного и корреляционного анализа, но и качественных суждений о будущей ситуации в целом. При использовании НВР целесообразно использовать нечеткие онтологии [8, 9], которые имеют следующие преимущества для представления проблемной ситуации и контекста предиктивных рассуждений.

- Возможность бесшовной интеграции с предметными онтологиями, определяющими особенности анализируемой предметной области.
- Хранение и обновление характеристик НВР с привязкой к предметной области.
- Унифицированное преставление показателей НВР для дальнейшего анализа и логического вывода.

В настоящее время базовой нотацией представления нечёткой онтологии является стандарт FuzzyOWL. Для реализации функции трансляции данных НВР в нечеткую FuzzyOWL – онтологию была разработана программная система [10].

3.2. Онтологии нечетких временных рядов

В основе методики трансляции данных НВР в нечеткую FuzzyOWL лежит соответствие, приведенное в таблице 2.

Таблица 2. Таблица трансляции НВР в FuzzyOWL-онтологию

№	Параметр НВР	Элемент нечеткой онтологии FuzzyOWL
1	Значение ВР	DataType property объектов класса Point – hasValue
2	Временная метка	DataType property объектов класса Point – hasDate
3	Нечеткая метка	Annotation property объектов класса Point – fuzzyLabel
4	Тенденция	Annotation property объектов класса Point – fuzzyLabel
5	Интенсивность	Свойство modifier в Annotation property объектов класса Point
6	Функция принадлежности	Свойства fuzzyType в Annotation property объектов Point
7	Характеристика, представленная в виде наборов ВР	Объекты класса Indicators

3.3. Методы формирования онтологий из гетерогенных источников данных

3.3.1. Формирование онтологий из wi-ki ресурсов

Формирование онтологий проблемной ситуации предиктивной аналитики может представлять собой достаточно трудоемкую задачу. Ядро онтологии в форме семантического графа отношений возможно извлечь из различных источников слабо структурированной информации. В настоящее время популярным информационным ресурсом является Википедия. В ходе исследования, представляемого в статье, были разработаны трансформаторы wiki-ресурсов в OWL формат онтологии [11, 12].

Wiki-ресурс – веб-сайт, структуру и содержимое которого пользователи могут самостоятельно изменять с помощью инструментов, предоставляемых самим сайтом, с применением специального языка разметки. В современные системы управления проектами программных систем (ПС) включены средства для формирования wiki ресурсов. Важную роль в описании архитектуры программной системы играют системные файлы - readme-файлы. Readme файлы в корневом каталоге проекта ПС обычно содержат описание проекта ПС в целом, его функции, назначение и особенности ПрО, в рамках которой данный проект разрабатывался. Таким образом, readme-файлы также могут выступать источником данных для формирования фрагментов онтологии ПрО. При заполнении онтологии

ПрО необходимо излевлекать из readme-файлов, основные сущности и бизнес-процессы ПрО. Readme-файлы стоит рассматривать как неструктурированные текстовые ресурсы на естественном языке (ЕЯ). Для извлечения сущностей и бизнес-процессов из readme файлов используются методы автоматической обработки текстов на ЕЯ.

3.3.2. Формирование онтологий из UML-диаграмм

Разработанные методы предиктивной аналитики были применены для проблемной области управления разработкой программного обеспечения. Для данной проблемной области в качестве основных источников знаний были выделены:

- UML-диаграммы, создаваемые при проектировании;
- исходный код, модифицируемый на протяжении всего жизненного цикла проекта;
- временные ряды, формируемые на основе информации, получаемой из системы контроля версий.

В каждом источнике знаний, формат представления первичной информации сильно разнится, вследствие чего невозможно работать со знаниями с помощью единого инструмента или общей методологии напрямую. В качестве наиболее подходящего способа хранения знаний в форме онтологий использован формат OWL. Одной из задач исследования является формирование T-box онтологии, позволяющей работать со знаниями, полученными из каждого источника знаний единообразно.

Средства UML позволяют разработать проект создаваемой системы, содержащий концептуальные элементы, такие как системные функции и производственные процессы. Диаграммы на языке UML применимы к описанию конкретных особенностей системы: классов, составляющих архитектуру системы, таблиц и связей, описывающих схему базы данных, функций операторов и серверов для создания схемы физического размещения. Язык UML позволяет описать разные аспекты системы, абстрагируясь от реализации, но при этом сохраняя индивидуальные черты. Именно поэтому в основу T-box разрабатываемой онтологии была положена метасхема языка UML.

Понятие класса существует как в UML, так и в OWL. Класс в OWL является множеством экземпляров. В качестве встроенных классов предложено множество всех экземпляров класса Thing и пустое множество экземпляров класса Nothing. Пользовательские классы связаны отношениями с помощью объектных свойств и литеральными значениями с помощью свойств типов данных.

UML диаграмма классов рассматривает класс как совокупность внутреннего устройства и поведения объектов. Правила нотации UML предоставляет аналитику широкие возможности для выражения диаграммы классов, которые тем или иным способом реализуются в конкретном инструменте. В UML класс определяется как структурная единица диаграммы. Классы предметной области связаны отношениями с помощью объектных свойств и литеральными значениями с помощью свойств типов данных. Концепты класса отличаются семантически, но возможна трансляция на уровне иерархии классов. Внутреннее устройство классов UML-диаграммы можно транслировать в OWL классы, используя объектные свойства и свойства типов данных.

В процессе проведенного исследования [13] решена задача преобразования иерархии классов UML в иерархию классов OWL.

3.3.3. Формирование онтологий из схем реляционных баз данных

Системы управления базами данных (СУБД) являются основными частями современных ПС, содержат перечень основных сущностей ПрО. Структура баз данных проекта является важнейшим фактором прогнозирования успешности проекта ПС. Самой распространенной моделью представления данных в СУБД на данный момент является реляционная модель данных (РМД). В ходе исследования [14] разработан подход к анализу схемы РМД для формирования фрагментов онтологии в разрезе сущностей ПрО.

Для извлечения фрагментов онтологии из РМД необходимо выполнить следующие шаги:

1. Создать онтологию результатов проектирования, формирующих физическое представление ПС с указанием типа СУБД.
2. Создать онтологию результатов проектирования, формирующих логическое представление ПС. Количество созданных сущностей онтологии должно быть равно количеству сущностей РМД. Названием сущности онтологии будет являться название сущности РМД.
3. Создать онтологию для представления сущностей ПрО, связав логические и физические факторы с помощью формирования множества отношений

4. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РАЗВИТИЯ ПРОБЛЕМНЫХ СИТУАЦИЙ

4.1. Прогнозирование на основе множества временных рядов

Рассмотрим прогнозирование развития ситуации на основе множества временных рядов на примере развертывания проекта

разработки ПС. Руководителю проекта необходимо выполнить прогнозирование возможных вариантов развития проекта и своевременно принять проектные и организационные решения, повышающие эффективность разработки. Одним из наиболее выразительных способов представления знаний о ходе разработки являются временные ряды основных показателей проекта. В процессе проектирования руководитель проекта может эффективно отследить состояние и динамику реализации проекта на основе набора временных рядов, описывающих проект:

$$P = <TS_{releases}, TS_{commits}, TS_{tasks}, TS_{concepts}, TS_{ststes}, F_{ststes}> ,$$

где:

- $TS_{releases}$ – временной ряд версии программного обеспечения, поставляемого клиентам (release);
- $TS_{commits}$ – временной ряд изменений исходного кода (commits);
- TS_{tasks} – временной ряд задач (tasks);
- $TS_{concepts}$ – временной ряд изменённых, добавленных и удаленных концептов онтологии предметной области, извлеченных из диаграммы классов проекта за последний этап проектирования или извлеченных из исходного кода программы за последний этап или спринт разработки;
- TS_{ststes} – временной ряд состояний программного проекта, основанный на интеграции показателей временных рядов, характеризующий проект;
- F_{ststes} – прогноз состояний программного продукта, полученный с помощью выбранного коллектива или комбинации методов. Приведем пример формализации проблемной области, достаточной для решения задач предиктивной аналитики.

$$TS_{releases} = \left\langle P_1^{rel}, ..., P_i^{rel}, ..., P_N^{rel} \right\rangle ,$$

где N – количество точек временного ряда $TS_{releases}$; P_1^{rel} – точка временного ряда $TS_{releases}$;

$$P_1^{rel} = \left\langle Label, Date_{plan}, Date_{fact} \right\rangle ,$$

где $Label$ – метка или название сборки, позволяющее её идентифицировать; $Date_{plan}$ – дата сборки по плану; $Date_{fact}$ – дата поставки сборки по факту.

$$TS_{commits} = \left\langle P_1^{com}, ..., P_i^{com}, ..., P_N^{com} \right\rangle ,$$

где N – количество точек временного ряда $TS_{commits}$; P_1^{com} – точка временного ряда $TS_{commits}$.

$$P_1^{com} = \langle Label, Date, Operation, Type, Author \rangle,$$

где:

- *Label* – уникальный номер и комментарий к изменению исходного кода, позволяющее её идентифицировать;
- *Operation*– операция изменений: {*Addition, Edit, Remove, All*};
- *Type* – тип вносимых изменений: {*Gui, Business Logic, Subject area*};
- *Date* – дата внесения изменения в исходный код;
- *Author* – автор изменений.

$$TS_{tasks} = \langle P_1^{task}, ..., P_i^{task}, ..., P_N^{tasks} \rangle,$$

где N – количество точек временного ряда TS_{tasks}; P_1^{task} – точка временного ряда TS_{tasks}.

$$P_1^{task} = \langle Label, Date_{plan}, Date_{fact} \rangle,$$

где:

- *Label* – уникальный номер и название задачи в программе, позволяющие её идентифицировать;
- $Date_{plan}$ – дата реализации задачи по плану;
- $Date_{fact}$ – дата реализации задачу по факту.

$$TS_{concept} = \langle P_1^{concept}, ..., P_i^{concept}, ..., P_N^{concept} \rangle,$$

где N – количество точек временного ряда $TS_{concept}$; $P_1^{concept}$ – точка временного ряда $TS_{concept}$.

$$P_i^{concept} = \langle Label, Date \rangle,$$

где *Label* – уникальный номер версии проектного решения; *Data* – дата создания новой версии проектного решения.

$$TS_{states} = \langle P_1^{state}, ..., P_i^{state}, ..., P_N^{state} \rangle,$$

где N – количество точек временного ряда TS_{states}; P_1^{state} – точка временного ряда TS_{states};

$$P_i^{state} = \langle Date, State \rangle,$$

где *Date* – дата присвоения проектному решению данного состояния; *State* – одно из множества состояний проекта {*Start, Unexpected fast, fast, Normal, Stable, Chaotic, Danger, Fail*}.

$$F_{states} = \langle P_1^{state}, ..., P_i^{state}, ..., P_N^{state} \rangle,$$

где N – количество точек временного ряда F_{states}; P_1^{state} – точка временного ряда F_{states}.

$$P_i^{state} = \langle Date, State \rangle$$

где *Date* – дата присвоения проектному решению данного состояния, *State* – одно из множества состояний проекта {*Start, Unexpected fast, fast, Normal, Stable, Chaotic, Danger, Fail*}.

4.2. Прогнозирование на основе временного ряда развития концептов проекта разработки программной системы

Современные крупные проекты ПС преимущественно создаются в объектно-ориентированной парадигме. Формат представления знаний должен позволять максимально эффективно описывать иерархическую систему взаимосвязанных классов для выражения знаний о структуре проекта и взаимодействия объектов этих классов для представления знаний о поведении системы.

Формирование представления знаний в рамках производственного процесса никогда не прекращается. Выбранное представление знаний должно позволять быстро вносить изменения. Изменения могут вноситься не только на уровне утверждений о концептах, но и на уровне самих концептов.

5. МЕТОДЫ ПРЕДИКТИВНОЙ АНАЛИТИКИ В ЗАДАЧАХ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ УСПЕШНОСТИ ПРОЕКТОВ РАЗРАБОТКИ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

Методы предиктивной аналитики были применены для управления проектом в рамках НИР разработки Автоматизированной системы балансировки мощностей системы управления АО «АВИАСТАР-СП». Заключение о перспективах проекта было предложено делать на основе как множества временных рядов рассматриваемого проекта (проект НИР), так и на основе множества временных рядов структурно и семантически сходих проектов из репозитория github. Структурная и семантическая схожесть определялась на основе метрик сходства ПС [15] по онтологическому представлению ПрО.

На рис.1 изображены временные ряды состояний структурно-семантически схожих программных проектов из репозитория github, проекта НИР и полученный прогноз.

Рис.1. Результаты управления проектом на основе временных рядов структурно-схожих проектов

Из результатов эксперимента видно, что несмотря на ограниченность временных рядов структурно-семантически схожих проектов удалось скорректировать развитие НИР относительно прогнозных значений.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование позволяет сделать вывод о том, что интеграция современных методов интеллектуального анализа данных и нечетких временных рядов являются результативным инструментарием предикативной аналитики.

Литература

1. Tsaur R.C., Yang J.C.O., Wang H.F. Fuzzy relation analysis in fuzzytime series model // Computers & Mathematics with Applications. 2005. Vol. 49 (4). pp. 539-548.
2. Perfilieva I., Yarushkina N., Afanasieva T., Romanov A. Time series analysis using soft computing methods // International Journal of General Systems. 2013. Vol. 42 (6). pp. 687-705.
3. Wang D., Pedrycz W., Li Z. A Two-Phase Development of Fuzzy Rule-Based Model and Their Analysis // IEEE Access. 2019. Vol. 7. pp. 80328-80341.
4. Mendel J.M., John R.I.B. Type-2 fuzzy sets made simple // IEEE Transactions on fuzzy systems. 2002. Vol. 10 (2). pp. 117-127.
5. Romanov A, Voronina V., Guskov G., Moshkina I., Yarushkina N. Discrete and Fuzzy Models of Time Series in the Tasks of Forecasting and Diagnostics // Axioms, Vol. 9(2), 49, 2020, https://www.mdpi.com/2075-1680/9/2/49.

6. Romanov A.1, Filippov A.1, Yarushkina N. Application of type-2 fuzzy sets for analyzing production processes. Springer-Verlag GmbH. Lecture notes in computer science. LNAI. 2019. pp. 346-357.
7. Ярушкина Н.Г., Афанасьева Т.В., Перфильева И.Г. Интеллектуальный анализ временных рядов. Сер. Высшее образование. 2012. Москва. Издательство "Форум" 159 с.
8. Bobillo F., Straccia U. Fuzzy ontology representation using OWL 2 // International journal of approximate reasoning. 2011. Vol. 52 (7). pp. 1073-1094.
9. Bobillo F., Straccia U. Generalizing type-2 fuzzy ontologies and type-2 fuzzy description logics // International Journal of Approximate Reasoning. 2017. Vol. 87. pp. 40-66
10. Ярушкина Н.Г., Мошкин В.С., Ишмуратова Г.Р., Андреев И.А., Мошкина И.А. Применение способа интеграции нечётких временных рядов и нечётких онтологий в задачах диагностики технических систем // Онтология проектирования. 4 (30).2018. С. 594-604.
11. Yarushkina, N., Moshkin V., Filippov A., Guskov G. (2018) Developing a Fuzzy Knowledge Base and Filling It with Knowledge Extracted from Various Documents. In: Rutkowski L., Scherer R., Korytkowski M., Pedrycz W., Tadeusiewicz R., Zurada J. (eds) Artificial Intelligence and Soft Computing. ICAISC 2018. Lecture Notes in Computer Science, vol. 10842. Springer, Cham.
12. Moshkin, V., Yarushkina, N., Andreev, I. The Extending the Knowledge Base of the Intelligent CAD of a Design Organization Using Semantic Analysis of Wiki-Resources. Lecture Notes in Electrical Engineering, 2021, 729 LNEE, pp. 695-703.
13. Yarushkina, N., Dudarin, P., Guskov, G. Two Phase Approach to Detection of Software Projects with Similar Architecture Based on Clustering and Ontological Methods. Studies in Fuzziness and Soft Computing, 2021, 393, c. 131-145.
14. V.V. Moiseev and I.A. Zagaichuk. Mapping from relational database to ontology based on initial model. CEUR Workshop Proceedings, 2648, 85- 94, 2020.
15. Филиппов А.А., Мошкин В.С., Гуськов Г.Ю., Ярушкина Н.Г. Применение нечеткой базы знаний проблемной области в задаче поиска архитектурно подобных программных проектов // Нечеткие системы и мягкие вычисления. 2017. Т. 12. № 2. С. 107-120.

УДК 004.8

ПРЕДМЕТНО-ИЗОБРАЗИТЕЛЬНЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ОТНОШЕНИЙ В МОДЕЛЯХ МИРА КОГНИТИВНЫХ ГИБРИДНЫХ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ*

Колесников А.В., *д.т.н.*
e-mail: avkolesnikov@yandex.ru
БФУ им. И. Канта,
Солдатов С.А., *к.т.н.*
e-mail: ssacompany@mail.ru
ООО МТС ИТ

«*Мы можем научится использовать три принципиальных фактора нашего опыта: Пространство, Время и Знание – сознательно, а не случайно. Когда мы несколько лучше поймем Пространство и Время, тогда мы сможем увидеть, что все, что мы воспринимаем, все, что «есть», суть Знание*».

Тартанг Тулку Ринпоче

1. ВВЕДЕНИЕ

Следуя междисциплинарной «Теории больших систем» Г.С. Поспелова и В.А. Ирикова [1], работам А.А. Ерофеева, В.М. Лохина, И.М. Макарова, А.О. Полякова по «интеллектуальным системам управления» [2, 3] и их последователей [4], концепции «интеллектное управление динамическими системами» С.Н. Васильева, А.К. Жерлова, Е.А. Федосова и Б.Е. Федунова [5] и их последователей [6-10] и концепции интеллектуально-геометрического управления, интегрирующей возможности геометрического [11] и автоматического управления [12] на стыке современной теории управления и искусственного интеллекта (ИИ), работам Д.А. Поспелова по ситуационному управлению и семиотическому моделированию [13-15], социальным взглядам на природу интеллекта М. Минского, принципам организационно-системного подхода в ИИ В.Б. Тарасова [16], и гибридному интеллекту В.Ф. Венды [17],

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №19-07-00208

деятельность разработчика «автоматического партнера» по Р. Шенку [18] диспетчера-оператора в электроэнергетических системах (ЭЭС) рассматривается в контексте когнитивной инженерии [19-23] интегрированных интеллектуальных систем по Г.В. Рыбиной [24] и гибридных интеллектуальных систем (ГиИС) [25]. В.В. Величенко называл подобные исследования областью, где требуется «узнать», «понять», «запомнить», «оценить ситуацию», «найти решение», «проверить исполнение», началом огромной работы по расширению интеллектуальных возможностей человека, приобретающей взрывной характер в наше время.

Настоящая работа содержит результаты моделирования когнитивных механизмов схематизации предметно-изобразительных, образных представлений о пространственных отношений у оперативных работников оперативно-диспетчерских центров (ОДС) и развивает труды Д.А. Поспелова и В.Н. Пушкина [22, 26], в которых качество и надежность диспетчерского труда неразрывно связывают с построением в структурах мозга посредством «языка» информационных аналогов ресурсов той среды, в которой живет и действует человек-оператор. Воссоздавая тот или иной ресурс окружающей среды, оператор фиксирует его свойства относительно пространства-времени и в своем сознании изменяет отражаемый ресурс, преобразует его. Благодаря способности строить информационные модели («внутренние образно-концептуальные модели обстановки» по Г.В. Дружинину [27], «образно-концептуальные модели обстановки» по С.И. Магиду [28], «концептуальные модели деятельности» по С.А. Дружилову [20]), которые следует отличать от информационных моделей-мнемосхем на «языке мнемонического изображения» по Д.А. Ошанину [21], оператор апробирует варианты поведения «про себя», прежде чем начать действовать.

В этой связи актуально создание информационно-коммуникационных технологий компьютерной имитации когнитивных образований для усиления человеческого интеллекта в оперативной работе, путем дополнения естественных способностей оператора обрабатывать оперативно-технологическую информацию программно-аппаратными средствами (механизмами), расширяющими мыслительные возможности человека – когнитивными гибридными интеллектуальными системами (КГиИС) [29].

Начальные исследования [30,31] – попытка описания правосторонних механизмов профессиональной оперативной деятельности в ЭЭС и установках левосторонними, логико-языковыми средствами используя аппарат концептуальных графов и

семиотической модели по Д.А. Поспелову. В [32] рассмотрены результаты моделирования когнитивных механизмов схематизации предметно-изобразительных представлений отношений определения для кодирования знаний о ресурсах, свойствах и действиях изографами – объектами, специфицирующими отношение инцидентности в топологическом и метрическом пространствах, используя теоретико-множественные и предикативные представления.

Доклад посвящен моделированию изографами предметно-изобразительных представлений и трансформации пространственных отношений в когнитивном и оперативном образах (КО, ОО) информационных моделей «мир ресурсов, свойств, действий и операций», где актуальны концепты «состав», «иерархия», «структура», «процесс», «маршрут», «сеть», «место», «расположение», «положение» и «мир событий и ситуаций», где существуют знаки мгновенных действий, значимых для субъекта ОДЦ изменений в окружающей объективной реальности, в его поведении и внутреннем мире – событий и знаки сочетаний условий и обстоятельств, создающих определенную обстановку и положение – ситуации.

2. МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ИСКУССТВЕННОМ ИНТЕЛЛЕКТЕ: КОГНИТИВНЫЕ ГИБРИДНЫЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

Чтобы человек-оператор ОДЦ эффективно управлял сложной гетерогенной ЭЭС, ему необходим помощник, фильтр и усилитель разнообразия, имитатор «инженера разнообразия», предпочитающий эвристику перед алгоритмом [33, 34], интегратор методов, моделей, техники и технологий.

Интеграция [35] (от лат. integer – полный, цельный, ненарушенный) – процесс или действие, имеющий своим результатом целостность; объединение, соединение, восстановление единства. Интеграции присущ инсайт, высвечивание пространства светом осознания. Образно – как фонарик высвечивает из тьмы какое-то пространство: у одного субъекта фокус этого фонаря четок, ясен, у другого – расфокусирован и рассеян; у одного субъекта свет сильный, как прожектор, у другого – слабый и еле теплится [36]. В ИИ интеграция идет разными способами [25, 37]. Для ГиИС апробированы понятия «интегрированный метод», «интегрированная модель», «элемент (компонент) ГиИС», «гетерогенное модельное поле (ГМП)» и «архитектура ГиИС» в нескольких предметных областях.

Гибридная интеллектуальная система по А.В. Колесникову – схема, способ видения мира, неоднородность информации, касающаяся

организации пространства [38], система, в которой для решения задачи используется более одного метода имитации интеллектуальной деятельности человека. Традиционный взгляд на ГиИС, как на комбинатор-имитатор над разнообразием интеллектуальной деятельности человека-оператора в проблемных ситуациях излишне оптимистичен, а лингвистический подход к ним [25] – свидетельство господства вербального языка и аналитического мышления в Модели Мира западной традиции [39], не «способности» задействовать правосторонние, предметно-изобразительные (визуально-образные) представления и рассуждения оператора. Извлечения пользы из визуального языка образного восприятия, параллельного процессам вербально-аналитического мышления [40] в когнитивную инженерию возвратит субъект деятельности в пространство смыслов вещей, свойств и отношений откроет путь к качественному ИИ.

В рамках когнитивного искусственного интеллекта [41]: когнитивная гибридная интеллектуальная система – гибридная интеллектуальная система, элементы ГМП которой комбинируют предметно-изобразительные и предикативно-вербальные представления знаний, над которым ситуативно синтезируются интегрированные модели, используемые в двухзвенном механизме понимания и высказываний в качестве метода разрешения проблемы.

Отображение пространственных отношений и явлений в КГиИС предполагает разработку и включение в её ГМП геомоделей, визуальной переменной (фр. variables visuelles, англ. visual variables) графической семиологии Ж. Бертена [42], а в автономный базис – геоинформационных систем (ГИС) [43].

Идея КГиИС высказана в 2009 – 2012 гг. основателем инженерии образов И.Б. Фоминых и развита в работах А.В. Колесникова, В.А. Данишевского, А.Н. Аверкина, С.А. Ярушева, С.В. Ульянова, Л.В. Массель, В.Р. Кузьмина, А.А. Башлыкова, А.П. Еремеева и др.

Разрешение возникшей проблемной ситуации методами КГиИС с моделированием пространственно-временных отношений соединит чувственное и рациональное, единичное и всеобщее; оформит зарождающиеся у человека-оператора идеи; покажет структуру и динамику изменения ОО; поможет следить за движением мысли и фиксировать ее, существенно сократит время решения оперативных задач и снизит риск от ошибок.

3. ОНТОЛОГИЯ МОДЕЛИ МИРА ОПЕРАТИВНО-ДИСПЕТЧЕРСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ: ТРИАДА «ПРОСТРАНСТВО-ВРЕМЯ-ЗНАНИЕ»

«Психика как система управления поведением человека содержит виртуальный образ окружающей среды – Модель Мира … Синтезируя личный опыт и исторические традиции среды, Модель Мира интегрирует человека как личность и служит ему универсальным персональным компьютером, незаменимым при решении всех жизненных задач. Обращаясь к ней, он может определить, где находится в настоящее время, предвосхитить развитие событий и подготовиться действовать адекватно ситуации. В этом смысле Модель Мира можно рассматривать и как внутренний полигон, где отрабатываются проблемные ситуации, и как навигатор дальнейшего поведения» [44]. С разнообразием и значимостью Моделей Мира для ИИ можно познакомиться в [45-49].

Возникшая на Востоке «тройственная», «трехполюсная» логика целостного Разума рассматривает ситуацию как игру Пространства, Времени и Знания [50, 51-54].

Семантика Пространства – ориентабельность без фиксированного центра выражаемая цветом, формой и переживанием. Пространство гетерогенно, проявляется в разнообразии, зачастую не выражаемым количественно, это место деятельности и существования вещей в трех измерениях, это форма координации сосуществующих вещей. Макро- и микропространства есть в пределах всякой вещи, тела, предмета и объекта. Вещи расположены вне друг друга: рядом, близко, сбоку, внизу, вверху, внутри, сзади, спереди и т.д., и находятся в определенных количественных отношениях. Существующая в пространстве вещь – также пространство, перемещаясь, вещь не оставляет после себя свою пустую форму.

Семантика Времени – удерживающе-запоминающая структура с его объединяющим отношением «теперь», «одновременно». Время выражает и «охарактеризовывает» мир оператора-диспетчера. Время связывает, сцепляет события ситуации, вещи внутри ситуаций, демонстрирует Пространство. Вне Времени нет присутствия вещей, это фактор переднего плана, переменная, семантически связанная со случаем, и со статусом наблюдателя. Все временные соединения внутри ситуаций и между ними пронизаны пространством.

Семантика Знания – интерпретатора и демонстратора Пространства и Времени, непосредственного познавательного измерения всей реальности и опыта, взаимодействия между открытостью Пространства и проявляющимся творчеством Времени.

Знание управляет Пространством, Временем и всегда доступно, так как все обстоятельства суть полностью Пространство и Время, а последние не отделимы от Знания. Время поднимает Знание в совершенно новый вид переживания Пространства. Пространственное знание описывает реальные формы реальных пространственных объектов и пространственные отношения между ними [55].

4. ПРОСТРАНСТВО, КАРТЫ И ВРЕМЯ ВНУТРЕННЕГО МИРА ЧЕЛОВЕКА-ОПЕРАТОРА

Впервые карты мозга человека составлены в 1930-х г. канадским нейрохирургом У.Г. Пенфилдом, доказавшим, что сенсорные и двигательные зоны мозга так же, как и географические карты, имеют топографический характер [56]. Схематично это открытие изображают «гомункулусом» – человечком, части тела которого пропорциональны зонам мозга, в которых они представлены.

Нобелевские лауреаты Дж. О'Киф, Мэй-Бритт Мозер и Э. Мозер открыли клетки системы позиционирования мозга [57]. Эти нейроны названы «клетками места», при попадании в которые она активизируется и разряжается высокочастотными импульсами. Из этих клеток строится внутренняя, не связанная с сенсорными сигналами, пространственная навигационная «карта местности». Первым поддержавшим идею существования в мозге своеобразной «карты местности», был Э. Толмэн.

«Клетки решетки» впервые обнаружены в энторинальной коры крыс. Их активность у млекопитающих обусловлена пространственным положением животного и эти нейроны генерируют импульсы, когда крыса находится в узлах гексагональной решетки, характеризующейся ориентацией, фазой и шагом. Функциональные взаимоотношения клеток места и клеток решетки неясны.

Исследователи из норвежского Института Системной Нейронауки им. Кавли [58, 59] обнаружили «клетки времени» – сеть из клеток мозга, кодирующих эпизодическое время, и определяющих чувство времени в переживаниях и воспоминаниях человека и расположенных рядом с областью субъективного восприятия пространства. Одни «хронометры» помогают организму адаптироваться к солнечному ритму, а другие создают цепной сигнал, наподобие эффекта домино.

5. ЭВОЛЮЦИЯ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ В НАУЧНОЙ КАРТИНЕ МИРА ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Неопределенность интерпретации имен «пространство» и «время» важных характеристик Модели Мира человека-оператора, будоражила еще великие умы древности: Демокрита, Эпикура, Лукреция, Пифагора, Платона и Аристотеля, разными путями «боровшимися» со смыслом «пространства» [60].

Любая наличная ситуация, как игра Пространства, Времени и Знания, воспринималась в упрощенной картине мира материализма и классической механики И. Ньютона XIX в.: в пространстве и во времени движутся атомы – неизменно сущее, а вся пестрота предметов и явлений чувственного мира порождалась их взаимным расположением и движением. В физике и философии считалось, что материально лишь то, что вещественно, что можно непосредственно видеть, осязать и обонять. Г.В. фон Лейбниц, отрицал существование пространства в любом общепринятом смысле, а И. Кант утверждал, что человек представляет предметы в пространстве, вне себя, посредством «внутреннего чувства», как находящиеся во временных отношениях [61]. Физик и философ Э. Мах, в середине XVIII в. утверждал, что «пространство» – язык для выражения отношений между положениями объектов, но вне его не существует.

В середине XIX в. Дж. К. Максвелл на языке полей, показал, что электричество и магнетизм переплетены в электромагнитные поля. Движение стало пониматься не только как механическое перемещение, но и как распространение колебаний в поле, а ньютоновский принцип дальнодействия заменился фарадеевским близкодействием. Тем самым была привнесена абстрактность в ясную картину мира, а ее наглядность с развитием теории электричества исчезла, что резко изменило характер техники [62].

В середине XIX в. в электромагнитную картину мира вошло понятие вероятности. В 1945 г. Э.Р. Шредингер с позиций физики и химии в терминах волновой функцией объясняет явления в пространстве и в живом организме [63]. М. Борн, рассматривая вероятности нахождения электрона в определённом элементе пространства, окружающего ядро атома, дает статистическую интерпретацию волновой функции. В 1927 г. В. Гейзенберг, формулирует соотношение неопределённостей – краеугольного камня квантовой механики. Так пришла новая – квантово-полевая картина мира, объединившая в себе дискретность механической и непрерывность электромагнитной картин мира, впервые включившая

в себя наблюдателя-интерпретатора результатов исследований: мир таков, каков он есть, только благодаря существованию человека [64].

Человек XXI в. «погружен» в океан электромагнитных полей, покрывающих широкие области пространства. Язык полей стал выразительнее и занимает центральное место в формулировке физических законов [65]. Физики объясняют поля с помощью квантовой электродинамики (КЭД) [66] – физической теории, объединяющей квантовую механику, теории относительности и электрического поля. Электрический ток в КЭД – квантовый процесс передачи электроэнергии от источника к потребителю, связанный с образованием собственного магнитного поля проводника [67]. При входе энергии в проводник с током, кванты гравитационного поля поглощаются валентными электронами, их энергия преобразуется в электрополе проводника, и электроэнергия выдается потребителю. Анализ новейшего развития КЭД указывает на близость революционного переворота в технике и технологиях: 1) появятся принципиально новые средства и системы связи, работающие на сверхсветовых сигналах; медицина получит возможность детально исследовать энергетическое тело человека; 2) найдут практические приложения физические свойства времени, имеющие динамическое происхождение; 3) будет создана интеллектуальная силовая электроника: транзисторные реле, тиристорные коммутационные аппараты, регуляторы переменного тока и электропривод; компьютеры будут выполнять функции «разума», а силовая электроника и электропривод – «мускулов» [68]; 4) интеллектуальная защита и автоматика электросетей и электротехники будет строится гибридизацией КЭД и теории «самоорганизующегося электрона» [69].

6. ИЗОГРАФЫ – МОДЕЛЬ, МЕТОД И ИНСТРУМЕНТ ПРЕДМЕТНО-ИЗОБРАЗИТЕЛЬНОГО КОДИРОВАНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ОТНОШЕНИЙ В ГИБРИДНЫХ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

Изограф – расширение плоского гиперграфа по А.А. Зыкову на естественное и немедленное восприятие субъектом отношений в двух независимых измерениях по X и Y в ортогональной системе координат и третьем (независимом от X и Y) измерении по Z энергии светового потока по Ж. Бертену и на: 1) плоские прямоугольные координаты (геокоординаты); 2) метрическое пространство экранных координат интерактивной машинной графики и специфицирующие в топологии связные множества.

Онтологически предлагаемый ниже формализм изографов ограничен схематизацией отношений определения на ресурсах, свойствах и действиях ресурсов, их свойств и оперативных действий с ними, а также пространственных отношений ресурсов в ЭЭС и электроустановках.

Аналогично спецификации плоского гиперграфа [70] дадим разумное определение изографа, означающее следующее: 1) изограф допускает на топологической плоскости изображение, при котором каждая вершина представлена точкой, а каждое ребро – множеством, гомеоморфным кругу и содержащем все инцидентные (и только такие) вершины, причем налегание ребер разрешается лишь в непосредственной близости от общей инцидентной вершины; 2) не в ущерб естественности, будем считать ребра представления замкнутыми (т.е. гомеоморфными кругу с границей); 3) ограничимся тремя основными онтологически осмысленными геометрическими формами представлений ребер схематизирующими: квадратная (прямоугольная) – ресурс (допускается представление ресурса «линия электропередачи» линией); треугольная – свойство; пятиугольная стрелка – действие, круг – абстрактная, ментальная сущность, например, «событие»; 4) изображение изографа на топологической плоскости характеризуется шестью визуальными переменными энергии светового потока по Ж. Бертену: формой, размером, текстурой, цветом, ориентацией и контрастом; 5) изограф допускает воспроизведение (исполнение) изображения на метрической плоскости в экранных координатах компьютерных мониторов; 6) изображение изографа на метрической плоскости «привязано» к картографической проекции географических координат в плоские прямоугольные координаты (к геокоординатам); 7) знак означает равно по определению.

Будем называть изографом следующий объект

$$H = (\mathfrak{X}, \mathrm{P}_1, \mathrm{P}_2, \mathrm{P}_3),$$

где $\mathfrak{X} = \{X, U, V, W, M, \Pi, Э\}$ – неоднородное семейство множеств (носитель модели); $X = \left\{ x_i \middle| i \in \overline{1, N_X} \right\}$ – множество точек-вершин; $U = \left\{ u_{ij} \middle| i, j \in \overline{1, N_U} \right\}$ – множество линий-ребер; $V = \left\{ v_k \middle| k \in \overline{1,6} \right\}$ – множество визуальных переменных по Ж. Бертену: v_1 – форма, v_2 – размер, v_3 – текстура, v_4 – цвет, v_5 – ориентация, v_6 – контраст; $W = \left\{ W_k \middle| k \in \overline{1,6} \right\}$ – семейство множеств значений-градаций визуальных

переменных; $W_k = \left\{ w_l \middle| l \in \overline{1, N_{WK}} \right\}$ – множество значений-градаций v_k визуальной переменной; $M = \{m_1, m_2, ..., m_{NM}\}$ – множество топологических математических моделей; $\Pi = \{A_\Pi, D_\Pi, X_\Pi, Y_\Pi\}$ – семейство множеств картографической проекции географических координат в плоские прямоугольные координаты (геокоординаты); $A_\Pi = \left\{ a_{\Pi_1}, a_{\Pi_2}, ..., a_{\Pi_{N\Pi}} \right\}$ – множество алгоритмов обработки картографических данных; D_Π – множество исходных пространственно-координированных данных алгоритмов $a_{\Pi_j} \in A_\Pi \middle| j \in \overline{1; N\Pi}$; $X_\Pi = \{ x_\Pi | x_\Pi \in \square \}$, $Y_\Pi = \{ y_\Pi | y_\Pi \in \square \}$ – множества геокоординат; $Э = \{A_Э, D_Э, X_Э, Y_Э\}$ – семейство множеств экранной системы координат метрического эвклидова пространства; $X_Э = \{0, ..., 1023\}$, $Y_Э = \{0, ..., 767\}$ – множества экранных координат (натуральных чисел) по горизонтали и вертикали, соответственно, монитора с некоторым разрешением; $A_Э = \left\{ a_{Э_1}, ..., a_{Э_{NЭ}} \right\}$ – семейство множеств алгоритмов интерактивной машинной графики; $D_Э = \left\{ {}^{V_1}D_Э, ..., {}^{V_6}D_Э \right\}$ – семейство множеств исходных данных по каждой визуальной переменной для алгоритмов $a_{Э_i} \in A_Э \middle| i \in \overline{1; NЭ}$; P_1, P_2, P_3 – семейства множеств предикатов инцидентора, визуализатора и исполнителя соответственно.

Рассмотрим носитель модели X подробнее. Множество вершин X неоднородно и включает три подмножества вершин-точек планарной плоскости $X = \left\{ {}^{\Phi}X, {}^{K}X, {}^{B}X \right\}$, где ${}^{\Phi}X = \left\{ {}^{\bullet}X, {}^{-}X, {}^{\square}X, {}^{\square}X, {}^{\square}X, {}^{\triangleright}X, {}^{T}X \right\}$ – множество формообразующих вершин фигур: ${}^{\bullet}X = \left\{ {}^{\bullet}x \right\}$ – «точка»; ${}^{-}X = \left\{ {}^{-}x_1, {}^{-}x_2 \right\}$ – «линия» (прямая, кривая, замкнутая); ${}^{\square}X = \left\{ {}^{\square}x_1, ..., {}^{\square}x_4 \right\}$ – «квадрат»; ${}^{\square}X = \left\{ {}^{\square}x_1, {}^{\square}x_2, {}^{\square}x_3 \right\}$ – «треугольник»; ${}^{\square}X = \left\{ {}^{\square}x_1, {}^{\square}x_2 \right\}$ – «окружность»; ${}^{\triangleright}X = \left\{ {}^{\triangleright}x_1, ..., {}^{\triangleright}x_5 \right\}$ – «пятиугольная стрелка», ${}^{T}X = \left\{ {}^{T}x_1, ..., {}^{T}x_4 \right\}$ –

«текст»; множества вершин контура $^{K}X = \left\{ {}^{K}x_1, ..., {}^{K}x_{NK} \right\}$ и внутренней области $^{B}X = \left\{ {}^{B}x_1, ..., {}^{B}x_{NB} \right\}$ ребра-фигуры.

Ребра $u_{ij} \in U$ изографа – множества, гомеоморфные кругу с границей и содержащими все инцидентные вершины.

Визуальная переменная $v_j \in V \left| j \in \overline{1,6} \right.$ принимает значение w_{jm} на соответствующих множествах $V_1 = \left\{ V_1^0, V_1^n \right\}$, $V_2 = \left\{ w_{21}, ..., w_{2S} \right\}$, $V_3 = \left\{ w_{31}, ..., w_{3T} \right\}$, $V_4 = \left\{ w_{41}, ..., w_{4C} \right\}$, $V_5 = \left\{ w_{51}, ..., w_{5O} \right\}$, $V_6 = \left\{ w_{61}, ..., w_{6K} \right\}$; $V_1^0 = \left\{ {}^{\bullet}w_{11}^0, {}^{-}w_{12}^0, {}^{\square}w_{13}^0, {}^{\square}w_{14}^0, {}^{\square}w_{15}^0, {}^{\triangleright}w_{16}^0, {}^{T}w_{17}^0 \right\}$ – множество базовых символов форм (ноль в качестве правого верхнего индекса; левый верхний индекс символизирует формы: ${}^{\bullet}w_{11}^0$ – точки, ${}^{-}w_{12}^0$ – линии, ${}^{\square}w_{13}^0$ – треугольника, ${}^{\square}w_{14}^0$ – квадрата (прямоугольника), ${}^{\square}w_{15}^0$ – окружности (овала), ${}^{\triangleright}w_{16}^0$ – пятиточечной стрелки (стрелки), ${}^{T}w_{17}^0$ – текста). Базовые формы комбинируются по правилам исполнения операций над изографами, и результирующая форма-комбинация относится в множество $V_1^n = \{ {}^{\square}w_{11}^n, ..., {}^{\square}w_{1\text{А}}^n, {}^{\square}w_{11}^n, ..., {}^{\square}w_{1\text{В}}^n, {}^{\triangleright}w_{11}^n, ..., {}^{\triangleright}w_{1\text{Г}}^n \left| n \in \overline{1;N} \right.$ – производных (сложных) форм, где N – уровень сложности формы (если она содержит только базовые формы, то $n = 1$, если хотя бы одну форму первого уровня, то $n = 2$ и т.д.).

Число элементов $V_2 - V_6$ ограничено, мощности этих множеств психологически обоснованы и рассмотрены, например, в [44, 71].

Множество *M* топологических математических моделей объектов реального физического пространства (геометрических фигур), в системе условных геометрических построений, подчиненно целям геометрической деятельности и пространственного мышления, оперирующих образами, отражает систему пространственных, метрических и конструктивных свойств евклидова пространства и реализует задачи создания геометрических образов на интуитивном, логико-символическом, знаковом уровнях во внутреннем плане человека-оператора. Подробно изложено в [32].

Семейство множеств *П* – теоретико-множественное представление положения точки на земной поверхности (в

географической оболочке). При этом используются картографические проекции географических координат в плоские прямоугольные координаты (геокоординаты) и алгоритмы обработки картографических данных: система координат СК-95, система «Параметры Земли» ПЗ-90 [72] и Всемирная геодезическая система координат 1984 (WGS-84) [73]. Формат геокоординат: градусы и их десятичные доли (минуты и секунды не используются). Например, описание точки с координатами 45°34′55″ северной широты и 15°30′0″ западной долготы выглядит так: 45.581944°, –15.5°). Положительные знаки геокоординат представляются (в большинстве случаев опускаемым) знаком «+» либо буквами: «N» или «с. ш.» – северная широта, «E» или «в. д.» – восточная долгота; отрицательные знаки геокоординат представляются либо знаком «−», либо буквами: «S» или «ю. ш.» – южная широта, «W» или «з. д.» – западная долгота.

Семейство множеств $Э$ – теоретико-множественное представление экранной системы координат метрического эвклидова пространства E^2 с a priory определенным расстоянием между точками $(x_{Э1}, y_{Э1})$ и $(x_{Э2}, y_{Э2})$ как длина отрезка, их соединяющего. Подробно изложено в [32].

Отношения на носителе $\mathfrak{X}$ задаются семействами множеств предикатов $\mathrm{P}_1, \mathrm{P}_2, \mathrm{P}_3$ – инцидентора, визуализатора и исполнителя соответственно.

Инцидентор $\mathrm{P}_1 = \left\{ {}^{Ф}\mathrm{P}_1, {}^{K}\mathrm{P}_1, {}^{B}\mathrm{P}_1 \right\}$ – семейство множеств предикатов инцидентора формы фигуры

$$
\begin{gathered}
{}^{Ф}\mathrm{P}_1 = \left\{ {}^{\bullet}\mathrm{P}_1, {}^{-}\mathrm{P}_1, {}^{\square}\mathrm{P}_1, {}^{\square}\mathrm{P}_1, {}^{\square}\mathrm{P}_1, {}^{\triangleright}\mathrm{P}_1, {}^{T}\mathrm{P}_1 \right\}, \\
{}^{\bullet}\mathrm{P}_1 = \left\{ {}^{\bullet}\rho_1\left(u_i, {}^{\bullet}x\right) \middle| u_i \in U,\ {}^{\bullet}x \in {}^{\bullet}X \right\}, \\
{}^{-}\mathrm{P}_1 = \left\{ {}^{-}\rho_1\left(u_i, {}^{-}x_e\right) \middle| u_i \in U,\ {}^{-}x_e \in {}^{-}X, e \in \{1,2\} \right\}, \\
{}^{\square}\mathrm{P}_1 = \left\{ {}^{\square}\rho_1\left(u_i, {}^{\square}x_e\right) \middle| u_i \in U,\ {}^{\square}x_e \in {}^{\square}X, e \in \overline{1;4} \right\}, \\
{}^{\square}\mathrm{P}_1 = \left\{ {}^{\square}\rho_1\left(u_i, {}^{\square}x_e\right) \middle| u_i \in U,\ {}^{\square}x_e \in {}^{\square}X, e \in \overline{1;3} \right\}, \\
{}^{\square}\mathrm{P}_1 = \left\{ {}^{\square}\rho_1\left(u_i, {}^{\square}x_e\right) \middle| u_i \in U,\ {}^{\square}x_e \in {}^{\square}X, e \in \{1,2\} \right\}, \\
{}^{\triangleright}\mathrm{P}_1 = \left\{ {}^{\triangleright}\rho_1\left(u_i, {}^{\triangleright}x_e\right) \middle| u_i \in U,\ {}^{\triangleright}x_e \in {}^{\triangleright}X, e \in \overline{1;5} \right\},
\end{gathered}
$$

$$^{T}\mathrm{P}_1 = \left\{ {}^{T}\rho_1\left(u_i, {}^{T}x_e\right) \middle| u_i \in U,\ {}^{T}x_e \in {}^{T}X,\ e \in \overline{1;4} \right\},$$

множества предикатов инцидентора контура формы фигуры – $^{K}\mathrm{P}_1 = \left\{ {}^{K}\rho_{1g}\left(u_i, {}^{K}x_c\right) \middle| u_i \in U,\ {}^{K}x_c \in {}^{K}X,\ c \in \overline{1;NK},\ g \in \overline{1;N_U} \right\}$ и множества предикатов инцидентора внутренней области формы фигуры – $^{B}\mathrm{P}_1 = \left\{ {}^{B}\rho_{1t}\left(u_i, {}^{B}x_b\right) \middle| u_i \in U,\ {}^{B}x_b \in {}^{B}X,\ b \in \overline{1;NB},\ t \in \overline{1;N_U} \right\}$.

Каждой вершине $x_i \in X$ изографа H отнесем множество $U(x) \subseteq U_H(x) \subseteq \left\{ u \in U \middle| \mathrm{P}_1(x,u) \right\}$ всех инцидентных ей ребер, а каждому ребру $u \in U$ – множество $X(u) \subseteq X_H(u) \subseteq \left\{ x \in X \middle| \mathrm{P}_1(x,u) \right\}$ всех инцидентных ему вершин. Инцидентор задают булевы матрицы $A_1^1(H) \subseteq \left\| a_{1ij}^1 \right\|$, $A_1^2(H) \subseteq \left\| a_{1ij}^2 \right\|$, $A_1^3(H) \subseteq \left\| a_{1ij}^3 \right\|$. Значения элементов a_{1ij}^1 матрицы инцидентора формы фигуры $A_1^1(H) \subseteq a_{1ij}^1$ вычисляются в зависимости от выполнения следующего условия:

$$^{\Phi}\rho_1\left(u_i, {}^{\Phi}x_j\right) = \left({}^{\cdot}\rho_1\left(u_i, {}^{\cdot}x_j\right) = И \right) \wedge \left({}^{-}\rho_1\left(u_i, {}^{-}x_j\right) = И \right) \wedge$$

$$\wedge \left({}^{\square}\rho_1\left(u_i, {}^{\square}x_j\right) = И \right) \wedge {}^{\square}\rho_1\left(u_i, {}^{\square}x_j\right) = И) \wedge \left({}^{\square}\rho_1\left(u_i, {}^{\square}x_j\right) = И \right) \wedge$$

$$\wedge \left({}^{\triangleright}\rho_1\left(u_i, {}^{\triangleright}x_j\right) = И \right) \wedge \left({}^{T}\rho_1\left(u_i, {}^{T}x_j\right) = И \right),$$

$$a_{1ij}^1 = \begin{cases} 1, {}^{\Phi}\rho_1\left(u_i, {}^{\Phi}x_j\right) = И, \\ 0, {}^{\Phi}\rho_1\left(u_i, {}^{\Phi}x_j\right) = Л. \end{cases}.$$

Значения элементов a_{1ij}^2, a_{1ij}^3 булевых матриц инцидентора $A_1^2(H) \subseteq \left\| a_{1ij}^2 \right\|$, $A_1^2(H) \subseteq \left\| a_{1ij}^3 \right\|$ контура фигуры и её внутренней области, соответственно вычисляются в зависимости от выполнения следующих условий:

$$a_{1ij}^2 = \begin{cases} 1, {}^{K}\rho_1\left(u_i, {}^{K}x_j\right) = И, \\ 0, {}^{K}\rho_1\left(u_i, {}^{K}x_j\right) = Л, \end{cases} a_{1ij}^3 = \begin{cases} 1, {}^{B}\rho_1\left(u_i, {}^{B}x_j\right) = И, \\ 0, {}^{B}\rho_1\left(u_i, {}^{B}x_q\right) = Л. \end{cases}$$

Визуализатор P_2 – семейство трех множеств предикатов $\mathrm{P}_2 = \left\{ {}^{\Phi}\mathrm{P}_2, {}^{K}\mathrm{P}_2, {}^{B}\mathrm{P}_2 \right\}$, где

$$^{\Phi}\mathrm{P}_2 = \{ {}^{\Phi}\rho_{2t}\left(u_i, v_j, w_{jm}\right) | u_i \in U,\ v_j \in V,\ w_{jm} \in W_j,$$
$$i \in \overline{1; N_U},\ j \in \overline{1;6},\ m \in \overline{1, N_{Wj}}, t \in \overline{1;7})\}$$

– множество из семи предикатов визуализатора формы фигуры, $^{K}\mathrm{P}_2 = \left\{ {}^{K}\rho_{2t}\left(u_i, v_j, w_{jm}\right)\right\}$ – контура формы фигуры, $^{B}\mathrm{P}_2 = \left\{ {}^{B}\rho_{2t}\left(u_i, v_j, w_{jm}\right)\right\}$ – внутренней области формы фигуры. Предикат $\rho_{2t}\left(u_i, v_j, w_{jm}\right)$, композиция двух предикатов $\rho_{2t}\left(u_i, v_j, w_{jm}\right) = \rho_{2t}\left(u_i, v_j\right) \circ \rho_{2t}\left(v_j, w_{jm}\right)$, задается прямоугольной булевой матрицей порядка $N_U \times 6$ и шестью булевыми матрицами-строками по числу визуальных переменных. В общей сложности визуализатор задается тремя матрицами $A_2(H) \square \left\| a_{2ij} \right\|$ и девятью матрицами-строками $A_{2w}(H) \square \left\| a_{2tij} \right\|$. Элементы матриц принимают значения в зависимости от следующих условий

$$a_{2ij} = \begin{cases} 1, & \rho_{2t}\left(u_i, v_j\right) = И, \\ 0, & \rho_{2t}\left(u_i, v_j\right) = Л, \end{cases} \quad a_{2tij} = \begin{cases} 1, & \rho_{2t}\left(v_j, w_{jm}\right) = И, \\ 0, & \rho_{2t}\left(v_j, w_{jm}\right) = Л. \end{cases}$$

Истинность предикатов $\rho_{2t}\left(u_i, v_j\right),\ \rho_{2t}\left(v_j, w_{jm}\right)$ интерпретируется следующим образом: «визуальная переменная v_j используется в образном представлении ребра u_i» и «визуальная переменная v_j приняла значение w_{jm}», соответственно.

Исполнитель P_3 – семейство трех множеств предикатов $\mathrm{P}_3 = \left\{ {}^{\Phi}\mathrm{P}_3, {}^{K}\mathrm{P}_3, {}^{B}\mathrm{P}_3 \right\}$, где

$$^{\Phi}\mathrm{P}_3 = \left\{ {}^{\Phi}\mathrm{P}_3^{П}, {}^{\Phi}\mathrm{P}_3^{Э} \right\},\ {}^{K}\mathrm{P}_3 = \left\{ {}^{K}\mathrm{P}_3^{П}, {}^{K}\mathrm{P}_3^{Э} \right\},\ {}^{B}\mathrm{P}_3 = \left\{ {}^{B}\mathrm{P}_3^{П}, {}^{B}\mathrm{P}_3^{Э} \right\},$$
$$\mathrm{P}_3^{П} = \left\{ \rho_3^{П}\left(u_i, m_j, a_{Пk}, d_{Пl}\right) | u_i \in U,\ m_j \in M,\ a_{Пk} \in A_{П} \right\},$$
$$d_{Пl} = \left({}^{V_1}d_{Пl}, ..., {}^{V_6}d_{Пl} \right) \in {}^{V_1}D_{П} \otimes {}^{V_2}D_{П} \otimes, ..., \otimes {}^{V_6}D_{П},$$
$$^{V}d_{Пl} = \left(x_{П_l}, y_{П_l} \right) \in X_{П} \otimes Y_{П},\ i \in \overline{1; N_U},\ j \in \overline{1; N_M},\ Пk \in \overline{1; NП} \},$$

$$\mathrm{P}_3^{Э} = \{\rho_3^{Э}\left(u_i, m_j, a_{Эk}, d_{Эl}\right) \big| u_i \in U,\ m_j \in M,\ a_{Эk} \in A_{Э},$$

$$d_{Эl} = \left({}^{V_1}d_{Эl}, {}^{V_2}d_{Эl}, ..., {}^{V_6}d_{Эl}\right) \in {}^{V_1}D_{Э} \otimes {}^{V_2}D_{Э} \otimes, ..., \otimes {}^{V_6}D_{Э},$$

$${}^{V}d_{Эl} = \left(x_{Э_l}, y_{Э_l}\right) \in X_{Э} \otimes Y_{Э},\ i \in \overline{1; N_U},\ j \in \overline{1; N_M},\ Эk \in \overline{1; NЭ}\},$$

где ${}^{V}d_{Пl}$, ${}^{V}d_{Эl}$ – геокоординаты и экранные координаты пикселя соответственно. Четырехместные предикаты

$$\rho_3^{П}\left(u_i, m_j, a_{Пk}, d_{Пl}\right) = \rho_3^{1П}\left(u_i, m_j\right) \circ \rho_3^{2П}\left(m_j, a_{Пk}\right) \circ \rho_3^{3П}\left(a_{Пk}, d_{Пl}\right),$$

$$\rho_3^{Э}\left(u_i, m_j, a_{Эk}, d_{Эl}\right) = \rho_3^{1Э}\left(u_i, m_j\right) \circ \rho_3^{2Э}\left(m_j, a_{Эk}\right) \circ \rho_3^{3Э}\left(a_{Эk}, d_{Эl}\right)$$

– композиции трех двухместных предикатов, и первый задаются соответствующими матрицами. Интерпретация истинности предикатов: $\rho_3^{1П}\left(u_i, m_j\right)$ – «ребру-фигуре соотнесена математическая модель картографической проекции»; $\rho_3^{2П}\left(m_j, a_{Эk}\right)$ – «есть алгоритмы обработки картографических данных, реализованные программно для соотнесения геокординат и экранных координат ребра-фигуры»; $\rho_3^{2Э}\left(a_k, d_{Эl}\right)$ – «для алгоритмов обработки картографических данных заданы исходные данные, которые будучи введены в компьютер и использованы алгоритмам программами для соотнесения геокординат и экранных координат ребра-фигуры».

Элементы матриц предиката $\rho_3^{Э}\left(.,.,.,.\right)$ принимают значения в зависимости от выполнения следующих условий

$$a_{3ij}^{2Э} = \begin{cases} 1,\ \rho_3^{2Э}\left(m_j, a_{Эk}\right) = И, \\ 0,\ \rho_3^{2Э}\left(m_j, a_{Эk}\right) = Л, \end{cases} \quad a_{3ij}^{3Э} = \begin{cases} 1,\ \rho_3^{2Э}\left(a_k, d_{Эl}\right) = И, \\ 0,\ \rho_3^{2Э}\left(a_k, d_{Эl}\right) = Л. \end{cases}$$

Интерпретация истинности предикатов: $\rho_3^{1Э}\left(u_i, m_j\right)$ – «ребру-фигуре соотнесена одна или несколько математических моделей»; $\rho_3^{2Э}\left(m_j, a_{Эk}\right)$ – «есть алгоритмы один или несколько, реализованные программно, для воспроизведения на экране монитора ребра-фигуры»; $\rho_3^{3Э}\left(a_k, d_{Эl}\right)$ – «для алгоритмов заданы исходные данные, которые будучи введены в компьютер и использованы программами в вычислениях воспроизведут на экране монитора ребро-фигуру».

7. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ОТНОШЕНИЙ НА ИЗОГРАФАХ

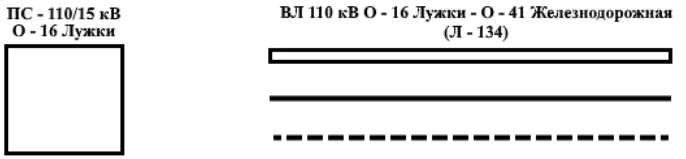
В [32] для схематизации отношений определения на ресурсах, свойствах и действиях (рис.1) введены операции примыкания и свертки-развертки на изографах.

а) б) в)

Рис.1. Изографы многоролевых визуальных отношений определения

На рис.1 представлены изограф: ресурса «ресурс *быть* ресурс $\wedge$ ресурс *иметь* (*свойство*) *имя* именное свойство $\wedge$ ресурс *иметь (свойство) параметр* параметр $\wedge$ ресурс *иметь* (*свойство*) *характеристику* характеристика $\wedge$ ресурс *быть предназначенным для* действие $\wedge$ ресурс *иметь* (*режим*) *состояние* состояние $\wedge$ ресурс *иметь в составе* ресурс» – а); свойства «свойство *быть свойством* ресурс $\wedge$ свойство *быть свойством* действие $\wedge$ свойство *иметь меру* мера $\wedge$ свойство *иметь значение* значение $\wedge$ значение *иметь меру* мера» – б); действия – в), где ОЦ – оценка, МЕ – мера, ЗН – значение

Следуя концепции Д.А. Ошанина [21] в настоящей работе представления пространственно-временных отношений могут относиться к избыточному КО и лаконичному ОО объекта управления. Оппозиция «избыточный – лаконичный» для изографов решена двояко: 1) применены упрощенные условные обозначения (рис.2а), по указанию пользователя на выносках разворачиваемые до (рис.1а); 2) использована функциональная деформация семантики энтропийного, КО в регуляритивную, прагматическую информацию лаконичного и локализованного в пространстве ОО.



а) б)

Рис.2. Условные графические обозначения на изографах

На рис.2 представлены обозначения ресурса «электроподстанция» – а); ресурса «воздушная линия электропередачи»: эквивалентные обозначения прямоугольной формой (вверху); прямой (или ломаной) сплошной линией, состояние «Вкл.» (в середине); пунктирной линией, состояние «Откл.» (внизу) – б).

Для спецификации изографами ролевых пространственных отношений «ресурс-ресурс» введем операции взаиморасположения (англ. Interposition – I) и соединения (англ. Connection – $\mathfrak{C}$).

Пусть имеем однореберные изографы (рис.2а)

$$H' = (\mathfrak{X}'; \mathrm{P}'_1, \mathrm{P}'_2, \mathrm{P}'_3) \Big| X' \supset {}^{\Phi}X' = \left\{ {}^{\square}X \right\},$$

$$H'' = (\mathfrak{X}''; \mathrm{P}''_1, \mathrm{P}''_2, \mathrm{P}''_3) \Big| X'' \supset {}^{\Phi}X'' = \left\{ {}^{\square}X \right\},$$

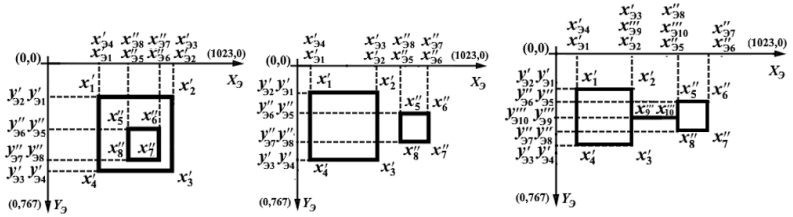
упрощенно изображенные в экранных координатах на рис.3 фигурой «квадрат» и, например, обозначающие ресурс-1 «электроподстанция-1», ресурс-2 «электроподстанция-2» и однореберный изограф

$H''' = (\mathfrak{X}'''; \mathrm{P}'''_1, \mathrm{P}'''_2, \mathrm{P}'''_3) \Big| X''' \supset {}^{\Phi}X''' = \left\{ {}^{-}X \right\}$ схематизирующий ресурс-3 «воздушная линия электропередачи» отрезком прямой линии (рис. 3 в).

На рис. 3 а,б приведены изографы ролевого визуального отношения «ресурс-2 *находиться в* ресурс-1» и «ресурс-2 *находиться справа от* ресурс-1», как результаты операции взаиморасположения (I_1 – «внутри, в, на» и I_2 – «справа») двух форм-квадратов «одна в другой» и «одна справа от другой», алгебраически означающей, что построены изографы $H_1 = H' \; \mathrm{I}_1 \; H''$, $H_2 = H' \, \mathrm{I}_2 \; H''$, и в их множества V_1^{11} добавлены элементы ${}^{\square}w_{11}^{11}$, ${}^{\square}w_{12}^{11}$, т.е. ${}^{\square}w_{11}^{11}, {}^{\square}w_{12}^{11} \in V_1^{11}$.

На рис. 3 в, приведен изограф ролевого визуального отношения «ресурс-1 *соединяется с* ресурс-3 $\wedge$ ресурс-3 *соединяется с* ресурс-2», как результат операции соединения $\mathfrak{C}$ двух форм-квадратов и одной

формы-линии, алгебраически означающей, что построено объединение изографов $H_3 = H' \mathbb{C} H''$ и $H_4 = H'' \mathbb{C}$, и в множество V_1^{11} добавлены элементы $\square w_{13}^{11}, \square w_{14}^{11}$, т.е. $\square w_{13}^{11}, \square w_{14}^{11} \in V_1^{11}$.



а) б) в)

Рис.3. Изображение изографами на метрической плоскости в экранных координатах пространственных ролевых визуальных отношений

Сформулируем правила вычисления ролевых пространственных отношений для изографов $H_1 - H_4$:

$$\forall H', H''(x_i', x_j'' \in \square X' \Big| i \in \overline{1;4},\ j \in \overline{5;8},\left(x'_{Э2} = x'_{Э3}\right) \wedge \left(x'_{Э1} = x'_{Э4}\right) \wedge$$

$$\wedge \left(x''_{Э6} = x''_{Э7}\right) \wedge \left(x''_{Э5} = x''_{Э8}\right) \wedge (x'_{Э2} > x''_{Э6} > x''_{Э5} > x'_{Э1}) \wedge$$

$$\wedge (x'_{Э3} > x''_{Э7} > x''_{Э8} > x'_{Э4}) \wedge \left(y'_{Э2} = y'_{Э1}\right) \wedge \left(y''_{Э5} = y''_{Э6}\right) \wedge \left(y''_{Э7} = y''_{Э8}\right) \wedge$$

$$\wedge \left(y'_{Э3} = y'_{Э4}\right) \wedge (y'_{Э4} > y''_{Э8} > y''_{Э5} > y'_{Э1}) \wedge (y'_{Э3} > y''_{Э7} > y''_{Э6} > y'_{Э2}),$$

$$\square w_{11}^{11} \in V_1^{11} \Big| V_1^{11} \in H,$$

$$\forall H', H''(x_i', x_j'' \in \square X' \Big| i \in \overline{1;4},\ j \in \overline{5;8},\left(x'_{Э2} = x'_{Э3}\right) \wedge \left(x'_{Э1} = x'_{Э4}\right) \wedge$$

$$\wedge \left(x''_{Э6} = x''_{Э7}\right) \wedge \left(x''_{Э5} = x''_{Э8}\right) \wedge \left(y'_{Э1} = y'_{Э2}\right) \wedge \left(y'_{Э4} = y'_{Э3}\right) \wedge$$

$$\wedge \left(y''_{Э5} = y''_{Э6}\right) \wedge \left(y''_{Э8} = y''_{Э7}\right) \wedge (x''_{Э6} > x''_{Э5} > x'_{Э2} > x'_{Э1}) \wedge$$

$$\wedge (x''_{Э7} > x''_{Э8} > x'_{Э3} > x'_{Э4}) \wedge (y'_{Э4} > y''_{Э8} > y''_{Э5} > y'_{Э1}) \wedge$$

$$\wedge (y'_{Э3} > y''_{Э7} > y''_{Э6} > y'_{Э2}),\ \square w_{12}^{11} \in V_1^{11} \Big| V_1^{11} \in H,$$

$$\forall H', H'''(x_i^{'} \in {}^{\square} X^{'} \left| i \in \overline{1;4}, x_j''' \right. \in {}^{-} X'' \left| j \in \overline{9;10}, {}^{K} X'_{x_2,x_3} \subset {}^{K} X^{'}, \right.$$

$$x'''_{Э9} \in {}^{K} X'_{x_2,x_3}, (x'''_{Э10} > x'''_{Э9}) \wedge \left(y'''_{Э9} = y'''_{Э10}\right) \wedge \left(x'_{Э2} = x'''_{Э9} = x'_{Э3}\right) \wedge$$

$$\wedge \left(x'_{Э1} = x'_{Э4}\right) \wedge (x'_{Э2} > x'_{Э1}) \wedge (x'_{Э3} > x'_{Э4}) \wedge (y'_{Э4} > y'_{Э1}) \wedge$$

$$\wedge (y'_{Э4} > y'''_{Э9} > y'_{Э1}) \wedge \left(y'_{Э3} = y'_{Э4}\right) \wedge \left(y'_{Э1} = y'_{Э2}\right), {}^{\square} w_{13}^{11} \in V_1^{11} \left| V_1^{11} \in H, \right.$$

$$\forall H''', H''(x_i''' \in {}^{-} X''' \left| i \in \overline{9;10}, x_j'' \right. \in {}^{\square} X'' \left| j \in \overline{5;8}, {}^{K} X''_{x_5,x_8} \subset {}^{K} X'' \wedge \right.$$

$$x'''_{Э10} \in {}^{K} X''_{x_5,x_8}, \left(y'''_{Э9} = y'''_{Э10}\right) \wedge \left(x''_{Э5} = x'''_{Э10} = x''_{Э8}\right) \wedge \left(x''_{Э6} = x''_{Э7}\right) \wedge$$

$$\wedge \left(y''_{Э8} = y''_{Э7}\right) \wedge \left(y''_{Э5} = y''_{Э6}\right) \wedge (x'''_{Э10} > x'''_{Э9}) \wedge (x''_{Э6} > x''_{Э5}) \wedge (x''_{Э7} > x''_{Э8}) \wedge$$

$$\wedge (y''_{Э8} > y''_{Э5}) \wedge (y''_{Э8} > y''_{Э10} > y''_{Э5}) {}^{\square} w_{14}^{11} \in V_1^{11} \left| V_1^{11} \in H. \right.$$

В последующих работах будет схематизирована изографами семантика временных и причинно-следственных ролевых отношений «действие-действие».

8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Визуализация и гибридизация – тенденции развития науки, техники и технологий в XXI в. Несмотря на то, что человек, с развитием абстрактной словесности, казалось, раз и навсегда отказался от иконического письма, сегодняшние руководства по инсталляции, сборке и эксплуатации вездесущей бытовой электротехники – прекрасный пример предметно-изобразительного творчества и возврата к реальной действительности. Визуальная семиотика У. Эко – ответ сторонникам лингвистического подхода в семиологии, не признававших знаковый характер визуальных сообщений, а графическая семиология и «визуальная переменная» картографа Ж. Бертена, понятие «всеобъемлющий световой поток» и экологическая теории оптики Дж. Дж. Гибсона, заложили прочный фундамент пространственного моделирования и геоинформатики. Продуктивное М. Вертгеймера, визуальное Р. Арнхейма и латеральное Э. де Боно мышления, визуальное управление Т. Оно, визуальная фасилитация Д. Сиббета и Д. Роэма, скрайбинг, когнитивная семиотика Т. Даддезио и Ю.Р. Валькмана, – ассоциации вездесущей визуализации.

Искусственная гибридизация, открытая монахом-августинцем Г.И. Менделем в опытах над растительными гибридами, дала человеку возможность создавать сущности с полезными свойствами. Гибридизация как «многомодельная семиотическая система» Я.А. Гельдфандбейна, А.В. Колесникова и И.Д. Рудинского в рамках

проекта «Ситуация» Научного Совета по комплексной проблеме «Кибернетика» при Президиуме АН СССР, положила целью междисциплинарный, социальный по М. Минскому, системный по В.Б. Тарасову, и гибридный по В.Ф. Венде искусственный интеллект.

Когнитивные гибридные интеллектуальные системы интегрируют в автоматическом партнере обе тенденции – визуализацию и гибридизацию в интересах дополнения и усиления мыслительных возможностей человека в оперативной работе.

Предметно-изобразительный характер рассуждений оператора подтверждается нейрофизиологией, инженерной психологией, когнитивной лингвистикой, когнитивной семиотикой и онтологически увязан с триадами «Пространство-Время-Знание», «Вещь-Свойство-Отношение» и «Ресурс-Свойство-Действие». В этой связи кажется противоестественной оперативная работа в условиях дистанционного характера и вне пространственно-временного «видения» объекта управления.

Изографами схематизированы отношений определения на ресурсах, свойствах и действиях для чего введены операции примыкания и свертки-развертки, а также статические и динамические отношений «ресурс-ресурс», для чего введены операции взаиморасположения и соединения.

Изографы, как расширение теории графов, делают невидимое видимым, специфицируя отношение инцидентности точек (вершин) и линий (ребер) в топологическом, геофизическом и метрическом пространствах, используя теоретико-множественные и предикативные представления. Будучи предметно-изобразительным кодом, изограф – сжатая, редуцированная, контурно представленная образная схема, смысловое содержание которой сопровождается наглядным образом. Главное достоинство изографов – возможность вычислений в интерактивной, человеко-машинной системе.

Литература

1. Поспелов Г.С., Ириков В.А. Программно-целевое планирование и управление. (Введение). – М.: Изд-во «Советское радио», 1976.
2. Интеллектуальные системы автоматического управления / Под ред. И.М. Макарова, В.М. Лохина. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2001.
3. Ерофеев А.А., Поляков А.О. Интеллектуальные системы управления. – СПб: Изд. СПбГТУ, 1999.
4. Трофимов В.Б., Кулаков С.М. Интеллектуальные автоматизированные системы управления технологическими объектами / 2-е издание. – М.: Изд-во «Инфа-Инженерия», 2020.

5. Васильев С.Н. и др. Интеллектное управление динамическими системами/Монография. – М.: Физико-математическая литература, 2000.
6. Розенберг И.Н. Интеллектуальное управление // Современные технологии управления. ISSN 2226-9339. – №4 (76). 2017. [Электронный ресурс]. URL: https://sovman.ru/article/7608.
7. Цветков В.Я. Когнитивное управление. Монография. – М.: МАКС Пресс,2017.
8. Розенберг И.Н. Когнитивное управление транспортом // Государственный советник. №2.2015. – С. 47-52.
9. Болбаков Р.Г. Основы когнитивного управления // Государственный советник. №1.2015. – С. 45-49.
10. Соловьев И.В., и др. Принципы когнитивного управления сложной организационно-технической системой // Гос. Совет-к. №1. 2016. – С. 27-32.
11. Бутковский А.Г. О единой геометрической теории управления // Общие вопросы теории управления. № 1. 2003. С. 8-12.
12. Хачумов М.В. Интеллектуально-геометрическое управление траекторным движением группы БПЛА в сложных условиях // Материалы Всероссийской конференции с международным участием «Информационно-телекоммуникационные технологии и математическое моделирование высокотехнологичных систем», Москва, РУДН, 13 – 17 апреля 2020 г. – М.: Изд-во РУДН, 2020. – С. 207-211.
13. Д.А. Поспелов. Ситуационное управление: теория и практика. – М.: Изд-во «Наука». Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986.
14. Поспелов Д.А. Логико-лингвистические модели в системах управления. – М.: Изд-во «Энергоиздат», 1981.
15. Кандрашина Е.Ю., Литвинцева Л.В., Поспелов Д.А. Представление знаний о времени и пространстве в интеллектуальных системах / Под ред. Д.А. Поспелова. – М.: «Наука». Гл.. ред. Физ.-мат. Лит., 1989.
16. Тарасов В.Б. Системно-организационный подход в искусственном интеллекте// Изв. РАН. Теория и системы управления, 1997. №3. С. 6-13.
17. Венда В.Ф. Системы гибридного интеллекта: Эволюция, психология, информатика. – М.: Изд-во «Машиностроение», 1990.
18. Schank R.C., Hunter L. The quest to understand thinking // Byte. 1985, apr. P.155.
19. E. Mumford, at all. Designing Human Systems. An agile approach to ETHICS. – Lulu Press, 2006.
20. Дружилов С.А. Формирование модели мира человека в новой информационной реальности // Психология, социология и педагогика. 2011. №1 [Электронный ресурс]. URL: http://psychology.snauka.ru/2011/10/15.
21. Ошанин Д.А. Предметное действие и оперативный образ: Избранные психологические труды. М.: Московский психолого-социальный институт; Воронеж: Изд-во НПО «МОДЭК», 1999.
22. Пушкин В.Н. Оперативное мышление в больших системах. – М.: Энергия, 1965.

23. Завалишина Д.Н. Практическое мышлении: Специфика и проблемы развития. – М.: Изд-во «Институт психологии РАН», 2005.
24. Рыбина Г.В. Интегрированные экспертные системы: современное состояние, проблемы и тенденции // Известия РАН. Теория и системы управления. 2002. №5. – С. 111-126.
25. Колесников А.В. Гибридные интеллектуальные системы. Теория и технология разработки / Под ред. А.М. Яшина. – СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2001.
26. Поспелов Д.А., Пушкин В.Н. Мышление и автоматы. – М.: Изд-во «Советское радио», 1972.
27. Дружинин Г. В. Человек в моделях технологий: Учебное пособие в трех частях. Часть 1: Свойства человека в технологических системах. – М.: МИИТ, 1996.
28. Магид С.И. Подготовка персонала энергопредприятий: о целесообразности использования «Компьютерных тренажеров» // Газета «Энергетика и промышленность России». № 11 (27), 2002.
29. Данишевский В.И., Колесников А.В. Когнитивная гибридная интеллектуальная система мониторинга и контроля генерации и потребления электроэнергии в островном режиме микрогрид // Труды VIII меж. конференции «Системный анализ и информационные технологии» САИТ–2019 (8–14 июля 2019 г., г. Иркутск).– Иркутск, 2019. – С. 235-243.
30. Колесников А.В., и др. Метаязык для гибридных интеллектуальных систем визуального управления электротехническими сетями: ресурсы, свойства и действия // Системы и средства информатики. Т.28. № 3. 2018. – С. 153-164.
31. Kolesnikov A.V., at all. Conceptual-visual metalanguage of hybrid intelligent systems // CEUR Workshop Proceedings: 2nd International Scientific and Practical Conference "Fuzzy Technologies in the Industry – FTI" (Ulyanovsk; Russian Federation; 23 October 2018 to 25 October 2018. T.2258. P. 305-31.
32. Колесников А.В., Румовская С.Б., Ясинский Э.В. Предметно-изобразительное представление знаний в технической семиотике и искусственном интеллекте: изографы // Гибридные и синергетические системы : материалы V Всероссийской Поспеловской конференции с международным участием / под. ред. д-ра техн. наук, проф. А.В. Колесникова [Электронный ресурс] : научное электронное издание. – Калининград : Изд-во БФУ им. И. Канта, 2020 .– С. 155-218.
33. Бир С. Наука управления // Пер. с англ. – М.: «Энергия», 1971.
34. Бир С. Мозг фирмы // Пер. с англ. М.М. Лопухина. – М.: Радио и связь, 1993.
35. Философский энциклопедический словарь. Интеграция. [Электронный ресурс] URL: https://rus-philosophy-enc.slovaronline.com/993-интеграция.
36. Козлов В. В., Донченко И. А. Направленные визуализации: теория и метод. – Запорожье, 2015.

37. Колесников А.В. и др. Методология и технология решения сложных задач методами функциональных гибридных интеллектуальных систем. – М.: ИПИ РАН, 2007.
38. Колесников А.В. Функциональные гибридные интеллектуальные системы визуального управления // Гибридные и синергетические интеллектуальные системы: материалы IV Всероссийской Поспеловской конференции с меж. – Калининград: Изд-во БФУ им. И. Канта, 2018. – С. 18-81.
39. Григорьева Т.П. Синергетика и Восток // Вопросы философии. 1997. №3. – С. 90-102.
40. Эдвардс Б. Ты – художник! – Минск: «Попурри», 2010.
41. Станкевич Л.А. Искусственный интеллект и искусственный разум в робототехнике. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012.
42. Bertin J. Semiology of Graphics: diagrams networks maps // translated by W.J. Berg. – New York: Esri Press, 2011. P. 440.
43. Берлянт А.М. Теория геоизображений. – М.: ГЕОС, 2006.
44. Грановская Р.М. Психологическая защита. – СПб.: Речь, 2010.
45. Колесников. А.В. Модель мира в естественных и искусственных интеллектуальных гетерогенных системах // Гибридные и синергетические системы: материалы V Всероссийской Поспеловской конференции с международным участием / научное электронное издание. – Калининград : Изд-во БФУ им. И. Канта, 2020. – С. 28 –74.
46. Козлов В.В., Рушас В.И. Некоторые теоретические подходы к формированию «модели мира». [Электронный ресурс]. URL: www.zi- kozlov.ru.
47. Бричковский В.И., Мицкевич В.В. Модель мира: статика и динамика. Использование статической части модели при создании систем искусственного интеллекта. [Электронный ресурс]. URL: protomodel.ucoz.ru/publ/1-1-0-10.
48. Осипов Г.С., Чудова Н.В. и др. Знаковая картина мира субъекта поведения. – М.: Физматлит, 2018.
49. Дуреева Н.С. Понятие модели мира в науке // Вестник Том. гос. ун-та: Языкознание и литературоведение. –Томск : Изд-во ТГУ, 2011. С. 55-58.
50. Григорьева Т.П. Китай, Россия и Всечеловек. – М.: Новый Акрополь, 2011.
51. Концепция интеллектуальной электроэнергетической системы с активно-адаптивной сетью. М.: Изд-во ОАО «Федеральная сетевая компания Единой Электроэнергетической системы», 2012.
52. Тартанг Тулку. Время, пространство и знание. – М.: Изд-во «Единство», 1994.
53. Спиркин А.Г. Философия: Учебник. – 2-е изд. – М.: Гардарики, 2006.
54. Уемов А.И. Вещи, свойства и отношения. – М.: Изд-во АН СССР, 1963.
55. Цветков В.Я. Пространственное знание и пространственная логика // Информац. техн. в науке, образов. и управлении. №3. 2019. – С. 17-26.
56. Пенфилд У. Мозг. Тайны разума. – М.: Изд-во АСТ, 2017.

57. Казанович Я.Б., Мысин И.Е. Как животные ориентируются в пространстве? Клетки места и клетки решетки // Математическая биология и биоинформатика. 2015. Т. 10. № 1. – С. 88-115.
58. Umbach G., Kantak P., at all. Time cells in the human hippocampus and entorhinal cortex support episodic memory // Proceedings of the National Academy of Science. November 10, 2020. Vol 117. № 25. 28463-28474 pp.
59. Nilsen R.E. How the Brain Experiences Time // Neuroscience. August 29, 2018. [Электр. ресурс]. URL: https://neurosciencenews.com/time-perception-9771.
60. Б. Грин. Ткань космоса. Пространство, время и текстура реальности. – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2009.
61. Ойзерман Т.И. Кантовская концепция пространства и времени // Кантовский сборник. Вып. №1 (29), 2009. С. 7-18.
62. Гейзенберг В. Шаги за горизонт: Пер. с нем. / Сост. А.В. Ахутин; Общ. Ред. и вступ. Ст. Н.Ф. Овчинникова. М.: Прогресс, 1987.
63. Шредингер Э. Что такое жизнь с точки зрения физики? / Пер. с англ. А.А. Малиновского. – М.: Изд-во «РИМИС», 2009.
64. Садохин А.П. Концепции современного естествознания / 2-е изд. Перераб и доп. – М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2006.
65. Акчурин И.А. Методологитческий анализ концепций пространства и времени Рейхенбаха // Послесловие кн. Рейхенбах Г. Философия пространства и времени. – М.: Прогресс, 1986.
66. Квантовая электродинамика / А. А. Соколов, и др. –М.: Изд-во МГУ, 1983.
67. Олейник В.П. Новейшее развитие квантовой электродинамики: электрон как открытая самоорганизующаяся система, сверхсветовые сигналы, динамические свойства времени // Физика сознания и жизни, космология и астрофизика, 1, 2001, С. 68-76.
68. Розанов Ю.К., Лепанов М.Г. Силовая электроника. – М.: 2019.
69. Олейник В.П. Квантовая электродинамика, описывающая внутреннюю структуру электрона // Квантовая электроника. – 1993. Вып. 44. – С. 51-59.
70. Зыков А.А. Гиперграфы / УМН. Т. 29. Вып. 6 (180). 1974. – С. 89-154.
71. Штейнбок Л.С. Ситуационная технология отображения информации. – М.: Изд-во «Научные технологии, 2017.
72. «Параметры Земли 1990 г.» ПЗ-90.11. – М.: «27 ЦНИИ» Минобороны России, 2014.
73. Руководство по Всемирной геодезической системе – 1984 (WGS-84). Doc 9674. AN/946 / Издание второе. – Межд. организация гражд. авиации, 2002.

УДК 004.8

ОБЪЯСНИМЫЙ ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ: ИТОГИ И ПЕРСПЕКТИВЫ*

***Аверкин А.Н.**, к.ф.-м.н.*
e-mail: averkin2003@inbox.ru
ФИЦ «Информатика и управление»,
РАН РЭУ им. Г.В. Плеханова

1. ВВЕДЕНИЕ

Колоссальные успехи в области искусственного интеллекта (ИИ), особенно, в машинном обучении (и, в первую очередь, в нейронных сетях глубокого обучения) привели к возникновению новой волны применения его технологий в таких отраслях как транспорт, безопасность, медицина, машиностроение, оборона. При этом разработчики предлагают решения, превосходящие по качеству человеческие, но не могут объяснить свои решения и действия пользователям. Этот недостаток является особенно существенным для военных приложений, которые требуют разработки все более интеллектуальных, автономных и симбиотических систем. Управление перспективных исследовательских проектов Министерства обороны США DARPA открыло программу по созданию систем *объяснимого искусственного интеллекта* (XAI). Эта программа нацелена на построение таких систем искусственного интеллекта (ИИ), чьи решения и модели обучения могут быть понятны и должным образом проверены конечными пользователями. Достижение этой цели требует методов построения более объяснимых моделей, разработки эффективных объяснительных интерфейсов и понимания психологических требований для эффективного объяснения. Объяснимый ИИ нужен для того, чтобы пользователи должным образом понимали, доверяли и эффективно управляли своими «умными» искусственными партнерами.

В русле программы DARPA системы XAI понимаются как системы ИИ, которые могут объяснить свои решения человеку-пользователю, охарактеризовать их сильные и слабые стороны, и то, как они будут вести себя в будущем. Целью DARPA является создание более понятных для человека систем искусственного интеллекта путем

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 20-07-00770

использования эффективных объяснений. Команды разработчиков XAI решают эти проблемы путем создания и развития технологий *объяснимого машинного обучения* (ML), разрабатывая принципы, стратегии и методы взаимодействия человека и компьютера для получения эффективных объяснений. Другая команда XAI занимается объединением, расширением и применением *психологических теорий объяснения*, чтобы помочь оценке систем с помощью разработки систем оценки XAI, которую команды разработчиков будут использовать для тестирования своих систем. Команды разработчиков оценивают, насколько хорошо объяснения XAI-систем улучшают работу пользователей, их доверие и производительность работы.

В России также начинает уделяться внимание объяснимому искусственному интеллекту. Так Нижегородский государственный университет в 2020 году стал победителем в конкурсе крупных научных проектов Минобрнауки РФ с проектом «Надёжный и логически прозрачный искусственный интеллект: технология, верификация и применение при социально-значимых и инфекционных заболеваниях». Главным результатом проекта должна стать разработка новых методов и технологий, позволяющих преодолеть два основных барьера систем машинного обучения: проблему ошибок и проблему явного объяснения решений. На сегодняшний день эти задачи не имеют удовлетворительного решения и требуют новых разработок. Руководитель проекта, профессор А.И. Горбань так объяснил его основную идею: «Эти проблемы тесно связаны: без возможности логического прочтения ошибки искусственного интеллекта будут оставаться необъяснимыми. Дообучение системы в рамках существующих методов может повредить имеющиеся навыки, а, с другой стороны, потребовать огромных ресурсов, что непрактично для решения серьезных задач.

К примеру, широко известная система когнитивных вычислений IBM «Watson» потерпела неудачу на рынке персонализированной медицины вследствие систематически совершаемых ошибок в диагностике и рекомендации лечения рака, найти и устранить источники которых не удалось».

2. ТЕХНОЛОГИИ И СТАНДАРТЫ, СВЯЗАННЫЕ С XAI

Главным трендом Hype Cycle 2020 (рис.1) является смещение фокуса с робототехники и аппаратного обеспечения на искусственный интеллект, в том числе на объяснимый и интерпретируемый искусственный интеллект.

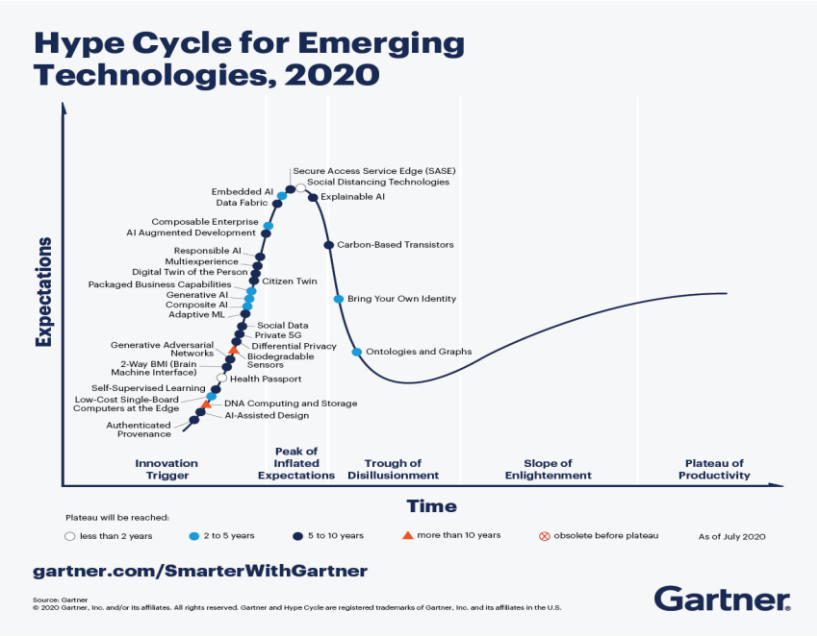


Рис.1. Гиперцикл группы Гартнер для эмерджентных технологий 2020 года

Рассмотрим построенный в Gartner гиперцикл инновационных технологий. На гиперцикле 2020 года можно отметить следующие технологии, относящиеся к объяснимой ИИ:

- *Generative AI*. Генеративный ИИ относится к программам, которые могут использовать существующий контент, такой как текст, аудиофайлы или изображения, для создания нового правдоподобного контента. Для этого существуют различные методы, такие как генеративные состязательные сети (GANS), преобразователи и вариационные автокодеры;
- *Adaptive ML*. Адаптивное машинное обучение – алгоритмы, которые дообучаются по мере поступления новых данных;
- *Augmented Intelligence*. Искусственный интеллект, который помогает человеку, а не заменяет его в процессах принятия решений. Противопоставляется общему термину «Искусственный Интеллект» в качестве собирательного термина для взаимодействия «Интеллект Человека + ИИ»;

- *Transfer Learning*. Подход в машинном обучении, когда накопленный опыт при решении одной задачи используется для ускорения обучения другой аналогичной задачи (Wikipedia);
- *Emotion AI* – ИИ, который распознает человеческие эмоции;
- *Responsible AI*. Ответственный ИИ ориентирован на обеспечение этичного, прозрачного и подотчетного использования технологий ИИ в соответствии с ожиданием пользователей, организационными ценностями, социальными законами и нормами. Ответственный ИИ гарантирует, что автоматизированные решения оправданы и объяснимы, а также помогают поддерживать доверие пользователей и конфиденциальность личности;
- Explainable AI. Методы и техники использования ИИ, которые позволяют объяснить полученные от ИИ результаты живым экспертам. Противопоставляется концепции «нейросетевой ИИ как черный ящик», когда нельзя понять сути используемых алгоритмов и найденных взаимосвязей.

Национальный институт стандартов и технологий (NIST) опубликовал проект перечня принципов объяснимого искусственного интеллекта (XAI) [1]. с упором на взаимодействие человека и компьютера. Документ определяет четыре главных принципа, лежащих в основе объяснимого ИИ [2]:

1. Объяснение. Системы ИИ должны представлять причины и обстоятельства, на основании которых были приняты те или иные решения. Принцип объяснения обязывает систему ИИ предоставлять объяснение в форме «свидетельства или обоснования каждого результата».

2. Значимость. Системы объяснимого ИИ должны представлять объяснения, понятные отдельным пользователям. Принцип значимости устанавливает, что получатель объяснения должен быть в состоянии понять объяснение. Пояснения должны быть адаптированы к аудитории как на групповом, так и на индивидуальном уровне.

3. Точность объяснения. Объяснение должно достоверно отражать суть процессов, производимых системой ИИ для генерирования результатов. Данный принцип предполагает подробное разъяснение того, как система сгенерировала окончательный результат. Применение данного принципа также ставится в зависимость от контекста и конечного пользователя. Так, разные показатели точности объяснения будут представляться для разных типов групп и пользователей.

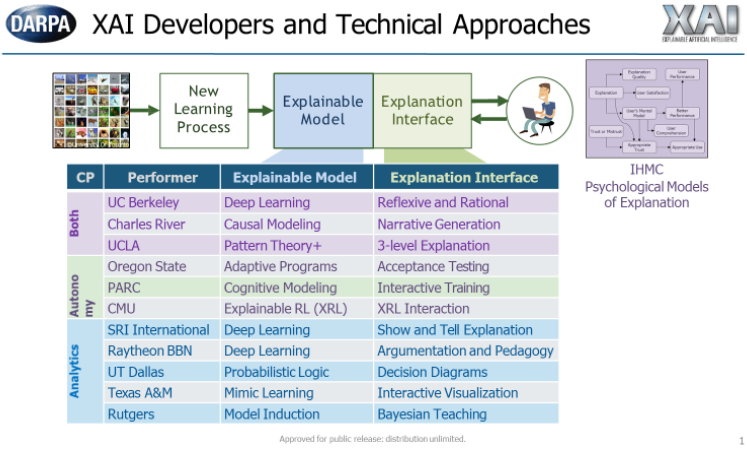
4. Пределы знаний. Система работает только в условиях, для которых она была разработана, или когда система достигает

надлежащей достоверности в своих результатах. Принцип пределов знаний требует, чтобы система отмечала любые случаи, для которых она не была разработана.

Указанные четыре принципа показывают, что решения на основе ИИ должны обладать необходимой прозрачностью и объяснимостью, чтобы вызывать доверие к своему функционированию и уверенность в выводах системы.

3. РАЗВИТИЕ ПРОГРАММЫ XAI DARPA

На рис.2 и в таблице представлены 11 команд разработчиков технических областей XAI (TA1) и команда TA2 (из Флоридского института человеческого и машинного познания (IHMC)), которая разрабатывает психологическую модель объяснения. Три группы TA1 занимаются обеими проблемными областями исследований (автономия и анализ данных), три работают только над первым, а пять работают только над вторым. Все они исследуют различные методы разработки объяснимых моделей и интерфейсов объяснения [3].



CP	Performer	Explainable Model	Explanation Interface
Both	UC Berkeley	Deep Learning	Reflexive and Rational
	Charles River	Causal Modeling	Narrative Generation
	UCLA	Pattern Theory+	3-level Explanation
Autonomy	Oregon State	Adaptive Programs	Acceptance Testing
	PARC	Cognitive Modeling	Interactive Training
	CMU	Explainable RL (XRL)	XRL Interaction
Analytics	SRI International	Deep Learning	Show and Tell Explanation
	Raytheon BBN	Deep Learning	Argumentation and Pedagogy
	UT Dallas	Probabilistic Logic	Decision Diagrams
	Texas A&M	Mimic Learning	Interactive Visualization
	Rutgers	Model Induction	Bayesian Teaching

Рис.2 Разработчики XAI и их технические подходы

Таблица 1. Команды разработчиков программы XAI

Команда	Объясняемая модель	Объясняющий интерфейс	Решаемые задачи
1 Университет Беркли (UCB)	Объяснения постфактум путем обучения дополнительных моделей DL. Явные интроспективные объяснения (NMN) Обучение с подкреплением (информативные развертывания, явный модульный агент)	Рефлексивные объяснения (вытекающие из модели). Рациональные объяснения (основанные на рассуждениях об убеждениях пользователя)	Автономность: управление транспортным средством (BDD-X, CARLA), стратегические игры (StarCraft II). Аналитика: визуальный контроль качества и фильтрация задач (VQA-X, ACT-X, xView, DiDeMo)
2. Charles River Analytics (CRA)	Эксперимент с обученной моделью, чтобы создать объяснимую причинно-вероятностную модель программирования	Интерактивная визуализация, основанная на генерации временных, пространственных повествований из причинно-следственных, вероятностных моделей	Автономность: Atari, StarCraft II. Аналитика: обнаружение пешеходов (INRIA), распознавание активности (ActivityNet)
3. Калифорнийский Университет в Лос-Анджелесе (UCLA)	Интерпретируемые представления: STC-AOG (пространственные, темпоральные, каузальные модели), STC-ЗП (интерпретация и аналитика сцен и событий)	Трехуровневое объяснение понятий, каузальные и контрфактические рассуждения, объяснение полезности	Автономность: выполнение роботом повседневных задач в физически реалистичной платформе виртуальной реальности для автономного вождения (игровой движок GTA5)
4. Университет штата	xDAP, комбинация адаптивных программ,	Обеспечивает чередование визуального и ЕЯ объяснимого	Автономность: одни и те же стратегии в реальном времени, основанные на специально

Орегон (OSU)	глубокое обучение и объяснимость	интерфейса для приемочных испытаний пилотами-испытателями на основе IFT	разработанном игровом движке, поддерживающем объяснения; StarCraft II
5. PARC	Трехуровневая архитектура: обучающийся уровень, когнитивный уровень, уровень объяснений	Интерактивная визуализация состояний, действий, стратегий, величин	Автономность: оболочка MAVSim в симуляционной среде ARduPilot
6. Университет Карнеги Меллон	Новая научная дисциплина для XRL с работой над новыми алгоритмами и представлениями	Интерактивные объяснения динамических систем. Человеко-машинное взаимодействие для повышения производительности	Автономность: OpenAI Gym, автономность в электросетях, мобильные сервисные роботы, самосовершенствующееся образовательное программное обеспечение
7. SRI	Множественная DL техника, механизмы, основанные на внимании, композиционные NMN, GAN	DNN визуализация Ответ на запрос, объясняющий DNN решения. Генерация NL обоснований	Аналитика: VQA (Visual Gnome. Flick30), MovieQA
8.Raytheon BBN	Семантическая разметка DNN Создание контрольного журнала DNN	Градиентно-взвешенное отображение активации классов	Аналитика: VQA для изображений и видео
9. UTD	Управляемые вероятностные логические модели (TPLM)	Позволяет пользователям исследовать и исправлять базовую модель, а также добавлять базовые знания	Аналитика: объяснение действия системы в мультимодальных данных (видео и текст), биологических данных и наборах данных кулинарных сцен с текстовыми аннотациями

10. Техасский университет A&M (TAMU)	Структура имитационного обучения объединяет модели DL для прогнозирования и мелкие модели для объяснений. Интерпретируемые алгоритмы обучения извлекают знания из DNN для соответствующих объяснений	Интерактивная визуализация нескольких новостей с использованием тепловых карт и кластеров тематического моделирования для отображения функций прогнозирования	Аналитика: несколько задач с использованием данных из Twitter, Facebook, ImageNet и новостных сайтов.
11.Rutgers	Выбор оптимальных торговых примеров для объяснения модельных решений на основе байесовского учения	Объяснение полной модели на основе примеров, выбранной пользователем подструктуры, примеров, представленные пользователем	Аналитика: обработка изображений, корпуса текста, VQA, событий фильмов

Ниже приведено более детальное описание видов деятельности этих команд.

1. Глубокий объяснимый ИИ (DEXAI) в UCB Калифорнийского университета в Беркли (UCB) (включая исследователей из Бостонского университета, Амстердамского университета и Kitware). Этот коллектив разрабатывает систему искусственного интеллекта, понятную человеку благодаря явной структурной интерпретации [4] и интроспективному объяснению [5], которая обладает предсказуемым поведением и обеспечивает соответствующее доверие [6]. Ключевые проблемы глубоко объяснимого ИИ (DEXAI) состоят в том, чтобы генерировать точные объяснения поведения модели и выбирать те, которые наиболее полезны для пользователя. UCB обращается к первой проблеме, создавая неявные или явные модели объяснения: они могут неявно представлять сложные скрытые представления понятным образом или строить явные структуры, которые по своей сути понятны. Эти модели DEXAI создают набор возможных объяснительных действий. Для второй проблемы UCB предлагает рациональные объяснения, которые используют модель убеждений пользователя при

принятии решения, какие объяснительные действия выбрать. UCB также разрабатывает интерфейс объяснения, основанный на этих нововведениях, основанный на принципах итеративного дизайна. Автономность DEXAI демонстрируется для управления транспортными средствами (с использованием набора данных Berkeley Deep Drive и симулятора CARLA) [7] и в сценариях стратегической игры (StarCraft II). Для данных аналитики DEXAI использует визуальные ответы на вопросы (VQA) и методы фильтрации (например, с использованием крупномасштабных наборов данных, таких как VQA-X и ACT-X для задач VQA и задач распознавания активности), xView и Distinct [8].

2. Причинно-следственные модели для объяснения машинного обучения в CRA. Цель команды Charles River Analytics (CRA) (включая исследователей из Массачусетского университета и Университета Брауна) – создать и предоставить каузальные объяснения работы машинного обучения с помощью причинно-следственных моделей для объяснения подхода к обучению (CAMEL). Объяснения CAMEL представлены пользователю в виде рассказов в интерактивном, интуитивно понятном интерфейсе. CAMEL включает в себя структуру каузального вероятностного программирования, которая объединяет представления и методы обучения из каузального моделирования [9] с вероятностными языками программирования [10]. Генеративные вероятностные модели, представленные на языке вероятностного программирования, естественным образом выражают причинно-следственные связи; они хорошо подходят для этой задачи по объяснению систем машинного обучения. CAMEL исследует внутреннее представление системы машинного обучения, чтобы обнаружить, как оно представляет определенные пользователем концепции естественной области. Затем он строит причинно-следственную модель их влияния на работу системы машинного обучения, проводя эксперименты, в которых области согласования систематически включаются или удаляются. После изучения он использует причинно-вероятностные модели для вывода объяснений предсказаний или действий системы. В области аналитики и анализа данных CAMEL решает задачу обнаружения пешеходов (с использованием набора данных о пешеходах INRIA) [11], а CRA работает над задачами распознавания активности (с использованием ActivityNet). Автономность CAMEL демонстрируется в игре Atari Amidar, и CRA работает над ее демонстрацией в StarCraft II.

3. Изучение и передача объяснимых представлений для аналитики и автономности в UCLA. Команда Калифорнийского

университета в Лос-Анджелесе (UCLA) (включая исследователей из Университета штата Орегон и Университета штата Мичиган) разрабатывает интерпретируемые модели, сочетающие репрезентативные парадигмы, включая интерпретируемые DNN, композиционные графические модели, такие как И/ИЛИ графики, и модели, которые производят объяснения на трех уровнях (композиционности, причинности и полезности). Система UCLA включает модуль исполнения, который выполняет задачи с мультимодальными входными данными, и модуль объяснения, который объясняет пользователю свое восприятие, когнитивные рассуждения и решения. Модуль исполнения выводит интерпретируемые представления в виде графа пространственного, временного и причинного анализа (STC-PG) для трехмерного восприятия сцены (для аналитики) и планирования задач (для автономности). STC-PG являются композиционными, вероятностными, интерпретируемыми и основанными на функциях DNN и используются для анализа изображений и видео. Модуль объяснения выводит пояснительный синтаксический граф в процессе диалога [12], локализует соответствующий подграф в STC-PG и определяет намерения пользователя. Система представляет объяснения на трех уровнях: (1) концептуальные композиции, представленные фрагментами графа синтаксического анализа, которые отображают, как информация собирается из ее составляющих и контекстов, как решения принимаются в узлах в условиях неопределенности, и уровни уверенности; (2) причинно-следственная и контрфактическая аргументация, реализуемая путем извлечения причинных диаграмм из STC-PG, чтобы предсказать, что произойдет, если будут предприняты определенные альтернативные действия; и (3) объяснения полезности, которые объясняют, почему система приняла определенные решения. UCLA решает обе проблемные области XAI, используя общую структуру представления и вывода. Для анализа данных UCLA продемонстрировал свою систему с использованием сети видеокамер для понимания сцены и анализа событий. Автономность системы UCLA была продемонстрирована в сценариях с использованием роботов, выполняющих задачи на платформах виртуальной реальности с реалистичной физикой, и в игре с вождением автономного транспортного средства.

4. Приемочное тестирование глубоких адаптивных программ с обоснованной информацией в OSU. Университет штата Орегон (OSU) разрабатывает инструменты для объяснения действий обученных агентов, которые выполняют последовательное принятие решений, и

определяет лучшие принципы разработки пользовательских интерфейсов с объяснениями. Модель объяснимого агента OSU использует объяснимую глубокую адаптивную программу (xDAP), сочетающие в себе адаптивные программы, глубокое обучение с подкреплением (RL) и объяснимость. С помощью xDAP программисты могут создавать агентов, которые представляют решения, которые автоматически оптимизируются посредством глубокого RL при взаимодействии с симулятором. Для каждой точки выбора глубокое RL подключает обученную нейронную сеть глубокого принятия решений (dNN), которая может обеспечить высокую производительность, но по своей сути не является объяснимой. После начального обучения xDAP xACT обучает объяснительную нейронную сеть [13] для каждой dNN. Они предоставляют разреженный набор функций объяснения (x-функций), которые кодируют свойства логики принятия решений dNN. Такие x-функции, которые представляют собой нейронные сети, являются изначально не интерпретируемыми человеком. Чтобы решить эту проблему xACT позволяет экспертам в предметной области прикреплять интерпретируемые описания к x-функциям, а программистам xDAP – аннотировать типы вознаграждений среды и другие концепции, которые автоматически встраиваются в dNN как «концепции аннотаций» во время обучения.

Пользовательский интерфейс объяснения OSU позволяет пользователям ориентироваться в тысячах выученных решений агента и получить объяснения визуально и на естественном языке (NL). Его конструкция основана на теории сбора информации (IFT), которая позволяет пользователю в любой момент эффективно перейти к наиболее полезной пояснительной информации. OSU занимается проблемой автономности и продемонстрировала xACT в сценариях с использованием специально созданного игрового движка для стратегии в реальном времени. Пилотные исследования предоставили информацию для объяснения дизайна пользовательского интерфейса, охарактеризовав то, как пользователи ориентируются в игре с ИИ-агентом, и стремятся объяснить игровые решения.

5. Общее обучение и объяснение (PARC). Команда Исследовательского центра Пало-Альто (PARC) (включая исследователей из Университета Карнеги-Меллона, Армейского кибер-института, Эдинбургского университета и Университета Мичигана) разрабатывает интерактивную систему осмысления, которая может объяснить изученные возможности системы XAI, которая управляет смоделированной беспилотной воздушной системой. Объяснения системы XAI должны сообщать, какую информацию она использует для

принятия решений, понимает ли она, как все работает, и ее цели. Чтобы решить эту проблему, система общего изучения и объяснения PARC (COGLE) и ее пользователи устанавливают общую основу для определения того, какие термины использовать в объяснениях и их значения. Это обеспечивается интроспективной моделью дискурса PARC, которая чередует процессы обучения и объяснения.

Выполнение задач в естественном мире – сложная задача для автономных систем, требующая опыта, чтобы получить достаточно знаний для надежной высокой производительности. COGLE использует K-модели, которые кодируют знание специфической для предметной области задачи агента ИИ. K-модели организуют эти знания в уровни элементов, где более высокие (более низкие) уровни моделируют действия с более дальнодействующими (локальными) эффектами. Они поддерживают основанную на компетенциях структуру, которая информирует и направляет обучение и тестирование систем XAI. Многоуровневая архитектура COGLE разделяет обработку информации на осмысление, когнитивное моделирование и обучение. Уровень обучения использует повторяющиеся и иерархические DNN с ограниченной пропускной способностью для создания абстракций и композиций по состояниям и действиям беспилотных воздушных систем для поддержки понимания обобщенных закономерностей.

Интерфейсы пояснений COGLE поддерживают анализ производительности, оценку рисков и обучение. Первый представляет собой карту, которая отслеживает действия беспилотных воздушных систем и разделяет путь действия или решения (полета) на объяснимые сегменты. Инструменты второго интерфейса позволяют пользователям изучать и оценивать компетенции системы и делать прогнозы относительно эффективности миссии. COGLE демонстрируется на программном симуляторе ArduPilot Software-in-the-Loop Simulator и на испытательном стенде дискретного абстрактного моделирования. Его качество оценивают операторы дронов и аналитики. Оценка на основе компетенций поможет PARC определить, как лучше всего разработать подходящие модели, понятные для предметной области.

6. Объяснимое обучение с подкреплением. Университет Карнеги-Меллон. В Университете Карнеги-Меллон создается новая дисциплина объяснимого обучения с подкреплением XRL, чтобы обеспечить динамическое взаимодействие человека с машиной и адаптацию для максимальной производительности команды. Эти усилия преследуют две цели: разработать новые методы изучения объяснимых алгоритмов RL и разработать стратегии, которые могут объяснить существующие алгоритмы черного ящика. Для достижения

первой цели Карнеги-Меллон разрабатывает методы улучшения обучения моделей для агентов RL, чтобы использовать преимущества подходов, основанных на моделях (способность визуализировать планы во внутреннем пространстве модели), в то же время объединяя их с преимуществами подходов без моделей (простотой и максимальной производительностью). К ним относятся методы, которые постепенно добавляют состояния и действия к моделям мира после обнаружения соответствующей скрытой информации, изучают модели посредством сквозного обучения комплексными алгоритмам оптимального управления, изучают общие модели DL, которые используют физику твердого тела [15] и изучают предсказания состояний с использованием повторяющихся архитектур [16].

В Университете Карнеги-Меллон также разрабатывают методы, которые могут объяснить действия и планы агентов RL «черного ящика». Это включает в себя ответы на такие вопросы, как, например, почему агент выбрал определенное действие? или какие данные обучения больше всего повлияли на этот выбор? Для этого Карнеги-Меллон разработал методы, которые генерируют NL-описания агентов из журналов поведения и обнаруживают выбросы или аномалии. Карнеги-Меллон также разработал усовершенствования по сравнению с традиционными методами функций влияния в DL, что позволило его системе XRL точно идентифицировать части обучающей выборки, которые больше всего влияют на результат политики. Карнеги-Меллон занимается проблемой автономности и продемонстрировал XRL в нескольких сценариях, включая OpenAI Gym, игры Atari, моделирование автономных транспортных средств, мобильных сервисных роботов.

7. Объяснимые генеративные состязательные сети в SRI. Команда SRI International (включая исследователей из Университета Торонто, Университета Гвельфа и Калифорнийского университета в Сан-Диего) разрабатывает объяснимую структуру машинного обучения для анализа мультимодальных данных, которая генерирует понятные объяснения с обоснованием решений, сопровождаемых визуализации входных данных, используемых для создания выводов. Система представлений на основе глубокого внимания для объяснимых генеративных состязательных сетей (DARE / X-GANS) использует архитектуры DNN, аналогичные моделями внимания в визуальной нейробиологии. Она идентифицирует, извлекает и представляет доказательства пользователю как часть объяснения. Механизмы внимания предоставляют пользователю средства для исследования системы и совместной работы. DARE / X-GANS использует

генеративные состязательные сети (GAN), которые учатся понимать данные, создавая их, одновременно изучая представления с объяснительными возможностями. Сети GAN становятся объяснимыми с помощью интерпретируемых декодеров. Это включает в себя создание визуальных доказательств по заданным текстовым запросам с использованием генерации текста по частям [17], причем части являются интерпретируемыми функциями, такими как человеческие позы или ограничивающие рамки. Это свидетельство затем используется для поиска запрошенных визуальных данных.

Система представляет объяснения своих ответов на основе визуальных концепций, извлеченных из входных мультимодальных данных и запросов к базе знаний. Задавая пояснительные вопросы, она предоставляет обоснования, визуальные свидетельства, используемые для принятия решений, и визуализацию внутренней работы системы. Этот интерфейс объяснения «показать и рассказать» обеспечивает интуитивно понятные объяснения, что стало возможным благодаря модулям внимания, которые локализуют доказательства, используемые для каждой визуальной задачи. Первоначальные исследования показывают, что такие объяснения существенно улучшают производительность пользовательских задач. SRI занимается проблемной областью анализа данных и продемонстрировала работу DARE / X-GAN с использованием VQA и мультимодальных задач QA с наборами данных изображений и видео.

8. Система ответов на объяснимые вопросы (Raytheon BBN). Команда Raytheon BBN Technologies (включая исследователей из Технологического института Джорджии, Массачусетского технологического института и Техасского университета в Остине) разрабатывает систему, которая отвечает на любые вопросы на естественном языке (NL), задаваемые пользователями о мультимедийных данных, и обеспечивает интерактивные возможные объяснения того, почему он получил такой ответ. Система объяснимых ответов на вопросы (EQUAS) изучает объяснимые модели DNN, в которых внутренние структуры (например, отдельные нейроны) согласованы с семантическими концепциями (например, колеса и руль) [18]. Это позволяет преобразовывать нейронные активации в сети в процессе принятия решения в объяснения NL (например, «этот объект является велосипедом, потому что у него два колеса и руль»). EQUAS также использует методы нейронной визуализации, чтобы выделить входные области, связанные с нейронами, которые больше всего повлияли на его решения. Чтобы выразить объяснения на основе случаев, EQUAS сохраняет индексы и извлекает случаи из своих

обучающих данных, которые поддерживают его выбор. Отклоненные альтернативы распознаются и исключаются с использованием контрастного языка, визуализации и примеров. Четыре способа объяснения соответствуют ключевым элементам построения аргументов и интерактивной педагогики: дидактическим утверждениям, визуализациям, случаям и отказу от альтернативных вариантов. Интерфейс объяснения EQUAS позволяет пользователям исследовать пространство объяснения, заполненное этими режимами объяснения. Он обеспечивает итеративное и управляемое совместное взаимодействие, позволяя пользователям углубляться в подтверждающие доказательства из каждой категории объяснений. Raytheon BBN занимается проблемной областью аналитики и продемонстрировала начальные возможности EQUAS для задач VQA для изображений, исследуя, как различные методы объяснения позволяют пользователям понять и предсказать поведение базовой системы VQA.

9. Управляемые вероятностные логические модели (UTD). Команда Техасского университета в Далласе (UTD) (включая исследователей из Калифорнийского университета в Лос-Анджелесе, Texas A&M и Индийского технологического института в Дели) разрабатывает единый подход к XAI с использованием управляемых вероятностных логических моделей (TPLM). TPLM – это семейство представлений, которое включает в себя деревья решений, диаграммы двоичных решений, сети сечений, диаграммы сентенциальных решений, арифметические схемы первого порядка и управляемую логику Маркова [19]. Система UTD расширяет TPLM для генерации объяснений результатов запроса. Для масштабируемого вывода система использует новые алгоритмы для ответа на сложные запросы с объяснением, используя такие методы, как обобщенный вывод, вариационный вывод и их комбинации. Для быстрого и повышения точности обучения он использует дискриминационные методы, выводя алгоритмы, которые составляют NN и метод опорных векторов с TPLM. Затем эти подходы расширяются для обработки реальных ситуаций. Интерфейс объяснения UTD отображает интерпретируемые представления с несколькими связанными объяснениями. Его интерактивный компонент позволяет пользователям отлаживать модель и предлагать альтернативные объяснения. UTD занимается проблемной областью аналитики и демонстрирует свою систему распознавания человеческой деятельности в мультимодальных данных (видео и текст), таких как набор данных сцен кулинарии с текстовыми аннотациями.

10. Техасский университет A&M (TAMU) Преобразование глубокого обучения для использования интерпретируемости поверхностного. Команда Техасского университета A&M (TAMU) (включая исследователей из Вашингтонского государственного университета) разрабатывает интерпретируемую структуру DL, которая использует имитационное обучение для использования объяснимых неглубоких моделей и облегчает интерпретацию предметной области с визуализацией и взаимодействием. Имитационное обучение устраняет разрыв между глубокими и неглубокими моделями и обеспечивает интерпретируемость. Система также извлекает информативные шаблоны из необработанных данных для повышения интерпретируемости и эффективности обучения. Интерпретируемые алгоритмы обучения системы извлекают знания из DNN для соответствующих объяснений. Его модуль DL подключается к модулю генерации шаблонов, используя интерпретируемость неглубоких моделей. Результаты системы обучения отображаются пользователям с визуализацией, включая скоординированные и интегрированные представления. Система TAMU обрабатывает данные изображений [20] и текст [21] и применяется в проблемной области аналитики XAI. Она обеспечивает эффективную интерпретацию обнаруженных неточностей из различных источников, сохраняя при этом конкурентоспособные характеристики обнаружения. Система TAMU сочетает интерпретируемость на уровне модели и на уровне экземпляра для генерации объяснений, которые легче понять пользователям. Ее развернули для решения множества задач с использованием данных из Twitter, Facebook, ImageNet, CIFAR-10, онлайн-форумов по вопросам здравоохранения и новостных веб-сайтов.

11. Объяснение модели с помощью оптимального выбора обучающих примеров (Rugers). Университет Руджерс расширяет возможности байесовского обучения, чтобы сделать возможным автоматическое объяснение, выбирая подмножество данных, которое является наиболее репрезентативным для вывода модели. Данный подход позволяет объяснить выводы любой вероятностной генеративной и дискриминантной модели, а также моделей DL [22]. В Университете Руджерс также разрабатывается формальная теория взаимодействия человека и машины и поддерживается интерактивное объяснение сложных композиционных моделей. Распространенным среди них является основной подход, основанный на моделях человеческого обучения, способствующих объяснимости, и тщательно контролируемых поведенческих экспериментах для количественной оценки объяснимости. Объяснение с помощью байесовского обучения

вводит набор данных, вероятностную модель и метод вывода и возвращает небольшое подмножество примеров, которые лучше всего объясняют вывод модели. Эксперименты с незнакомыми изображениями показывают, что объяснения выводов о категории (и конкретные) изображений повышают точность рассуждений людей о модели. Эксперименты со знакомыми категориями изображений показывают, что объяснения позволяют пользователям точно откалибровать доверие к предсказаниям модели. Используя композицию и совместные модификации моделей машинного обучения, исследователи Руджерс предлагают общий подход к пониманию посредством управляемого исследования. Взаимодействие происходит через интерфейс, который раскрывает структуру модели и объясняет каждый компонент данных. Было продемонстрировано, что подход, предложенный в Университете Руджерс, облегчает понимание больших корпусов текстов, что оценивается способностью человека точно составить резюме корпуса после коротких, управляемых объяснений. Эффективность этого подхода была показана на изображениях, тексте, их комбинациях (например, VQA) и структурированном моделировании с использованием временной причинно-следственной структуры.

4. МЕТОДЫ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ПРАВИЛ ИЗ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Развитию методов объяснимого искусственного интеллекта во многом предшествовали методы извлечения правил из нейронных сетей. В ИИ нейронные сети и методы обучения на основе правил являются двумя подходами к решению проблем классификации. Оба метода являются известными вариантами моделей обучения, которые предсказывают классы для новых данных. Для многих задач нейросетевые методы обучения, основанные на правилах, являются очень точными. Тем не менее, нейронные сети имеют один главный недостаток: способность понимать понятийную сущность обученных моделей у нейросети слабее, чем у подходов, основанных на правилах. Концепции, полученные при обучении нейронных сетей, трудно понять, потому что они представлены с использованием большого набора параметров [23].

Повышение прозрачности нейронных сетей путем извлечения из них правил имеет два основных преимущества. Это дает пользователю некоторое представление о том, как нейронная сеть использует входные переменные, чтобы принять решение позволяет выявить скрытые функции в нейросетях, когда правила используются для объяснения

отдельных нейронов. Выявление особо важных атрибутов или выявление причин ошибок нейронной сети может быть частью понимания. Пытаясь сделать непрозрачные нейронные сети более понятными, методы извлечения правил устраняют разрыв между точностью и ясностью [23, 24]. Для того чтобы, например, нейронная сеть использовалась в критически важных приложениях, таких как самолеты или электростанции, требуется более понятная форма. В этих случаях крайне важно, чтобы у пользователя системы была возможность проверить значения выхода искусственной нейронной сети при всех возможных условиях входа [25].

Для формализации задачи извлечения правил из нейронной сети, можно использовать следующее определение: «При заданных обученной нейронной сети и данных, на которых она была обучена, создайте описание сетевой гипотезы, которая понятна, но приближается к поведению заданной сети». Чтобы различать различные подходы к извлечению правил из нейронных сетей, в [25] была введена многомерная таксономия. Первое измерение, которое в ней описывается, является выразительной силой извлекаемых правил (например, правила IF-THEN правила или нечеткие продукционные правила). Второе измерение называется прозрачностью и описывает стратегию, за которой следует алгоритм извлечения правил. Если метод использует нейронную сеть только как черный ящик, независимо от архитектуры нейросети, мы называем его педагогическим подходом. Если вместо этого алгоритм учитывает внутреннюю структуру нейронной сети, мы называем этот подход декомпозиционным. Если алгоритм использует компоненты как педагогических, так и декомпозиционных методов, то этот подход называется эклектическим. Третьим измерением является качество извлеченных правил. Поскольку качество является широким термином, оно делится на несколько критериев, а именно: аккуратность, точность, непротиворечивость и понятность. В то время как аккуратность измеряет способность правильно классифицировать ранее не видимые примеры, точность измеряет степень, в которой правила хорошо могут имитировать поведение нейронной сети [24]. Точность может рассматриваться как точность по отношению к выходу нейронной сети. Непротиворечивость может быть измерена только тогда, когда алгоритм извлечения правил включает обучение нейронной сети вместо обработки уже обученных нейронной сети. Извлеченный набор правил считается непротиворечивым, когда нейронная сеть генерирует наборы правил, которые правильно классифицируют тестовые данные для различных сессий обучения. Понятность рассматривается здесь как мера размера

правил, то есть, короткие правила при их небольшом количестве считаются более понятным. Обзор большого количества методов извлечения правил из нейронных сетей на основе данной таксономии приведен в [26].

Наиболее интересным с точки зрения данного исследования является извлечение правил с использованием нейро-нечетких моделей. Системы, основанные на нечетких правилах (FRBS), разработанные с использованием нечеткой логики, стали полем активных исследований за последние несколько лет. Эти алгоритмы доказали свои сильные стороны в таких задачах, как управление сложными системами, создание нечетких элементов управления. Взаимоотношения между обоими мирами (ANN и FRBS) были тщательно изучены и показана их эквивалентность [27]. Это дает важных вывода. Во-первых, мы можем применить то, что было обнаружено для одной из моделей, к другой. Во-вторых, мы можем перевести знания, встроенные в нейронную сеть, на более когнитивно-приемлемый язык – нечеткие правила. Другими словами, мы получаем семантическую интерпретацию нейронных сетей [28, 29].

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Достижения в машинном обучении и рост вычислительных мощностей привели к разработке интеллектуальных систем, которые применяются, чтобы рекомендовать фильм, диагностировать злокачественную опухоль, принимать инвестиционные решения или вести машину без водителя. Однако эффективность этих систем ограничена невозможностью объяснить решения и действия пользователю. Программа XAI DARPA разрабатывает и оценивает широкий спектр новых методов машинного обучения: модифицированные методы DL, которые изучают объяснимые функции; методы, которые изучают более структурированные, интерпретируемые причинные модели; и методы индукции моделей, которые выводят объяснимую модель из любой модели черного ящика. Полученные технологии и результаты показывают, что эти три широкие стратегии заслуживают дальнейшего изучения и предоставят будущим разработчикам варианты дизайна, увеличивающие производительность и объяснимость. Одним из важных способов помочь понять нейронные сети является извлечение правил. Для этого хорошо подходят опыт и знания, накопленные в области нечеткой логики при моделировании неоднозначностей в больших данных и неопределенности в представлении знаний, а также обеспечения обучения с неиндуктивным выводом.

Литература

1. https://doi.org/10.6028/NIST.IR.8312-draft.
2. https://d-russia.ru/v-ssha-sformulirovany-4-principa-objasnimogo-iskusstvennogo-intellekta.html.
3. Gunning D. DARPA's eXplainable Artificial Intelligence (XAI) Program// Proceedings of the 24th International Conference on Intelligent User Interfaces (IUI '19). ii-ii. 10.1145/3301275.3308446.
4. Park D. H., Hendricks L.A., Akata Z., Rohrbach A., Schiele B., Darrell T., Rohrbach M. Multimodal Explanations: Justifying Decisions and Pointing to the Evidence// Proceedings of the 2018 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. – New York: IEEE, 2019. doi.org/10.1109/CVPR. 2018.00915.
5. Ramanishka V., Das A., Zhang J., Saenko K. Top-Down Visual Saliency Guided by Captions// Proceedings of the 30th IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. – New York, IEEE, 2017. – P. 7206-7215.
6. Huang S.H., Bhatia K., Abbeel P., Dragan A. Establishing Appropriate Trust via Critical States// Presented at the 13th Annual ACM/IEEE 2018 International Conference on Human-Robot Interaction. Workshop on Explainable Robot Behavior (Madrid, Spain; October 1-5, 2018). doi.org/10.1109/IROS.2018.8593649.
7. Kim J., Canny J. Interpretable Learning for Self-Driving Cars by Visualizing Causal Attention// Proceedings of the International Conference on Computer Vision. – New York: IEEE, 2017. P.2942–50. doi.org/10.1109/ICCV. 2017.320
8. Hendricks L.A., Hu R., Darrell, T., Akata Z. Grounding Visual Explanation// Presented at the European Conference of Computer Vision (ECCV'2018, Munich, Germany; September 8–14, 2018). doi.org/10.1007/978-3-030-01216-8_17.
9. Marazopoulou K., Maier M., Jensen D. Learning the Structure of Causal Models with Relational and Temporal Dependence// Proceedings of the Thirty-First Conference on Uncertainty in Artificial Intelligence (Amsterdam, The Netherlands, July 12-16, 2015). – Amsterdam: Association for Uncertainty in Artificial Intelligence, 2015. – P. 572-581.
10. Pfeffer A. Practical Probabilistic Programming. Greenwich, CT: Manning Publications, 2016.
11. Harradon M., Druce J., Ruttenberg B. Causal Learning and Explanation of Deep Neural Networks via Autoencoded Activations// arXiv preprint. arXiv:1802.00541v1 [cs.AI]. Ithaca, NY: Cornell University Library, 2018.
12. She L., Chai, J.Y. Interactive Learning for Acquisition of Grounded Verb Semantics towards Human-Robot Communication// Proceedings of the 55th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics. Stroudsburg, PA: Association for Computation Linguistics. 2017. – Vol.1. – P.1634-1644. doi.org/10.18653/v1/P17-1150.
13. Qi Z., Li F. Learning Explainable Embeddings for Deep Networks// Paper presented at the NIPS Workshop on Interpreting, Explaining and Visualizing Deep Learning (Long Beach, CA, December 9, 2017).

14. Dodge J., Penney S., Hilderbrand C., Anderson A., Burnett M. How the Experts Do It: Assessing and Explaining Agent Behaviors in Real-Time Strategy Games// Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. New York: Association for Computing Machinery. 2018. doi.org/10.1145/3173574.3174136.
15. Belbute-Peres F., Kolter J.Z. A Modular Differentiable Rigid Body Physics Engine// Paper presented at the Neural Information Processing Systems Deep Reinforcement Learning Symposium (Long Beach, CA, December 7, 2017).
16. Hefny A., Marinho Z., Sun W., Srinivasa S., Gordon G. Recurrent Predictive State Policy Networks// Proceedings of the 35th International Conference on Machine Learning International (Stockholm, Sweden,10-15 July 2018). – San Diego: International Machine Learning Society, 2018. – P.1954-1963.
17. Vicol P., Tapaswi M., Castrejon L., Fidler S. MovieGraphs: Towards Understanding Human-Centric Situations from Videos// IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. – New York: IEEE, 2018. doi.org/10. 1109/CVPR.2018.00895.
18. Zhou B., Khosla A., Lapedriza A., Oliva A., Torralba A. Object Detectors Emerge in Deep Scene CNNs// Paper presented at the International Conference on Learning Representations (San Diego, CA, May 7–9, 2015).
19. Gogate V., Domingos P. Probabilistic Theorem Proving// Communications of the ACM. – 2016. – Vol.59, №7. – P. 107–115. doi.org/10. 1145/2936726.
20. Du M., Liu N., Song Q., Hu X. Towards Explanation of DNN-Based Prediction and Guided Feature Inversion// Proceedings of the 24th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. – New York: Association for Computing Machinery, 2018. – P.135-1367 doi.org/ 10.1145/3219819.3220099.
21. Gao J., Liu N., Lawley M., Hu X. An Interpretable Classification Framework for Information Extraction from Online Healthcare Forums// Journal of Healthcare Engineering. 2017. 2460174. doi.org/10.1155/2017/ 2460174.
22. Yang S. C.-H., Shafto, P. Explainable Artificial Intelligence via Bayesian Teaching// Paper presented at the 31st Conference on Neural Information Processing Systems. Workshop on Teaching Machines, Robots and Humans (Long Beach CA, December 9. 2017).
23. Craven M., Shavlik J. Rule Extraction: Where Do We Go From Here. University of Wisconsin Machine Learning Research Group Working Paper, 1999. – P. 99-108.
24. Johansson U., Lofstrom T., Konig R., Sonstrod C., Niklasson L. Rule Extraction from Opaque Models – a Slightly Different Perspective// Proceedings of the 5th International Conference on Machine Learning and Applications, (ICMLA'06. Orlando FL, December 14-16, 2006). P. 2227-2240.
25. Andrews R., Diederich J., Tickle A. B. Survey and Critique of Techniques for Extracting Rules from Trained Artificial Neural Networks// Knowledge-Based Systems. – 1995. – Vol.8, №6. – P. 373-389.
26. Averkin A.N., Yarushev S.A. Hybrid Intelligent System of Rules Extraction for Decision Making//J. Phys.: Conf. Ser. 2020. 1703 012007.

27. Setiono R., Leow W. KFERNN: An Algorithm for Fast Extraction of Rules from Neural Networks// Applied Intelligence. – 2000. – Vol.12, №1-2. – P. 15-25.
28. Averkin A., Yarushev S. Hybrid Neural Networks and Time Series Forecasting// Artificial Intelligence. Communication in Computer and Information Sciences. Vol.934 – Berlin: Springer, 2018 – P. 230-239.
29. Averkin A.N., Pilato G., Yarushev S.A. An Approach for Prediction of User Emotions Based on ANFIS in Social Networks// Second International Scientific and Practical Conference Fuzzy Technologies in the Industry (FTI 2018, Ocyober 22-25, 2018). CEUR Workshop Proceedings, 2018, pp. 126-134.

УДК 004.8: 165.24

ОТ ОБЪЯСНИМОГО ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА К «ПОНИМАЮЩИМ» КОГНИТИВНЫМ АГЕНТАМ*

***Тарасов В.Б.**, к.т.н.*
e-mail: valery_tarassov@mail.ru
МГТУ им. Н.Э.Баумана

1. ВВЕДЕНИЕ

Ещё в 1990-х годах в своей работе «Десять горячих точек в исследованиях по искусственному интеллекту» [1] родоначальник искусственного интеллекта (ИИ) в СССР и России, первый президент Ассоциации искусственного интеллекта Д.А.Поспелов предсказал становление двух разных наук, связанных с построением прикладных интеллектуальных систем. По его словам, «одна из них будет по-прежнему опираться на уровень ментальных (информационных) представлений, а другая – на уровень структурной организации, порождающей новые решения» (с.56). Этот прогноз полностью оправдался, причём достижения ИИ XXI-го века связаны, главным образом, с бурным развитием *машинного обучения* на базе непрозрачных *глубоких нейронных сетей*.

В то время, как ранние системы ИИ, в частности, экспертные системы, в структуре которых имелась подсистема объяснения, были простыми и легко интерпретируемыми, нейронные сети глубокого обучения представляют собой сложные (и сверхсложные) модели «чёрного яшика». Их практический успех обусловлен комбинацией эффективных влгоритмов обучения и огромным параметрическим пространством. Это пространство содержит сотни слоёв и миллионы параметров, что обеспечивает очень высокую эффективность обучения и исключительную точность распознавания объектов с помощью глубоких, в частности, свёрточных и капсульных, нейронных сетей.

Опасность развития интеллектуальных технологий только по данному пути заключается в том, что полученные в таких «чёрных ящиках» решения нельзя строго обосновать или даже просто детально

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект №20-07-00770

объяснить их поведение. С одной стороны, непрозрачность принципиально ограничивает легитимность использования подобных технологий и отпугивает заказчиков в самых разных областях, в первую очередь, в военном деле, медицине, экономике и финансах, на транспорте. С другой стороны, интерпретируемость позволяет исправлять недостатки интеллектуальной системы, выявленные в процессе её эксплуатации. Всё это демонстрирует исключительную важность построения объяснений на выходах подобных систем.

Начиная примерно с 2017 года, в рамках программы DARPA возникло мощное междисциплинарное научно-практическое движение «*Объяснимый искусственный интеллект»* (eXplainable Artificial Intelligence, сокращённо XAI) [2-4], направленное на формирование системы методов и технологий для: а) разработки *объяснимых* моделей машинного обучения, реализующих компромисс между высокой точностью обучения и интерпретируемостью; б) поддержки пользователей в плане *понимания* ими своих искусственных интеллектуальных партнёров и формирования у людей доверия к их решениям. Таким образом, ключевые термины для XAI – это «объяснение», «понимание» и «партнёрство».

В настоящей работе проблемы понимания и объяснения будут рассмотрены в русле концепции *партнёрских систем* гибридного интеллекта (на примере системы «человек-робот»).

2. ПАРТНЁРСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ: ИДЕЯ ГИБРИДНОГО ИНТЕЛЛЕКТА

В теоретическом плане, отождествление искусственного интеллекта с машинным обучением сильно ограничивает его проблематику. Согласно основоположнику ИИ и автору этого термина Дж. Маккарти, работа над искусственным интеллектом, предполагает уточнение самого понятия «интеллект» [5]. Вариант подобного уточнения был предложен профессором В.К. Финном [6]. Следуя И. Канту, он различает две ипостаси интеллекта – рассудок и разум. Начальным этапом разработки модели интеллекта и построения архитектуры искусственной интеллектуальной системы является выбор требуемых подмножеств из базового множества интеллектуальных способностей человека, которое включает:

1) выделение существенного в данных и знаниях;
2) порождение последовательности «цель – план – действие»;
3) возможность отбора посылок, релевантных целям;
4) способность к рассуждениям – выводу следствий из имеющихся посылок;

5) способность к обучению и использованию памяти;
6) способность к объяснению и ответу на вопрос «Почему?»;
7) познавательную активность, т.е. способность ответить на вопрос «Что такое?»:
8) способность к аргументированному принятию решений на базе представления знаний и результатов рассуждений, соответствующих поставленной цели;
9) способность к рефлексии, оценке своих знаний и действий;
10) синтез познавательных процедур, т.е. эвристик, связанных с взаимодействием индукции, аналогии и абдукции;
11) рационализация идей и превращение их в понятия;
12) способность к интеграции знаний, т.е. способность объединять имеющиеся знания и создавать целостную картину мира;
13) способность к адаптации знаний при изменении условий и жизненных ситуаций, т.е. коррекция теорий.

Сегодня некоторые из интеллектуальных способностей, которые принято относить к *рассудку* (например, способности к рассуждению, обучению, распознаванию) автоматизированы, что означает возможность функционирования искусственной системы в автономном режиме. Другие же способности (целеполагание, интеграция знаний, порождение понятий из идей), рассматриваемые как проявления *разума*, в настоящее время не поддаются автоматизации и могут быть реализованы только в интерактивном режиме с участием человека.

Соответственно, интеллектуальная система может работать как в (ограниченном) автономном, так и партнёрском режимах [6]. В общем случае, интеллектуальная система – это партнёрская система «человек-техника», основанная на взаимодействии естественных и искусственных интеллектуальных агентов.

Главным принципом организации нового класса *партнёрских систем «человек-техника»* на базе информационного взаимодействия естественных и искусственных физических агентов (например, роботов), становится *принцип синергии*, означающий взаимную компенсацию ограничений, дополняемость и сотрудничество этих агентов в русле представлений *гибридного интеллекта* (ГИ).

Теоретические основы концепции гибридного интеллекта были заложены ещё в 1975 году В.Ф.Вендой (см. [7]). Под ГИ у него понималась сложная адаптивная система информационного взаимодействия «человек-техника», в которой: а) осуществляется многоуровневая взаимная адаптация компонентов системы, сотрудничество между человеком и искусственным агентом, включая гибкое оперативное распределение и перераспределение функций, а также смену лидерства между партнёрами в процессе их совместной

работы; б) производится совместный анализ и синтез информации; в) имеются возможности самоорганизации; г) реализуется антропоцентрический подход к созданию интерфейса между человеком и искусственным агентом.

Концептуальной основой для разработки как автономных роботов, так и роботов–партнёров человека может служить современная теория интеллектуальных (в частности, когнитивных и коллаборативных) агентов [8-10], тесно связанная с расширенными представлениями об искусственном интеллекте (ИИ), такими как искусственный общий интеллект AGI (Artificial General Intelligence) [11, 12] и синергетический ИИ SynAI [8, 13]. Так главными постулатами AGI являются: (1) развитие концепции целостного интеллекта и разработка соответствующих методов; (2) разработка интеллектуальной системы общего назначения, не зависящей от предметной области; (3) осознание того, что построение искусственных интеллектуальных систем человеческого уровня является долгосрочной программой ИИ. Завершённая работа в рамках AGI должна: а) опираться на общую теорию интеллекта; б) содержать формальную модель, построенную на основе этой теории; в) иметь компьютерную реализацию данной модели.

Основные различия между синергетическим и классическим ИИ приведены в таблице 1.

Таблица 1. Различия между классическим и синергетическим ИИ

Признаки	Классический ИИ	Синергетический ИИ
Общая методология	Рационалистическая	Синергетическая
Основной объект разработки и изучения	Простые, закрытые, интеллектуальные системы, основанные на знаниях	Сложные, динамические, открытые, кооперирующие интеллектуальные системы. Агенты, многоагентные системы
Модели интеллекта	Одноуровневые, символьные. Интеллект – закрытая система	Системные многоуровневые (интеллект – открытая система, синергия познания и эмоций, символа и числа)
Природа интеллекта	Индивидуальная, Сосредоточенная	Диалоговая, коллективная, распределённая
Интерпретация интеллектуальной системы	Одномерная: система, основанная на знаниях	Многомерная: целостная, интенционально обусловленная система

Способ создания	Проектирование = инженерия знаний	Инженерия когнитонов инженерия взаимодействий, проектирование и само-организация действий
Механизм обработки информации	Формально-логический (строгие рассуждения)	Семиотический (логико-лингвистический), единство измерений, оценок, рассуждений и вычислений.
Ключевые типы рассуждений	Монологические	Диалогические

3. ПРОБЛЕМА ПОНИМАНИЯ В ИСКУССТВЕННОМ ИНТЕЛЛЕКТЕ

До последнего времени основными объектами понимания в ИИ остаются тексты: понять текст – значит раскрыть смысл, вложенный в текст его автором. Модели и системы понимания текста компьютером продолжают активно развиваться (см., например, [14]).

Однако *объектами понимания* могут быть не только тексты, но и события, ситуации, поведение, результаты измерений и пр. Понимание может рассматриваться и как способность, и как операция, и как процесс, и как результат, и как средство (технология) усвоения знаний [15]. Нередко понимание определяют как способность человека *постичь смысл* или *значение* чего-либо с целью достижения полезного результата. В когнитивном плане выделяют три уровня понимания: а) понимание–*узнавание*; б) понимание–р*ассуждение*, направленное на объяснение, обоснование или оправдание *предположения*; в) понимание–*соединение* отдельных частей в единое целое. Основа понимания–узнавания есть сравнение с образцом. Обоснование гипотезы – это приведение комплекса доводов в интересах её подтверждения, а оправдание гипотезы связано с установлением ценностного отношения: предположение считается оправданным, если его нельзя отбросить без затрагивания других, более важных утверждений. Наконец, понимание – соединение напрямую связано с созданием целостной картины мира, ситуации, поведения, и пр.

Часто понимание трактуют как *универсальную операцию мышления*. В одном случае её связывают с *усвоением нового содержания*, включением его в систему устоявшихся идей и представлений, т.е. соотнесением с уже известным. В другом случае, понимание – это *оценка объекта* с определённых позиций, на основе некоторого *стандарта*, *образца*, *нормы* и т.п. Эта трактовка является

аксиологической, т.е. опирается на теорию ценностей, поскольку любая оценка означает подведение под ценность (или вывод из принятых ценностей с использованием общих правил).

3.1. Проблема понимания в работах классиков ИИ

Формализации постановки и решения проблемы понимания уделяли значительное внимание ещё классики искусственного интеллекта Т. Виноград [16], А. Ньюэлл[17], Г. Саймон [18], Э.В. Попов [19], Д.А. Поспелов [20], и др. Так в работе [17] было введено следующее определение понимания: система *S* понимает знание *K*, если она использует его всякий раз, когда *K* уместно. С одной стороны, здесь понимание относится к знаниям, а не к реальным предметам. С другой стороны, понимание связано с использованием этих знаний для решения задач; соответственно глубину понимания можно охарактеризовать тем классом задач, которые способна решать система. В этой связи Г. Саймон [18] ввёл задачно-ориентированное определение понимания: система *S* понимает задачу *T*, если она имеет знания и процедуры *K*, необходимые для выполнения *T*. Таким образом, понимание выражается с помощью тернарного отношения, связывающим *S*, *T* и *K*.

Согласно Э.В. Попову [19], понимание собеседника означает определение тех целей (намерений), которые тот преследовал, формируя некоторый текст. В этом плане «понять» смысл сообщения означает найти его взаимосвязь с целью общения. Если эта взаимосвязь не установлена, то следует говорить о непонимании сообщения. В работе Д.А. Поспелова [20] были введены и исследованы уровни понимания компьютера.

По Р.Карнапу [21], основным средством прагматики, с помощью которого уточняют идею «понимания», являются «предложения о мнениях», т.е. высказывания вида $BEL(a, t, p)$ – агент a в момент времени t считает, что p, где p – предложение естественного языка. Следует отметить, что Карнап использовал двузначную логику при рассмотрении предложений о мнениях, игнорируя варианты неопределенности, неполноты информации, противоречия.

3.2. Представление проблемы понимания на основемодифицированного треугольника Уиггинса-Мактайга

Онтология понимания, восходящая к идее циклического нарастания понимания и «герменевтическому кругу» Х.-Г. Гадамера [22], служит примером нестандартной рекурсивной онтологии, которая предполагает развёртывание мереологических

отношений, переходы от целого к части и обратно к целому. Перспективным вариантом формализации таких онтологий видится аппарат сложных графов с гранулярными примитивами, в первую очередь, метаграфов [23, 24].

В нашей работе развивается *расширенный аксиологический подход к пониманию*, согласно которому оно трактуется как единство ценностей, оценок, норм, рассуждений и действий. Для его наглядной иллюстрации, будем использовать модифицированный шестигранник Уиггинса-Мактайга [25] (рис.1). В нём выделим «грани понимания» и проведём анализ рекурсивных связей между пониманием и его гранями.

Рис.1. Модифицированная модель Уиггинса-Мактайга

Взаимосвязи между познанием и пониманием являются двусторонними: сама возможность познания и результативность действий агента во многом определяется уже достигнутым уровнем понимания (предпониманием), но понимание, в свою очередь, сильно зависит от уровня информированности, когнитивных возможностей и структуры языка (рис.2).

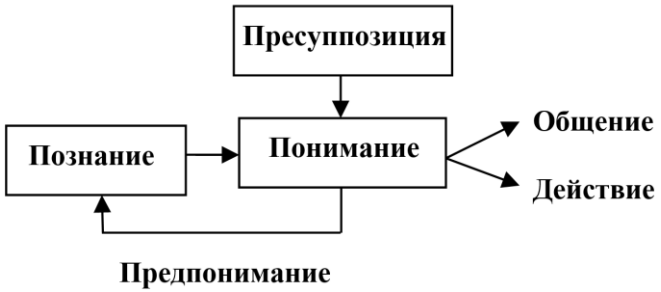


Рис.2. О взаимосвязях между пониманием и познанием

Если понимание предполагает установление прямого, очевидного, конкретного смысла, то интерпретация охватывает такие операции как выявление скрытого смысла, придание нового смысла, порождение смысла в диалоге. Ещё классики герменевтики, в частности, В. Дильтей [26] и Х.-Г. Гадамер [22], утверждали, что чем глубже уровень понимания, тем богаче интерпретация, тем более интересные и нетривиальные истолкования могут возникнуть. В партнёрских системах «человек-робот» интерпретация формируется у робота в режиме диалогового управления.

Понимание ситуаций, намерений и действий агентов в системах гибрижного интеллекта оказывается более сложной задачей, чем понимание текстов. Здесь очень важную роль играют диалоги между партнёрами и согласование их нормативных представлений.

Важнейшей познавательной процедурой, способствующей пониманию в системах гибридного интеллекта, является объяснение задачи (и ситуации в целом) человеком интеллектуальному агенту (роботу). Объяснение – это рассуждение, посылки которого содержат информацию, достаточную для выведения из неё описания объясняемого явления. Объяснение и понимание часто трактуют как две универсальные операции мышления, взаимно дополняющие друг друга [27].

На рис.3 показаны типовые взаимосвязи между процедурами объяснения и понимания в процессе диалога интеллектуальных агентов. Объяснение, рассматриваемое как подведение объясняемого явления под некоторый закон, пример или общую истину, опирается на описание и обеспечивает понимание, а понимание как подведение под общее правило или стандарт имеет нормативную базу.

Рис.3. Диада «объяснение – понимание»: взаимосвязи и различия рассуждений

Классическим вариантом объяснения является объяснение на примерах. Пример принципиально отличается от образца. Пример говорит о том, что имеет место в действительности, а образец – о том, что должно

быть. Иными словами, примеры используются для поддержки описательных суждений, а ссылки на образцы служат обоснованием правил и норм.

Помимо объяснения понимание агента опирается на такие процедуры как *обоснование* и *оправдание*. В общем случае, обоснование есть процедура аргументации, приведения доводов в пользу принятия определённого решения. Обоснование может быть абсолютным или сравнительным. Схема абсолютного обоснования имеет вид «*A* должно быть принято в силу *C*», где *A* – обосновываемое положение, а *C* – основание для его принятия. Структура сравнительного обоснования сводится к выражению «лучше принять *A*, чем *B*, в силу *C*» [27].

Нередко обоснование сводится к проверке полученного результата на предмет непротиворечивости знаниям, которые хранятся в памяти интеллектуального агента. Речь идёт о погружении нового факта в систему уже имеющихся фактов, таком, что добавление этого факта не порождает противоречий. В то же время оправдание означает погружение нового факта в систему ценностей агента, при условии, что положительная оценка данного факта ей не противоречит, Иными словами, реальное обоснование связано с трактовкой истинности как когерентности – степени согласованности факта с располагаемым знанием, а степень оправдания сильно зависит от системы ценностей. В поведенческом плане эти процедуры дополняют друг друга: обоснование направлено на формирование нормативного поведения, а оправдание скорее влечёт за собой ситуативное поведение.

Следуя Д.А. Поспелову [28], можно проследить взаимосвязи между видами рассуждений человека-партнёра в общении и обучении робота-партнёра, этапами обучения и формируемым у робота типом поведения. В русле психологического структурного анализа Э. Берн выделил три состояния «Я» когнитивного агента: «Родитель», «Взрослый» и «Ребёнок». Методика обучения робота-партнёра в процессе диалога с человеком-партнёром может соответствовать, например, последовательности взаимодействий «Родитель-Ребёнок», «Ребёнок-Ребёнок», «Взрослый-Взрослый». Так дедуктивные рассуждения «Родителя» (рис.5) основаны на жёсткой системе аксиом, содержащих незыблемые истины и нормы, т.е. осуществляют достоверный вывод без всякой неопределённости и возможности пересмотра. Типичный вариант: рассуждения, основанные на законах робототехники А. Азимова. Например, первый закон: «Робот не может причинить вред человеку или своим бездействием допустить, чтобы человеку был причинён вред. Факт: «Некто нападает на человека-партнёра, хватает его и может причинить вред». Заключение: «Робот должен вмешаться в эту ситуцаию и отбить нападение».

На начальном этапе обучения подобные рассуждения призваны сформировать этические основы нормативного поведения робота. Затем могут проводиться рассуждения «Ребёнка», тесно связанные с чувственной сферой и операциями оправдания. Здесь на первый план выходят эмоциональные механизмы рассуждений, направленные на установление и укрепление сотрудничества в разных ситуациях. Например, высказывание человека-партнёра «я рад, что мы сделали это, а ты»? предполагает выражение эмоционального консонанса у робота-партнёра. Правдоподобные рассуждения «Взрослого» нацелены на выработку у кобота критического отношения к получаемой извне (не от партнёра) информации, а также проведение действий по её проверке на соответствие задаче, нормам и модели мира.

Уровень понимания роботом стоящей перед ним задачи можно определить оценкой результатов его действий, причём эти действия не должны противоречить стандартам совместной работы в робототехнике.

Классическое определение понимания у агента сводится к операции *оценки* объекта (ситуации, поведения) с определённых позиций, на основе некоторого образца, стандарта, нормы. По сути, данное определение выражает общую идею понимания как сравнения, сопоставления с образцом. При этом сравнение может иметь как когнитивные, так и эмоциональнын механизмы.

Остановимся подробнее на роли норм при уствновлении партнёрских отношений в системах «человек-робот». *Нормы* – это социальные запреты и ограничения, накладываемые сообществом на отдельного агента. С одной стороны, нормы есть частный случай оценок: их можно рассматривать как общественно апробированные и закреплённые оценки. Средством, превращающим оценку в норму, является угроза наказания, т.е. стандартизация норм осуществляется с помощью санкций. Так ещё К. Менгер установил прямую связь между предписанием и санкцией: «обязательно r, а если не r, то наказание или ухудшение». С другой стороны, формирование норм предполагает согласование разных мнений по этим нормам.

Формально норму как предписание к действию можно выразить четверкой

$$NORM = \langle A, act, M, W \rangle,$$

где A – множество агентов, которым адресована норма; $act \in ACT$ – действие, являющееся объектом нормативной регуляции (содержание нормы), W – множество миров, в которых применима норма (условия приложения, обстоятельства, в которых должно или не должно выполняться действие);. M – множество систем модальностей, связанных с действием, например, система M_N = {О,Р,Б,З}, О – «обязательно», Р – «разрешено, Б – «безразлично», З – «запрещено». Реализация агентом

нормативного поведения предполагает наличие, по крайней мере, двух элементов: *нормы*, обязательной для выполнения в данной ситуации, и *оценки* степени выполнения ее предписаний.

В контексте взаимопонимания и сотрудничества естественных агентов ключевую роль играет *эмпатия*, связанная с вживанием агента в другое «я» и сопереживанием за партнёра. Развитию партнёрских отношений в системах «человек-интеллектуальный робот» благоприятствует имитация у робота хотя бы в зачаточной форме механизмов сопереживания, что подразумевает оперативную идентификацию эмоций человека-партнёра.

Соединение диалоговых процедур обучения на базе объяснения и обоснования с процедурами прямого обучения робота движениям человека и выполняемым им операциям путём их демонстрации, а также построение расширенного партнёрского интерфейса с использованием *инженерии эмоций* [29, 30] представляют основные направления развития стратегии гибридного интеллекта в системах «человек-робот». Вариант архитектуры такого партнёрского интерфейса представлен на рис.4.

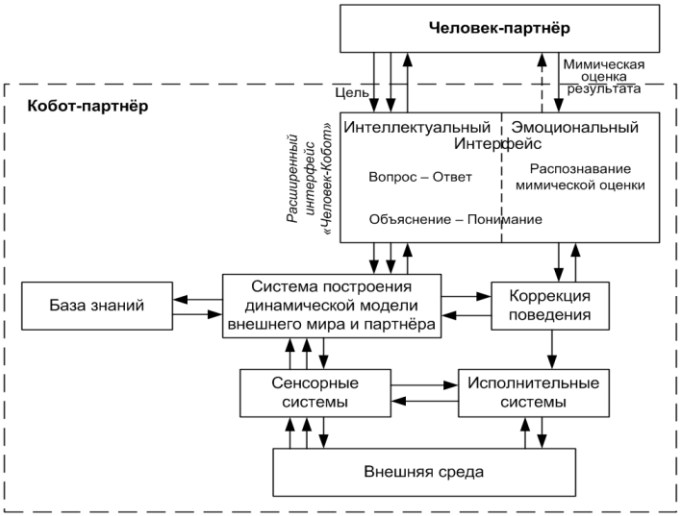


Рис.4. Общая архитектура робота как интеллектуального агента с расширенным партнёрским интерфейсом. Термин «кобот» означает «коллаборативный робот»

3.3. Лингвографические переменные, визуальные ряды и распознавание смысла

Как знания, так и эмоции могут быть представлены с помощью системы биполярных шкал и различения ситуаций или результатов

действий агентов с помощью оценок на этих шкалах. Многие логико-семантические модели понимания опираются на оппозиционные шкалы и представление их состояний – обычное или деформированное. Здесь обычное состояние шкалы соответствует статическим взаимоотношениям между полюсами. Деформированное состояние характеризует динамику шкалы, выражающуюся в движении полюсов, переходе от одного полюса к другому или от одной интерпретации нейтральной точки к другой.

Среди преобразований биполярных шкал особый интерес представляет введённая Д.А. Поспеловым деформация скручивания, когда оппозиция полюсов ослабевает, и они как бы склеиваются, образуя новый полюс, а бывшая нейтральная точка также превращается в полюс. Переход шкалы в особое «напряжённо- деформированное» состояние может привести к синергетическим эффектам и формированию дополнительных шкал в семантическом пространстве.

Одной из главных характеристик человека является широкое использование естественного языка для описания объектов и состояний. Так лингвистическая оппозиционная шкала задаётся пятёркой $LOS=\langle a^+, a^-, c, s_p, s_c\rangle$, где a^+и a^- –пара исходных вербальных оценок-антонимов, например, «большое» и «малое» значения, c – нейтральное значение, например, «средний», а s_p и s_c – две операции сдвига. Здесь s_p – операция поляризации (растяжения полюсов), а и s_c – операция центрирования (сдвига оценок к центру). Это представление иллюстрирует природу числа Миллера: $m=7\pm2$. В случае лингвистической шкалы операции s_p отвечает модификатор «очень» («very»), а операции s_c – модификатор «более или менее» («rather»).

Известной формализованной моделью, позволяющей отразить ряд аспектов понимания в триаде «понятие – значение – смысл» является лингвистическая переменная Л. Заде [31], значениями которой являются лингвистические метки (нечёткие переменные), а смысл выражается множеством семантических правил, задающих полимофные отображения («один-ко многим») лингвистических оценок в числовые значения и обратно. В модели Л. Заде предполагается, что семантические соответствия между словами и числами всегда существуют и могут быть определены человеком. Однако во многих приложениях это условие не выполняется, и мы имеем дело с нечёткими образными [30] (графическими) рядами. Будем называть модели, в которых смысл выражается с помощью полиморфного соответствия между лингвистическими оценками и графическими изображениями, *лингвографическими переменными* (ЛГП). Хорошим примером ЛГП может служить переменная с именем ЭМОЦИИ, базовыми лингвистическими значениями «радость – горе» и промежуточными н значениями «печаль», «грусть», «задумчивость». Понимание

лингвистических меток достигается путём автоматического распознавания человеческих лиц.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В узком смысле, объяснимый ИИ представляет объяснимое машинное обучение на основе гибридных нейрологических или нейрографических систем, где базовые технологии – нейронные сети глубокого обучения – снабжаются специальной системой логических и/или графических средств, образующих объяснительный интерфейс пользователей с целью обеспечения их понимания и доверия.

В статье рассмотрен подход, в некотором смысле обратный XAI, который направлен на формирование систем гибридного интеллекта на основе синергии когнитивных и эмоциональных структур понимания и взаимопонимания. Лежащее в его основе понимание-рассуждение опирается на логические методы, а понимание-узнавание связано с распознаванием эмоций по набору архетипов, представленных в массиве фотографий человеческих лиц из базы изображений FER2013. Задача распознавания эмоций решалась с помощью свёрточной нейронной сети в облачной среде Colaboratory компании Google.

Создание партнёрских человеко-машиннрых систем, в особенности, систем «человек-робот», представляет собой одну из наиболее перспективных стратегий практической реализации подходов гибридного интеллекта. Необходимым условием перехода от классического представления робота как многофункционального инструмента деятельности человека к организации сотрудничества естественного и искусственного агентов-партнёров в системе «человек-робот» является наделение робота способностями когнитивного и коммуникативного агента. Среди этих способностей ключевую роль играет понимание как важнейший фактор эффективности познания, общения и сотрудничества. В структуре «шестигранника понимания», рассмотренного в работе, тесно переплетаются когнитивные процессы, эмоциональные состояния, волевые проявления, включая наглядные интерпретации и мимические оценки, рациональные объяснения и эмоциональные сопереживания, нормативные обоснования и варианты реализации совместных, повторяющихся действий агентов.

Партнёрские ваимодействия агентов в системах гибридного интеллекта – первый шаг на пути к формированию «сознательных» роботов с расширенными возможностями сотрудничества с человеком. Ведь сознание человека отнюдь не ограничивается совместным знанием, в нём. прежде всего, всплывают знания, пронизанные переживаниями. Самоорганизация сознания начинается с переживаний.

Литература

1. Поспелов Д.А. Десять «горячих точек» в исследованиях по искусственному интеллекту // Интеллектуальные системы (МГУ). – 1996. – Т.1, вып.1-4. – С. 47-56. См. также: Искусственный интеллект и принятие решений. – 2019. – №4. – С.3-9.
2. Gunning D., Aha D. DARPA's Explainable Artificial Intelligence (XAI) Program // AIMagazine. – 2019. – Vol.40, №2. – P. 44-58. https://doi.org/10.1609/aimag.v40i2.2850.
3. Arrieta A.B., Dias–Rodrıguez N., Del Sera J. et al. Explainable Artificial Intelligence (XAI): Concepts, Taxonomies, Opportunities and Challenges toward Responsible AI// Information Fusion. – 2020. – Vol.58. – P.82-115.
4. Vilone G., Longo L. Explainable Artificial Intelligence: A Systematic Review // ArXiv preprint 2006.00093. – 2020.
5. Маккарти Дж., Хейес Р. Дж. Некоторые философские проблемы в задаче построения искусственного интеллекта// Кибернетические проблемы бионики. – М.: Мир, 1972. – С.40-88.
6. Финн В.К. Искусственный интеллект: методология, применения, философия. – М.: КРАСАНД, 2011.
7. Венда В.Ф. Системы гибридного интеллекта: эволюция, психология, информатика. – М.: Машиностроение, 1990.
8. Тарасов В.Б. От многоагентных систем к интеллектуальным организациям. – М: Эдиториал УРСС, 2002.
9. Городецкий В.И. Самоорганизующиеся сети агентов – базовая модель группового и кооперативного поведения автономных объектов // Сборник докладов конференции «Искусственный интеллект: Проблемы и пути решения-2018» (Москва, 14-16 марта, 2018 г.). – М., 2018. – С.7-16.
10. Тарасов В.Б. Биполярные шкалы, многозначные семантики и решётки модальностей в моделировании когнитивных агентов// Гибридные и синергетические интеллектуальные системы. Материалы IV-й Всероссийской Поспеловской конференции (Светлогорск, 14-19 мая 2018 г.). – Калининград: Изд-во БФУ им. И.Канта, 2018. – С. 98-115.
11. Artificial General Intelligence/ Ed.by B.Goertzel and C.Pennachin. – Berlin: Springer, 2007.
12. Theoretical Foundations of Artificial General Intelligence/ Ed. by Pei Wang and B.Goertzel. – Beijing: Atlantis Press, 2012.
13. Тарасов В.Б. Синергетический искусственный интеллект: моделирование переговоров между автономными агентами // Гибридные и синергетические интеллектуальные системы. Материалы II-го Международного Поспеловского симпозиума (Светлогорск, 30 июня – 6 июля 2014 г.). – Калининград: Изд-во БФУ им. И.Канта, 2014.– С. 340-358.
14. Zhang X., LeCun Y. Text Understanding from Scratch// ArXiv: 1502.01710, 2016.
15. Тарасов В.Б. Проблема понимания: настоящее и будущее искусственного интеллекта // Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем. Материалы V-й Международной научно-технической конференции (OSTIS-2015, Минск, БГУИР, 19-21 февраля 2015 г.). – Минск: Изд-во БГУИР, 2015. – С. 25-42.

16. Winograd T., Flores F. Understanding Computers and Cognition: a New Foundation for Design. – Norwood: Ablex, 1986.
17. Moore J., Newell A. How Can MERLIN Understand? // Knowledge and Cognition. – Baltimore: Lawrence Erlbaum Associates, 1973.
18. Simon H. Artificial Intelligence Systems that Understand// Proceedings of the 5th International Joint Conference on Artificial Intelligence. – Boston: MIT, 1977. – P. 1059-1073.
19. Попов Э.В. Общение с ЭВМ на естественном языке. 2-е изд. – М.: Едиториал УРСС, 2004.
20. Поспелов Д.А. Интеллектуальные интерфейсы для ЭВМ новых поколений// Электронная вычислительная техника. Сборник статей. Вып.3. – М.: Радио и связь, 1989. – С.4-20.
21. Карнап Р. О некоторых понятиях прагматики// Карнап Р Значение и необходимость. Исследование по семантике и модальной логике. – М.: Изд-во ЛКИ, 2007.
22. Гадамер Х.-Г. Истина и метод: основы философской герменевтики: Пер. с нем. – М.: Прогресс, 1988.
23. Basu A., Blanning R.W. Metagraphs and Their Applications. Integrated Series in Information Systems. – Berlin: Springer-Verlag, 2007.
24. Tarassov V.B., Gapanyuk Yu.E. Complex Graphs in the Modeling of Multi-Agent Systems: From Goal-Resource Networks to Fuzzy Metagraphs // Lecture Notes in Artificial Intelligence. Vol.12412.–Berlin: Springer, 2020. – P. 177-198.
25. Wiggins G., McTighe J. Understanding by Design. 2nd ed. – Alexandria, VA: ASCD, 2005.
26. Дильтей В. Собрание сочинений в 6 томах. Т.4. Герменевтика и теория литературы: Пер. с нем. – М.: Дом интеллектуальной книги, 2001.
27. Ивин А.А. Логика оценок и норм. Философские, методологические и прикладные аспекты. – М.: Проспект, 2016.
28. Поспелов Д.А. Моделирование рассуждений: состояние и ближайшее будущее // Теория и применение искусственного интеллекта. – Созополь, Болгария, 1989. – С. 46-53.
29. Фоминых И.Б. Инженерия образов, творческие задачи, эмоциональные оценки// Онтология проектирования. – 2017. – Т.8, №2. – С.175-189.
30. Ющенко А.С., Конышев Д.В. Моделирование эмоций в робототехнике с использованием нечёткой логики // Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте. Сборник научных трудов VIII-й международной научно-практической конференции (ИММВ-2015, Коломна, 18-20 мая 2015 г.). – М.: Физматлит, 2015. – Т.2. – С. 515-525.
31. Заде Л. Понятие лингаистической переменной и его применение к принятию приближённых решений: Пер.с англ. – М.: Мир, 1976.
32. Кобринский Б.А. Нечёткие онтологии и визуальные образные ряды// Сборник научных трудов VIII-й международной научно-практической конференции (ИММВ-2015, Коломна, 18-20 мая 2015г.). – М.: Физматлит, 2015. – Т.1. – С.70-74.

СЕКЦИЯ 1 | **НЕЧЁТКИЕ ГРАФЫ, МЕТАГРАФЫ И СЕТИ**

УДК 004.82

ЭТАПЫ РАЗВИТИЯ МЕТАГРАФОВОЙ МОДЕЛИ ДАННЫХ И ЗНАНИЙ*

***Гапанюк Ю.Е.**, к.т.н.*
e-mail: gapyu@bmstu.ru
МГТУ им. Н.Э. Баумана

1. ВВЕДЕНИЕ

Среди когнитивных моделей в искусственном интеллекте традиционно важную роль играют графовые модели представления знаний. В настоящее время повышенное внимание привлекают модели на основе сложных сетей или сложных графов.

В настоящее время термины «сложная сеть» или «комплексная сеть», которые являются различными переводами англоязычного термина «complex network») и термин «сложный граф» (англ. «complex graph») часто употребляются как синонимы. В работе [1, с. 14] отмечается, что термин «сложная сеть», как правило, употребляется для обозначения реальной исследуемой системы, в то время как термин «сложный граф» обычно используют для обозначения математической модели такой системы.

Наибольшие разночтения вызывает термин «сложный» применительно к графовым моделям. Как правило, термин «сложный» трактуется в двух вариантах:

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект №20-07-00770

I. Плоские графы (сети) очень большой размерности. Такие сети могут включать миллионы и более вершин. Ребра, соединяющие вершины, могут быть ненаправленными или направленными. Иногда используется модель мультиграфа, в этом случае две вершины могут соединяются не одним, а несколькими ребрами.

Именно такую модель в литературе чаще всего называют «сложной сетью». Исследования данной модели проводятся в основном специалистами в области математики. Исследователи рассматривают такие параметры как распределение количества связей между вершинами, выделение сильно связанных подграфов. Часто для связей вводится количественная метрика, которая обычно трактуется как расстояние между вершинами. Активно исследуются динамические модели, в которых к существующей сложной сети случайным образом добавляются вершины и ребра. Такие модели представляют интерес при изучении социальных сетей, глобальных компьютерных сетей, различных социологических и биологических моделей. Но они не очень хорошо помогают при описании сложных моделей данных и знаний.

II. Сложные графы, в которых используется сложное (комплексное) описание вершин, ребер и/или их расположения. Часто в таких моделях отказываются от плоского расположения вершин и ребер. Именно подобные модели могут быть наиболее полезны при описании сложных моделей данных. На сегодняшний день известны четыре подобных модели: гиперграф, гиперсеть, метаграф и многоуровневая сеть (которая является упрощенным вариантом гиперсети).

В настоящее время в литературе еще не появился единый «собирательный термин» для моделей такого класса. Авторы моделей, как правило, используют собственные названия для каждой модели, не всегда даже указывая на родство предлагаемой модели со сложными графами (сетями).

Для подобного класса моделей можно предложить такой «собирательный термин» как «ансамбли сложных сетей (графов)». Для гиперсетевой и метаграфовой моделей может быть использован термин «сложные сети (графы) с эмерджентностью», так как данные модели реализуют принцип эмерджентности, хорошо известный в общей теории систем.

Также достаточно типичной является ситуация, когда для семейства схожих моделей сложных сетей используется одинаковое название. Примером является гиперсетевая модель. Эта модель, с одинаковым названием «гиперсетевая», была независимо предложена профессором В.К. Попковым [2] и профессором Дж. Джонсоном [3].

С одной стороны, концепции предлагаемых вариантов гиперсетевой модели во многом схожи. Но, с другой стороны, разница между двумя вариантами моделей, использование различающихся математических аппаратов, и само изложение материала авторами моделей достаточно убедительно свидетельствует об отсутствии возможных заимствований.

Отчасти похожей является история развития метаграфовой модели. Будучи изначально предложенной А. Базу и Р. Блэннингом в 2007 году [4], модель в дальнейшем получила ряд расширений, независимо предлагаемых различными группами исследователей. Далее, на основе известных работ, рассмотрим историю развития метаграфовой модели.

2. МЕТАГРАФОВАЯ МОДЕЛЬ А. БАЗУ И Р. БЛЭННИНГА

Исторически монография А. Базу и Р. Блэннинга [4] была первым источником, в котором появился термин «метаграф». В монографии даются следующие определения, характеризующие метаграфовую модель.

Порождающее множество метаграфа – это множество переменных, встречающихся в ребрах метаграфа: $X = \{x_1, x_2, \ldots, x_n\}$.

Ребро метаграфа $e = \langle V_e, W_e \rangle \in E$ (где E – множество ребер) содержит ***входную вершину (invertex)*** $V_e \subset X$ и ***выходную вершину (outvertex)*** $W_e \subset X$. Входная и выходная вершины могут содержать произвольное количество элементов. Различные элементы, принадлежащие входной (выходной) вершине, называются соответственно ***совходами*** (***совыходами***).

Тогда ***метаграф*** $S = \langle X, E \rangle$ – это графовая конструкция, определяемая порождающим множеством *X* и множеством ребер *E*, при этом множество ребер определено на том же порождающем множестве.

Простым путем *h(x, y)* из элемента *x* в элемент *y* это последовательность ребер $\langle e_1, e_2, \ldots, e_n \rangle$, такая что:

- *x* является входной вершиной e_1, $x \in invertex(e_1)$;
- *y* является выходной вершиной e_n, $y \in outvertex(e_n)$;
- для всех $e_i, i = 1, \ldots, n-1$ выполняется условие: $outvertex(e_i) \cap invertex(e_{i+1}) \neq \varnothing$, то есть путь из начальной вершины в конечную не прерывается.

В монографии [4] приводится пример метаграфа, представленный на рис.1, для которого приводится следующая теоретико-множественная интерпретация:

- *S = <X, E>*;
- *X = {Exp, Notes, Prof, Rev, Pri, Vol, Wage}*;
- *E = <{Pri,Vol},{Rev}>, <{Vol,Wage},{Exp}>, <{Rev,Exp},{Prof , Notes}>, <{Exp}, {Notes}>*.

Эмерджентность в модели А. Базу и Р. Блэннинга достигается за счет использования ребер. Понятие метавершины в данной модели отсутствует.

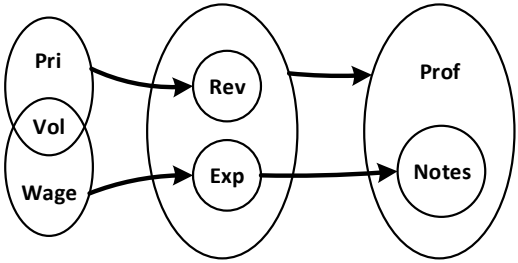


Рис.1. Пример описания метаграфа в интерпретации А. Базу и Р. Блэннинга

В целом можно отметить, что данный вариант метаграфовой модели более подходит для описания направленных процессов, чем для описания сложных графовых структур данных.

3. МЕТАГРАФОВАЯ МОДЕЛЬ С МЕТАВЕРШИНАМИ

Отсутствие естественного механизма для описания сложных графовых структур данных привело к появлению расширений исходной модели А. Базу и Р. Блэннинга. В моделях появились новые элементы – метавершины и метаребра.

В работе [5] появляется понятие метавершины. В этой работе даются следующие определения метаграфовой модели.

Метаграф – это тройка множеств вершин, метавершин и ребер соответственно: $S = \langle V, M, E \rangle$, где $V = \{v_r\}$ – множество вершин метаграфа (порождающее множество); $M = \{m_q\}$ – множество метавершин метаграфа; $E = \{e_h\}$ – множество ребер метаграфа.

Метавершина метаграфа $m_q = \{v_r \mid v_r \in V, r = 1,\ldots, N_{mq}\}$

определяется как множество вершин v_r, входящих в метавершину m_q, где N_{mq} – мощность множества.

Очень интересным следует считать следующее замечание авторов модели [5, с. 238]: «… если две или больше метавершин соответствуют одному и тому же множеству вершин, то такие вершины считаются одинаковыми и рассматривается только одна из таких метавершин». Назовем данное свойство модели [5] свойством анти-аннотируемости, особенности которого будут рассмотрены далее.

Интересно, что для задания ребер, авторы модели [5] вводят понятие узла метаграфа $mv \in (V \cup M)$, принадлежащего объединенному множеству вершин и метавершин. Ребро определяется как $e_h = \langle mv_{out}, mv_{in} \rangle$, то есть характеризуется исходящим и входящим узлами метаграфа. Но использование понятия узла для создания иерархических метавершин авторами модели не предлагается.

4. ИЕРАРХИЧЕСКАЯ МЕТАГРАФОВАЯ МОДЕЛЬ С МЕТАВЕРШИНАМИ И МЕТАРЕБРАМИ

В работе [6] появляется не только понятие метавершины, но также понятия метаребра и иерархии вершин.

Метаграф в модели [6] определяется как $S = \langle X, X_M, E, E_M \rangle$, где X – множество вершин метаграфа (порождающее множество); X_M – множество метавершин метаграфа; E – множество ребер метаграфа; E_M – множество метаребер метаграфа, заданных на множестве $X_M \cup X$.

Таким образом, под метаребром в данной модели понимается ребро, которое может соединять вершину и метавершину или две метавершины.

Важной особенностью данной модели является то, что авторы вводят понятие ***вложенного метаграфа***, который, как полагают авторы, является «обобщением обычных графов, гиперграфов и метаграфов» [6].

В данной модели множество вершин X рассматривается как иерархическое, вводится индекс *i*, определяющий уровень вложенности вершины.

Свойство анти-аннотируемости авторами модели не утверждается и не опровергается. При этом, приводимые в статье примеры неявно используют свойство анти-аннотируемости.

Необходимо отметить, что относительно небольшая по объему работа [6] цитируется в большинстве более поздних статей по тематике метаграфов, что с нашей точки зрения говорит о важности центрального вопроса данной статьи – описания иерархий в метаграфовой модели.

5. АННОТИРУЕМАЯ МЕТАГРАФОВАЯ МОДЕЛЬ

Аннотируемая метаграфовая модель расширяет идеи исходной модели А. Базу и Р. Блэннинга [4] и идеи работы [6]. Содержание работы [5] на момент появления первой версии аннотируемой метаграфовой модели [7] было нам неизвестно.

Аннотируемую метаграфовую модель предлагается использовать как средство для описания сложных сетей [8], как средство для описания семантики и прагматики информационных систем [7], как средство для описания гибридных интеллектуальных информационных систем [9]. Определим ***метаграф*** следующим образом: $MG = \langle V, MV, E, ME \rangle$, где MG – метаграф; V – множество вершин метаграфа; MV – множество метавершин метаграфа; E – множество ребер метаграфа; ME – множество метаребер метаграфа.

Вершина метаграфа характеризуется ***множеством атрибутов***: $v_i = \{atr_k\}, v_i \in V$, где v_i – вершина метаграфа; atr_k – атрибут.

Ребро метаграфа характеризуется множеством атрибутов, исходной и конечной вершиной и признаком направленности: $e_i = \langle v_S, v_E, eo, \{atr_k\} \rangle, e_i \in E, eo = true \mid false$, где e_i – ребро метаграфа; v_S – исходная вершина (метавершина) ребра; v_E – конечная вершина (метавершина) ребра; eo – признак направленности ребра (eo=true – направленное ребро, eo=*false* – ненаправленное ребро); atr_k – атрибут.

Фрагмент метаграфа в общем виде может содержать произвольные вершины (метавершины) и ребра (метаребра): $MG_i = \{ev_j\}, ev_j \in (V \cup E \cup MV \cup ME)$, где MG_i – фрагмент метаграфа; ev_j – элемент, принадлежащий объединению множеств вершин (метавершин) и ребер (метаребер) метаграфа.

Метавершина метаграфа в дополнение к свойствам вершины включает вложенный фрагмент метаграфа: $mv_i = \langle \{atr_k\}, \{ev_j\} \rangle$,

$mv_i \in MV$, $ev_j \in (V \cup E \cup MV \cup ME)$, где mv_i – вершина метаграфа; atr_k – атрибут, ev_j – элемент, принадлежащий объединению множеств вершин (метавершин) и ребер (метаребер) метаграфа.

Наличие у метавершин собственных атрибутов и связей с другими вершинами является важной особенностью метаграфов. Это соответствует принципу эмерджентности, то есть приданию понятию нового качества, несводимости понятия к сумме его составных частей. Фактически, как только вводится новое понятие в виде метавершины, оно «получает право» на собственные свойства, связи и т.д., так как в соответствии с принципом эмерджентности новое понятие обладает новым качеством и не может быть сведено к подграфу базовых понятий.

Таким образом, метаграф можно охарактеризовать как «сложный граф с эмерджентностью» или «сложную сеть с эмерджентностью», то есть фрагмент сети, состоящий из вершин и связей, может выступать как отдельное целое.

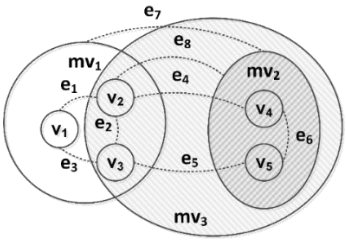


Рис.2. Пример описания метаграфа в аннотируемой метаграфовой модели

Пример описания метаграфа показан на рис.2. Данный метаграф содержит вершины, метавершины и ребра. На рис.2 показаны три метавершины: mv_1, mv_2 и mv_3. Метавершина mv_1 включает вершины v_1, v_2, v_3 и связывающие их ребра e_1, e_2, e_3. Метавершина mv_2 включает вершины v_4, v_5 и связывающее их ребро e_6. Ребра e_4, e_5 являются примерами ребер, соединяющих вершины v_2-v_4 и v_3-v_5, включенные в различные метавершины mv_1 и mv_2. Ребро e_7 является примером ребра, соединяющего метавершины mv_1 и mv_2. Ребро e_8 является примером ребра, соединяющего вершину v_2 и метавершину mv_2. Метавершина mv_3 включает метавершину mv_2, вершины v_2, v_3 и ребро e_2 из метавершины mv_1 а также ребра e_4, e_5, e_8, что показывает холоническую структуру метаграфа.

Отметим, что в отличие от [5], в данной модели не выполняется свойство анти-аннотируемости. Одинаковый набор вершин и ребер

может быть включен в несколько различных метавершин, которые могут представлять различные ситуации и быть аннотированы различными атрибутами.

Также, в предлагаемой нами модели, метавершина может включать как вершины, так и ребра.

Метаребро метаграфа в дополнение к свойствам ребра включает вложенный фрагмент метаграфа: $me_i = \langle v_S, v_E, eo, \{atr_k\}, \{ev_j\} \rangle, e_i \in E, eo = true \mid false, ev_j \in (V \cup E \cup MV \cup ME),$

где me_i – метаребро метаграфа; v_S – исходная вершина (метавершина) ребра; v_E – конечная вершина (метавершина) ребра; eo – признак направленности метаребра (eo=true – направленное метаребро, $eo=false$ – ненаправленное метаребро); atr_k – атрибут; ev_j – элемент, принадлежащий объединению множеств вершин (метавершин) и ребер (метаребер) метаграфа.

Пример описания метаребра метаграфа представлен на рис.3. Метаребро содержит метавершины v_S, … v_i, … v_E и связывающие их ребра. Исходная метавершина содержит фрагмент метаграфа. В процессе преобразования исходной метавершины v_S в конечную метавершину v_E происходит дополнение содержимого метавершины, добавляются новые вершины, связи, вложенные метавершины.

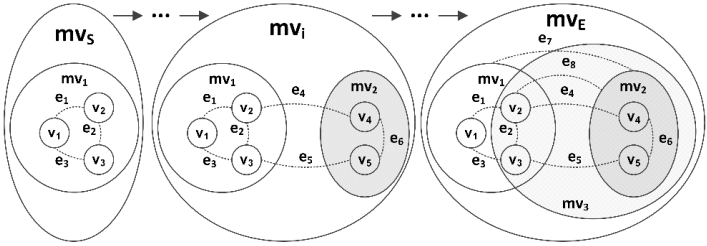


Рис.3. Пример описания метаребра метаграфа в аннотируемой метаграфовой модели

Таким образом, иерархическому метаребру из модели [6] соответствует обычное ребро в предлагаемой нами модели. А под метаребром понимается последовательность изменения метавершин метаграфа.

Если метавершины предназначены прежде всего для описания данных и знаний, то метаребра предназначены в большей степени для описания процессов. Таким образом, метаграфовая модель позволяет в рамках единой модели описывать данные, знания и процессы.

6. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АГЕНТОВ ДЛЯ ОБРАБОТКИ АННОТИРУЕМОЙ МЕТАГРАФОВОЙ МОДЕЛИ

Аннотируемая метаграфовая модель предназначена для описания данных. Рассмотрим способ преобразования метаграфовой модели на основе мультиагентного подхода. В предлагаемом подходе используются два вида агентов: ***агент-функция*** и ***метаграфовый агент***.

Определим ***агент-функцию*** следующим образом: $ag^F = \langle MG_{IN}, MG_{OUT}, AST \rangle$, где ag^F – агент-функция; MG_{IN} – метаграф, который выполняет роль входного параметра агента-функции; MG_{OUT} – метаграф, который выполняет роль выходного параметра агента-функции; AST – абстрактное синтаксическое дерево агента-функции, которое может быть представлено в виде метаграфа.

Определим ***метаграфовый агент*** следующим образом: $ag^M = \langle MG_D, R, AG^{ST} \rangle, R = \{r_j\}$, где ag^M – метаграфовый агент; MG_D – метаграф данных и знаний, на основе которого выполняются правила агента; R – набор правил (множество правил r_j); AG^{ST} – стартовое условие выполнения агента (фрагмент метаграфа, который используется для стартовой проверки правил, или стартовое правило).

Структура правила метаграфового агента: $r_i : MG_j \to OP^{MG}$, где r_i – правило; MG_j – фрагмент метаграфа, на основе которого выполняется правило; OP^{MG} – множество операций, выполняемых над метаграфом.

Антецедентом правила является фрагмент метаграфа, консеквентом правила является множество операций, выполняемых над метаграфом.

Отметим, что правила метаграфового агента можно разделить на ***замкнутые и разомкнутые***.

Разомкнутые правила не меняют в правой части правила фрагмент метаграфа, относящийся к левой части правила. Можно разделить входной и выходной фрагменты метаграфа. Данные правила являются аналогом шаблона, который порождает выходной метаграф на основе входного.

Замкнутые правила меняют в правой части правила фрагмент метаграфа, относящийся к левой части правила. Изменение метаграфа в правой части правил заставляет срабатывать левые части других правил. Но при этом некорректно разработанные замкнутые правила могут привести к зацикливанию метаграфового агента.

Таким образом, метаграфовый агент позволяет генерировать один метаграф на основе другого (с использованием разомкнутых правил) или модифицировать метаграф (с использованием замкнутых правил).

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Среди когнитивных моделей в искусственном интеллекте традиционно важную роль играют графовые модели представления знаний. В настоящее время повышенное внимание привлекают модели на основе сложных сетей или сложных графов. Одной из наиболее развитых моделей этого класса является метаграфовая модель.

Отсутствие в исходной модели А. Базу и Р. Блэннинга естественного механизма для описания сложных графовых структур данных привело к появлению расширений этой модели за счет возникновения новых элементов – метавершин и метаребер.

В настоящее время одной из наиболее развитых модификаций метаграфовой модели является аннотируемая метаграфовая модель. Если метавершины в этой модели предназначены, прежде всего, для описания данных и знаний, то метаребра предназначены в большей степени для описания процессов. Таким образом, метаграфовая модель позволяет в рамках единой модели описывать данные, знания и процессы.

Для преобразования метаграфовой модели используются агент-функция и метаграфовый агент. Метаграфовый агент позволяет генерировать один метаграф на основе другого (с использованием разомкнутых правил) или модифицировать метаграф (с использованием замкнутых правил).

Литература

1. Chapela V., Regino Criado, Santiago Moral, Miguel Romance. Intentional risk management through complex networks analysis. – Springer, 2015: SpringerBriefs in optimization.
2. Попков В.К. Математические модели связности. Новосибирск: ИВ-МиМГ СО РАН, 2006.
3. Johnson J. Hypernetworks in the science of complex systems. – London, Hackensack NJ: Imperial College Press, 2013.
4. Basu A., Blanning R.W. Metagraphs and their applications. – New York: Springer, 2007.
5. Глоба, Л. С. Метаграфы как основа для представления и использования баз нечетких знаний / Л. С. Глоба, М. Ю. Терновой, Е. С. Штогрина // Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем = Open Semantic Technologies for Intelligent Systems (OSTIS-2015) : материалы V междунар. науч.-техн. конф. (Минск, 19-21 февраля 2015 года)/ редкол.: В. В. Голенков (отв. ред.) [и др.]. – Минск : БГУИР, 2015. – С. 237-240.

6. Астанин С.В., Драгныш Н.В., Жуковская Н.К. Вложенные метаграфы как модели сложных объектов // Инженерный вестник Дона, 2012, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p2y2012/1434
7. Самохвалов Э.Н., Ревунков Г.И., Гапанюк Ю.Е. Использование метаграфов для описания семантики и прагматики информационных систем. Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Приборостроение». 2015. Выпуск №1. С. 83-99.
8. Черненький В.М., Терехов В.И., Гапанюк Ю.Е. Представление сложных сетей на основе метаграфов // Нейроинформатика-2016. XVIII Всероссийская научно-техническая конференция. Сборник научных трудов. Ч. 1. М.: НИЯУ МИФИ, 2016. С. 173-178.
9. Черненький В.М., Гапанюк Ю.Е., Ревунков Г.И., Терехов В.И., Каганов Ю.Т. Метаграфовый подход для описания гибридных интеллектуальных информационных систем. Прикладная информатика. 2017. № 3 (69). Том 12. С. 57-79.

УДК 004.8

МЕТАГРАФЫ С ТЕМПОРАЛЬНО-ЛОГИЧЕСКИМИ ОГРАНИЧЕНИЯМИ*

***Плесневич Г.С.**, к.ф.-м.н.*
e-mail: salve777@mail.ru
НИУ «МЭИ»
***Тарасов В.Б.**. к.т.н.*
e-mail: vbulbov@yahoo.com
МГТУ им. Н.Э.Баумана

1. ВВЕДЕНИЕ

В последние годы при моделировании многоагентных систем и сетевых сообществ всё большее применение находят сложные графы с нестандартными, гранулярными, иерархическими примитивами [20]. Эта тенденция связана, в частности, с потребностью наглядного описания отношений между множествами (а не только парами) вершин. Одним из ранних примеров сложных графов являются *гиперграфы*, которые обобщают понятие графа на случай, когда каждое ребро может соединять не два, а любое число вершин [2]. Такое ребро с множеством конечных точек называется *гиперребром*.

В данной работе будут рассмотрены метаграфы, вершинами которых могут служить как единичные объекты (или агенты), так и множества объектов. Понятие метаграфа было введено А.Базу и Р.Блэннингом в 1992 году [10,11] как графовая структура, в которой каждая вершина есть множество, состоящее из одного или большего числа элементов, а рёбра характеризуют направленные отношения между множествами.

Метаграфы Базу-Блэннинга являются расширением как ориентированных графов (допускается один или более элементов в вершине метаграфа), так и гиперграфов (вводятся направления в рёбрах). Кроме того, гиперребро в гиперграфе связано только с вершинами, тогда как метавершина в метаграфе может включать вершины, другие метавершины и рёбра.

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты №20-07-00615, 20-07-00770 и 18-29-03088)

Основы теории и ряд приложений метаграфов изложены в книге [14], в которой метаграф задается обобщённо в виде упорядоченной пары $MG = (X, E)$, где X – порождающее множество, а E – множество рёбер, определённое на порождающем множестве.

В [1] в явном виде берётся иерархическое порождающее множество, содержащее как вершины v, так и метавершины mv, т.е. $X=V\cup MV$. В [6] рассмотрены различные виды нечётких порождающих множеств и с помощью теоремы представления установлены связи между нечёткими графами и метаграфами. Наконец, в [5] разработана модель рекурсивного аннотированного метаграфа с порождающими свойствами.

Работы Базу-Блэннинга 1990-х годов посвящены применению метаграфов в моделировании предприятий [11], поддержке принятия решений [13], установлению взаимосвязей между метаграфами и сетями Петри [12]. Их теоретические результаты, изложенные в книге [14], в основном связаны с утверждениями о свойствах, выражаемых через пути и метапути в метаграфах, а также с различными преобразованиями метаграфов. Области приложений затрагивают четыре темы: (1) модели отношений между данными; (2) модели поддержки принятия решений; (3) модели для систем, основанных на правилах (Rule-Based Systems); (4) модели для систем потоков работ (Workflow Systems). В публикациях [9, 10, 15-21] рассмотрен ряд приложений в экономике (фондовые рынки), бизнесе (представление и анализ бизнес-процессов), медицине, неоднородных информационных сетях (решение проблемы слияния рекомендаций), и др.

2. ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Предварительно дадим наглядные представления связей между обычными графами и метаграфами. Так на рис.1c изображен метаграф, который был получен из ориентированного графа, показанного на рис.1b. На рис.1d дано другое изображение этого метаграфа. Данный метаграф – ориентированный: его дуги соответствуют упорядоченным парам метавершин – (конечным) множествам вершин. Если взять неупорядоченные пары вершин, то получим неориентированный метаграф. Например, из изображенного на рис.1a неориентированного графа получается неориентированный метаграф, если упорядоченные пары метавершин заменить на неупорядоченные.

Определение 1. Формально (ориентированный) *метаграф* есть четвёрка

$$\boldsymbol{MG} = (V, H, E, \rho), \qquad (1)$$

где $V=\{v_1, v_2,\ldots, v_n\}$ – множество *вершин*, $E=\{e_1, e_2,\ldots, e_m\}$ – множество *дуг*, $H \subseteq 2^V$, элементы множества H называются *метавершинами* метаграфа, ρ – функция $E \to H \times H$, назначающая пару $\rho(e_j) \in H \times H$ метавершин каждой дуге $e_j \in E$.

Начало и *конец* дуги e_j метаграфа MG – это его метавершины e_j^- и e_j^+ такие, что $\rho(e_j) = (e_j^-, e_j^+)$.

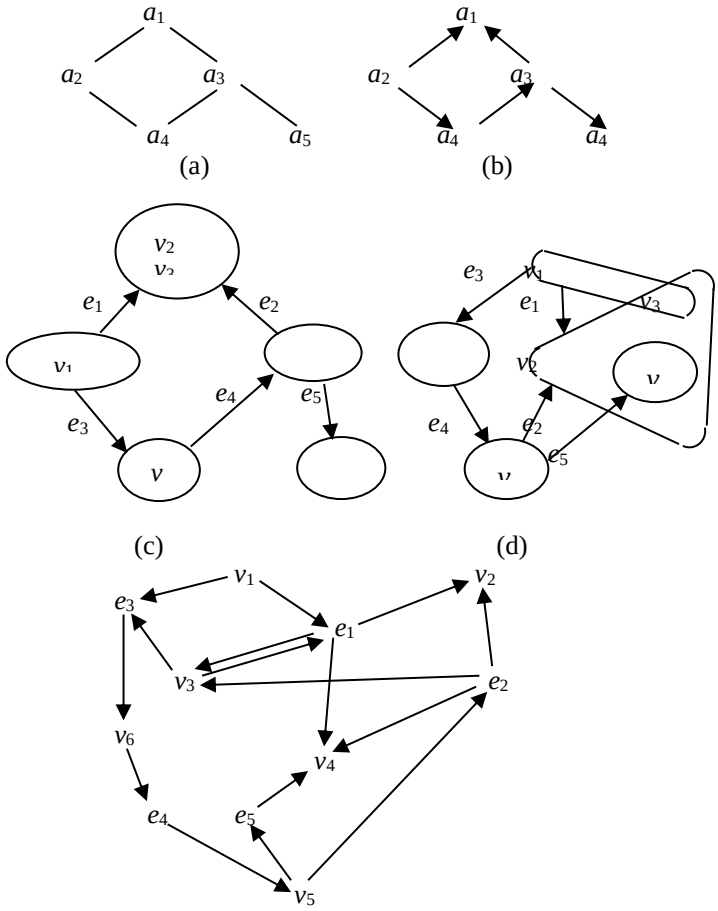


Рис.1. (a) Неориентированный граф; (b) Ориентированный граф; (c) метаграф; (d) Изображение метаграфа у Басу и Блэннинга; (e) двудольный граф Г(*MG*) для метаграфа *MG*

Пример 1. Положим

$V = \{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5, v_6\}$, $E = \{e_1, e_2, e_3, e_4, v_5\}$,

$H = \{\{v_2, v_3, v_4\}, \{v_1, v_3\}, \{v_4\}, \{v_5\}, \{v_4\}\}$,

$\rho(e_1) = (\{v_1, v_3\},\{v_2, v_3, v_4\})$, $\rho(e_2) = (\{v_5\}, \{v_2, v_3, v_4\})$,

$\rho(e_3) = (\{v_1, v_3\}, \{v_6\})$, $\rho(e_4) = (\{v_6\}, \{v_5\})$, $\rho(e_5) = (\{v_5\}, \{v_5\})\}$,

Этот метаграф (V,H,E,ρ) изображен на рис.1 (c) и (d). Для его дуг началами и концами служат $e_1^- = \{v_1, v_3\}$, $e_1^+ = \{v_2, v_3, v_4\}$, $e_2^- = \{v_5\}$, $e_2^+ = \{v_2, v_3, v_4\}$ и т.д.

Метаграф MG можно также представить ориентированным двудольным графом, обозначаемым $\Gamma(MG)$. Вершинами графа $\Gamma(MG) = (U, F)$ служат вершины и дуги метаграфа, т.е. $U = V \cup E$ (где V – одна доля метаграфа и E – другая доля), а дуги графа $\Gamma(MG)$ определяются следующим условием: $(v_i,e_j) \in F \Leftrightarrow e_j^-$ и $(e_j,v_i) \in F \Leftrightarrow e_j^+ \in F \Leftrightarrow e_j^-$.

В типичных приложениях графов их вершины часто обозначают действия, работы, события, словом, объекты, которые изменяются во времени. В общем случае понятие темпоральных графов трактуется достаточно широко: от временных графиков до ориентированных ациклических графов и сетей Петри. Темпоральные графы и их приложения к моделированию сложных систем описаны, например, в [3, 17].

В данной работе будем рассматривать метаграфы, с которыми ассоциированы темпоральные интервалы. Для таких объектов вводится понятие *темпорального метаграфа* (Т-метаграфа).

Предварительно напомним, что элементарные отношения между темпоральными интервалами были впервые рассмотрены Джеймсом Алленом (J.F.Allen) в основополагающей работе [2], где он ввёл логику интервалов, нашедшую многочисленные применения при решении задач информатики (и особенно, задач искусственного интеллекта). В таблице 1 показаны 7 основных отношений Дж.Аллена между интервалами.

В логике Аллена интервалы содержат только качественную информацию. Для представления количественных зависимостей между интервалами к атомарным предложениям логики Аллена добавляется метрическая информация. Алгоритмы дедукции для расширений интервальной логики Аллена рассмотрены в [4].

Будем описывать *темпоральный интервал* парой натуральных чисел (a,b) с условием $a < b$. Пусть $\boldsymbol{T}$ – множество всех темпоральных интервалов.

Определение 2. Т-*метаграф* определяется пятеркой

$$TMG = (V, H, E, \rho, \tau), \qquad (2)$$

где (V, H, E, ρ) – метаграф по определению 1 и τ: $V \to \mathbf{T}$ – частичная функция, назначающая темпоральные интервалы вершинам метаграфа. Вершины $v_i \in V$, для которых значения $\tau(v_i)$ не определены, считаются переменными, принимающими значения в множестве **T** всех интервалов.

Таблица 1. Элементарные отношения между интервалами

Отношение Аллена	***Название***	***Иллюстрация***
$X \; \boldsymbol{b} \; Y$	Before Раньше	|====X====| |===Y===| $X^+ < Y^-$
$X \; \boldsymbol{m} \; Y$	Meets Встречает	|====X====|===Y===| $X^+ = Y^-$
$X \; \boldsymbol{s} \; Y$	Starts Начинает	|====X====| |======Y=====| $X^- = Y^-,\ X^+ < Y^+$
$X \; \boldsymbol{f} \; Y$	Finishes Заканчивает	|====X====| |=====Y=====| $X^- < Y^-,\ X^+ = Y^+$
$X \; \boldsymbol{o} \; Y$	Overlaps Перекрывает	|===X===| |===Y===| $Y^- < X^-,\ X^- < Y^+,\ Y^+ < X^+$
$X \; d \; Y$	During в течение	|==X==| |=====Y=====| $Y^- < X^-,\ X^+ < Y^+$
$A \; e \; B$	Equals Равно	|====A====| |====B====| $X^- = Y^-,\ X^+ = Y^+$

Пример 2. Пусть MG – метаграф из примера 1. Положим $\tau(v_2) = (1, 4)$, $\tau(v_4) = (2, 7)$ и $\tau(v_6) = (5, 8)$. Тогда, добавляя к метаграфу функцию τ, получаем Т-метаграф. Вершины v_1, v_3 и v_5 в этом Т-метаграфе являются переменными.

Далее будем использовать следующие обозначения: $|X|$ – длина темпорального интервала X, а $\boldsymbol{b}$ и $\boldsymbol{o}$ – имена для элементарных темпоральных отношений: $X \; \boldsymbol{b} \; Y$ означает, что интервал X лежит раньше интервала Y, а $X \; \boldsymbol{o} \; Y$ – что интервал X перекрывает интервал Y.

Интервалы $\tau(v_2)$, $\tau(v_4)$ и $\tau(v_6)$ имеют соответствующие длины и находятся в следующих темпоральных отношениях:

- $|\tau(v_2)| = |(1, 4)| = 3$, $|\tau(v_4)| = |(2, 7)| = 5$, $|\tau(v_6)| = |(5, 8)| = 3$;

- $\tau(v_2)$ ***b*** $\tau(v_6)$, так как интервал (1, 4) расположен раньше (левее) интервала (5, 8));
- $\tau(v_2)$ ***o*** $\tau(v_4)$, поскольку интервал (1, 4) перекрывает интервал (2, 7).

По определению 2 Т-метаграф *TMG* содержит вершины, которые являются переменными (так как функция τ не является всюду определенной). Тогда *TMG* будет на самом деле *схемой*, из которой конкретные Т-метаграфы получаются путём присвоения всем его переменным конкретных значений.

Приложение, моделируемое с помощью Т-метаграфа, имеет семантику, которую можно определять при помощи ограничений на значения темпоральных переменных. Для формального выражения этих ограничений естественно использовать интервальные логики. Предположим, например, что в многоагентной системе один агент может совершать действия *a* и *b*, а другой агент – действие *c*. Пусть в Т-метаграфе эти действия представлены вершинами – переменными, с которыми ассоциированы темпоральные интервалы *A*, *B* и *C*. Предположим также, что для моделируемого приложения верно следующее суждение: «Если действие *a* совершается не ранее действия *b*, то существует момент, когда действия *a* и *c* происходят одновременно». Тогда в интервальной логике с алленовскими и пропозициональными связками это знание можно выразить формулой $\sim A \; \boldsymbol{b} \; B \rightarrow A \; \boldsymbol{o} \; C$.

В настоящей работе мы определим 2 интервальные логики **IL-1** и **IL-2** и покажем (на примерах), как знание в виде ограничений для Т-метаграфа может быть представлено в этих логиках. Мы также определим основанный на аналитических таблицах метод вывода в этих логиках.

3. ИНТЕРВАЛЬНЫЕ ЛОГИКИ

Интервальные логики **IL-1** и **IL-2** будут использованы для спецификации темпорально-логических ограничений в Т-метаграфах.

3.1. Логика IL-1

Предложения (формулы) логик **IL-1** и **IL-2** строятся на базе *сигнатуры*, которая есть конечное множество $\sum$ пропозициональных переменных и интервальных переменных – имён для темпоральных интервалов. Через **IL-1**($\sum$) и **IL-2**($\sum$) обозначим также множества всех предложений этих логик, записанных в сигнатуре $\sum$.

Выше в Табл.1 приведены отношения Аллена ***b***, ***m***, ***s***, ***f***, ***o***, ***d*** и ***e*** с указанием их смысла. Пусть

$$\Omega = \{\boldsymbol{b}, \boldsymbol{b^*}, \boldsymbol{m}, \boldsymbol{m^*}, \boldsymbol{s}, \boldsymbol{s^*}, \boldsymbol{f}, \boldsymbol{f^*}, \boldsymbol{o}, \boldsymbol{o^*}, \boldsymbol{d}, \boldsymbol{d^*}, \boldsymbol{e}\},$$

где * обозначает обращение бинарного отношения, т.е. $X\ \theta^* Y \Leftrightarrow Y\ \theta\ X$.

Атомарные предложения из **IL-1**(∑) –это выражения вида $X\ \theta\ Y$, $|X| \geq r$ и $X| \leq r$, где $\theta \in \Omega$, $X, Y \in \sum$ и r – натуральное число или арифметический терм с переменными, принимающими натуральные значения. Произвольные *предложения* (*формулы*) логики **IL-1**(∑) строятся индуктивно по следующим правилам:

- пропозициональные переменные принадлежат **IL-1**(∑);
- атомарные предложения принадлежат **IL-1**(∑);
- • предложения $\sim\varphi$, $(\varphi \wedge \psi)$, $(\varphi \vee \psi)$ и $(\varphi \rightarrow \psi)$ принадлежат **IL-1**(∑), если φ и ψ принадлежат **IL-1**(∑).

Эти три правила составляют *синтаксис* логики **IL-1**(∑). Её *семантика* задается при помощи интерпретаций. *Интерпретация сигнатуры* – это произвольная функция "•": $\sum \rightarrow \{0,1\} \cup \mathbf{T}$ такая, что "p" $\in \{0,1\}$ для каждой пропозициональной переменной $p \in \sum$ и "X"$\in$**T** для каждого имени интервала $X \in$ T. *Интерпретация атомарных предложений* получается путем продолжения функции "•" на произвольные предложения по правилам:

- "$X\ \theta\ Y$" = 1 ⇔ "X" θ "Y";
- "$| X | \geq r$" = 1 ⇔ |"X"$| \geq r \Leftrightarrow b - a \geq r$, если "X" = (a, b);
- "$| X | \leq r$" = 1 ⇔ |"X"$| \leq r \Leftrightarrow b - a \leq r$, если "X" = (a, b);
- "$| X | = r$" = 1 ⇔ "$| X | \geq r$" = 1 и "$| X | \leq r$" = 1.

Наконец, продолжая функцию "•" по правилам

"$\sim \varphi$"= 1 ⇔ "φ"= 0, "$(\varphi \wedge \psi)$" = 1 ⇔ "φ" = 1 и "ψ" = 1,

"$(\varphi \vee \psi)$" = 1 ⇔ "φ" = 1 или "ψ" = 1,

"$(\varphi \rightarrow \psi)$" = 1 ⇔ "$\varphi$" = 1 или "$\psi$" = 1,

получим *интерпретацию* произвольных формул из **IL-1**(∑).

Как и всякая логика, **IL-1** индуцирует отношение '|=' логического следования, которое определяется обычным образом. Пусть $\boldsymbol{E}$ – произвольное множество формул из **IL-1** и ψ – какая-либо формула из **IL-1**. Тогда ψ *логически следует* из $\boldsymbol{E}$ в том и только том случае, если не существует интерпретации, при которой все формулы из $\boldsymbol{E}$ истинны, но формула ψ ложна:

$\boldsymbol{E} \models \psi$ ⇔ не существует интерпретации "•" такой,

что "ψ" = 0 и "φ" = 1 для всякой формулы $\varphi \in \boldsymbol{E}$.

С понятием логического следствия тесно связано понятие логической невыполнимости. Множество $\boldsymbol{E}$ формул логики называется *невыполнимым*, если не существует интерпретации, при которой все формулы из $\boldsymbol{E}$ истинны. Легко видеть, что (если логика содержит отрицание), то $\boldsymbol{E} \models \varphi$ тогда и только тогда, когда множество $\boldsymbol{E} \cup \{\sim\varphi\}$ невыполнимо.

Для распознавания невыполнимости мы будем применять алгоритм, основанный на методе аналитических таблиц [7]. Этот алгоритм строит дерево, вершинами которого являются означенные формулы и неравенства. Означенные формулы имеют при интерпретации "•" следующие значения: "+ φ" = "φ" и : "– φ" = "~ φ".

Пример 3. Пусть в некотором Т-метаграфе три вершины (скажем, v_1, v_2 и v_3) имеют интервалы A, B и C, для которых указаны следующие ограничения

$$p \wedge A \; \boldsymbol{s} \; C, \; \sim p \rightarrow (B \; \boldsymbol{d} \; C) \wedge (A \; \boldsymbol{b} \; B), \; |A| \geq a, \; |B| \geq b, \qquad (3)$$

где предполагается, что $a \geq 1$, $b \geq 1$. Докажем, что из этих ограничений следует ограничение $|C| \geq a+b+2$, т.е. $\boldsymbol{O} \models |C| \geq a+b+2$, где $\boldsymbol{O}$ – «онтология», составленная из формул (3) (здесь термин «онтология» означает конечное множество предложений, интерпретируемых как ограничения). Для этого, применяя правила вывода из Табл.2 и Табл.3, мы построили дерево (рис.2).

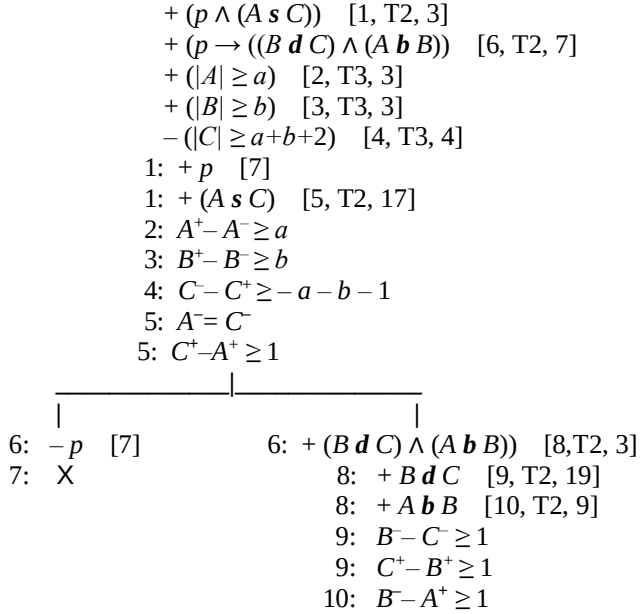


Рис.2. Дерево вывода для доказательства логического следствия из Примера 3

Построение дерева начиналось с ветви, содержащей снабжённые знаком плюс формулы онтологии $\boldsymbol{O}$, а также означенную формулу $-(|C| \geq a+b+2)$.

Таблица 2. Правила вывода для предложений с алленовскими отношениями и для неравенств

Номер	Антецедент	Консеквенты
1	$+ \sim \varphi$	$- \varphi$
2	$- \sim \varphi$	$+ \varphi$
3	$+ (\varphi \wedge \psi)$	$+ \varphi,\ +\psi$
4	$- (\varphi \wedge \psi)$	$- \varphi \mid - \psi$
5	$+ (\varphi \vee \psi)$	$+ \varphi \mid + \psi$
6	$- (\varphi \vee \psi)$	$- \varphi, - \psi$
7	$+ (\varphi \rightarrow \psi)$	$- \varphi \mid + \psi$
8	$- (\varphi \rightarrow \psi)$	$+ \varphi,\ - \psi$
9	$+ (X \boldsymbol{b} Y)$	$Y^- - X^+ \geq 1$
10	$- (X \boldsymbol{b} Y)$	$X^+ - Y^- \geq 0$
11	$+ (X \boldsymbol{m} Y)$	$X^+ = Y^-$
12	$- (X \boldsymbol{m} Y)$	$X^+ - Y^- \geq 1 \mid Y^- - X^+ \geq 1$
13	$+ (X \boldsymbol{o} Y)$	$Y^- - X^- \geq 1,\ X^+ - Y^- \geq 1,\ Y^+ - X^+ \geq 1$
14	$- (X \boldsymbol{o} Y)$	$X^- - Y^- \geq 0 \mid Y^- - X^+ \geq 0 \mid X^+ - Y^+ \geq 0$
15	$+ (X \boldsymbol{f} Y)$	$X^- - Y^- \geq 1,\ X^+ = Y^+$
16	$- (X \boldsymbol{f} Y)$	$Y^- - X^- \geq 0 \mid X^+ - Y^+ \geq 1 \mid Y^+ - X^+ \geq 1$
17	$+ (X \boldsymbol{s} Y)$	$X^- = Y^-,\ Y^+ - X^+ \geq 1$
18	$- (X \boldsymbol{s} Y)$	$X^- - Y^- \geq 1 \mid Y^+ - X^+ \geq 1 \mid\ X^+ - Y^+ \geq 0$
19	$+ (X \boldsymbol{d} Y)$	$X^- - Y^- \geq 1,\ Y^+ - X^+ \geq 1$
20	$- (X \boldsymbol{d} Y)$	$Y^- - X^- \geq 0 \mid X^+ - Y^+ \geq 0$
21	$+ (X \boldsymbol{e} Y)$	$X^- = Y^-,\ X^+ = Y^+$
22	$- (X \boldsymbol{e} Y)$	$Y^- - X^- \geq 1 \mid Y^- - X^- \geq 1 \mid Y^+ - X^+ \geq 1 \mid\ Y^+ - X^+ \geq 1$
23	$+ (X\ \theta^* Y)$	$+ (Y\ \theta\ X)$
24	$- (X\ \theta^* Y)$	$- (Y\ \theta\ X)$
25	$+ X - Y \geq a$	$X - Y \geq a$
26	$- X - Y \geq a$	$Y - X \geq 1 - a$
27	$+ X - Y \leq a$	$X - Y \geq - a$
28	$- X - Y \leq a$	$Y - X \geq 1 + a$

Ясно, что указанное логическое следствие справедливо тогда и только тогда, когда невыполнимо множество формул, принадлежащих начальной ветви.

На первом шаге вывода к формуле + ($p \wedge (A \; \boldsymbol{s} \; C)$) было применено правило номер 3 из таблицы 3. Тот факт, что это применение совершалось на шаге 1 по правилу 3 из таблицы 2, показан при помощи метки '[1, T2, 3]', стоящей справа от этой формулы. Результатом этого применения стали формулы + p и + ($A \; \boldsymbol{s} \; C$), которые с левой меткой '1:' были добавлены одна за другой к начальной ветви (эта метка указывает, что формулы были присоединены на шаге 1)

На шаге 6 к формуле + ($p \rightarrow (A \; \boldsymbol{b} \; C) \wedge (A \; \boldsymbol{b} \; B)$) было применено правило 7 из таблицы 2. Это правило дизъюнктивно в том смысле, что оно даёт альтернативу из двух формул – p и + (($A \; \boldsymbol{d} \; C$) $\wedge$ ($A \; \boldsymbol{b} \; B$)). Результатом применения правила является присоединение «вилки» из этих двух формул.

Таблица 3. Правила вывода для предложений с метрическими ограничениями

Номер	Антецедент	Консеквенты
1	$+ (\|X\| \le a)$	$X^- - X^+ \ge -a$
2	$- (\|X\| \le a)$	$X^+ - X^- \ge 1+a$
3	$+ (\|X\| \ge a)$	$X^+ - X^- \ge a$
4	$- (\|X\| \ge a)$	$X^- - X^+ \ge 1-a$
5	$+ (\|X\| = a)$	$X^+ - X^- \ge a, \; X^- - X^+ \ge -a$
8	$- (\|X\| = a)$	$X^- - X^+ \ge 1-a \; \mid A^+ - A^+ \ge 1+a$
9	$+ X \; \theta(\sigma) \; Y$	$+ X \; \theta \; Y, \; + \theta \bullet \sigma \; / \; A, B$
10	$- A \; \theta(\tau) \; Y$	$- A \; \theta \; B \; \mid - \theta \bullet \sigma$
11	$+ \lambda;\sigma$	$+ \lambda, + \sigma$
12	$- \lambda;\sigma$	$- \lambda \; \mid - \sigma$

В общем случае, если рассмотреть применение конъюнктивного (или дизъюнктивного) правила к формуле φ, составленной из нескольких подформул φ_i, то результатом его применения является присоединение к каждой проходящей через φ ветви формул φ_i, записанных одна за другой (или «вилки» из формул φ_i).

На шаге 6 образовались две ветви. Мы видим, что первая (левая) ветвь содержит контрарную пару($+p$,$-p$), что означает невыполнимость

множества формул этой ветви. Вторая (правая) ветвь также является невыполнимой. Для доказательства выпишем из этой ветви все неравенства вида $X–Y \geq r$, добавив к этому списку неравенства $A^– – C^– \geq 0$ и $C^– – A^– \geq 0$ (которые заменяют равенство $A^– = C^–$), а также неравенства $A^+ – A^– \geq 1$, $B^+ – B^– \geq 1$, $C^+ – C^– \geq$ (которые справедливы по определению):

$$\mathbf{B} = \{A^+ – A^– \geq a,\ B^+ – B^– \geq b,\ C^– – C^+ \geq – a – b – 1,\ C^+ – A^+ \geq 1,$$
$$B^– – C^– \geq 1,\ C^+ – B^+ \geq 1,\ B^– – A^+ \geq 1,\ A^– – C^– \geq 0,$$
$$C^– – A^– \geq 0,\ A^+ – A^– \geq 1,\ B^+ – B^– \geq 1,\ C^+ – C^– \geq 1\}.$$

Этот список интерпретируется как конъюнкция, следовательно из него можно исключить неравенства $A^+ – A^– \geq 1$, $B^+ – B^– \geq 1$, поскольку (учитывая, что $a \geq 1$ и $b \geq 1$) неравенство $A^+ – A^– \geq a$ поглощает неравенство $A^+ – A^– \geq 1$, а $B^+ – B^– \geq a$ поглощает $B^+ – B^– \geq 1$.

Затем построим следующий ориентированный граф $\Gamma(\mathbf{B})$ с помеченными дугами (рис.3). Его вершинами служат A^+, $A^–$, B^+, $B^–$, $C^–$, C^+, а помеченными дугами – тройки (X, r, Y) такие, что неравенство $X – Y \geq r$ входит в множество $\mathbf{B}$. Входящему в $\mathbf{B}$ равенству $A^– = C^–$ соответствует ребро, соединяющее $A^–$ и $C^–$. Заметим, что ребро как неупорядоченная пара $[A^–, C^–]$ соответствует двум противоположно направленным дугам как тройкам $(A^–, 0, C^–)$ и $(C^–, 0, A^–)$.

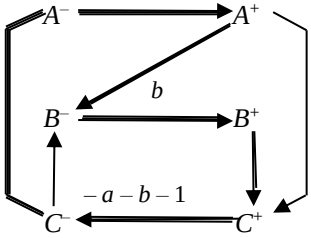


Рис.3. Граф $\Gamma(\mathbf{B})$ для множества неравенств из Примера 3

Граф $\Gamma(\mathbf{B})$ имеет цикл, показанный на рис.3 жирными линиями

$$A^+ (b)\ B^– (1)\ B^+ (1)\ C^+ (– a – b – 1)\ C^– (0)\ A^– (a)\ A^+. \qquad (4)$$

Длина этого цикла равна 1, так как $b + 1 + 1 + (– a – b – 1) + a = 1$.

Циклу (4) отвечает последовательность неравенств

$$B^– – A^+ \geq 1,\ B^+ – B^– \geq b,\ C^+ – B^+ \geq 1,\ C^– – C^+ \geq – a – b – 1,\ A^– – C^– \geq 0,$$

складывая которые, получим

$$(B^– – A^+) + (B^+ – B^–) + (C^+ – B^+) + (C^– – C^+) + (A^– – C^–) \geq$$
$$b + 1 + 1 + (– a – b – 1) + a.$$

Видно, что левая часть этого неравенства равна 0, а правая равна 1. Таким образом, имеем противоречие $0 \geq 1$. Следовательно,

множество **B** неравенств, лежащих на второй ветви дерева вывода, невыполнимо.

Рассмотрим общую ситуацию, когда дано произвольное (конечное) множество ***E*** означенных формул, и мы должны выяснить, является ли множество ***E*** невыполнимым.

Для этого по множеству ***E*** строим дерево Tr(***E***), применяя правила из Табл.2 и Табл.3. (Заметим, что правила 9–12 из Табл.3 в логике **IL-1** не используются.) Пусть Br_1, Br_2,…,Br_m – все ветви дерева Tr(*E*). Из каждой ветви Br_i дерева Tr(***E***) выпишем все неравенства вида $X - Y \geq r$. Пусть $\mathbf{B}_i$ – множество, полученное из списка этих неравенств удалением тех из них, которые поглощаются другми неравенствами, входяшими в список. Ветвь Br_i называется *замкнутой*, если множество $\mathbf{B}_i$ невыполнимо. Дерево Tr(*E*) называется *замкнутым,* если все её ветви замкнуты.

В дальнейшем состоящее из правил таблицы 2 и 3 (исключая правила 9 – 12) множество $\mathbf{S}_1$ будем называть *системой правил вывода для логики* **IL-1**. Справедлива следующая теорема.

Теорема 1. Система $\mathbf{S_1}$ правил вывода для логики **IL-1** является состоятельной и полной. Это означает, что

- все правила из $\mathbf{S_1}$ состоятельны;
- множество *E* означенных формул логики **IL-1** невыполнимо тогда и только тогда, когда дерево Tr(***E***) замкнуто.

Состоятельным называют правило вывода, сохраняющую истинность, т.е. в любой интерпретации, если истинны антецеденты, то также истинны и консеквенты.

Теорема 1 доказывается по стандартной схеме с привлечением понятия *хинтикковских множеств.*

С другой стороны, легко доказать, что все правила вывода из таблицы 2 и 3 состоятельны. Правило вывода называется *состоятельным*, если при любой интерпретации консеквенты правила истинны, когда истинны его антецеденты.

Имеется простой и быстрый алгоритм для выяснения невыполнимости (несовместности) множества **B** неравенств вида $X - Y \geq r$, идея которого изложена выше в Примере 3. По множеству **B** строим ориентированный граф Г(**B**). В этом графе ищем положительный цикл, т.е. цикл, длина которого есть положительное число. Если такого цикла нет, то множество невыполнимо, в противном случае оно выполнимо (совместно).

Итак, алгоритм, выясняющий невыполнимость множества *E* формул логики **IL-1**, имеет следующие этапы:

1. Применяя к множеству E правила вывода системы $\mathbf{S_1}$, строим дерево вывода Tr(E).
2. Составляем список {Br_1, Br_2,…, Br_m} из тех ветвей дерева Tr(E), которые не заканчиваются символом ‘X’.
3. Из каждой ветви Br_i выписываем все неравенства вида $X – Y \geq r$. Пусть $\mathbf{B}_i$ полученное множество неравенств.
4. По множеству $\mathbf{B}_i$ строим граф Г($\mathbf{B}_i$).
5. Применяем к каждому графу Г($\mathbf{B}_i$) алгоритм поиска положительного цикла.
6. Выдается сообщение ДА, если все графы Г($\mathbf{B}_i$) содержат положительные циклы; в противном случае выдается сообщение НЕТ.

3.2. Логика IL-2

Логика **IL-2** расширяет логику **IL-1** путем включения в алленовские отношения длительностей интервалов. Рассмотрим показанное в Табл.3 (слева и сверху) отношение $\boldsymbol{b}$ с интервалами $I = X^+ – X^-$, $J = Y^- – X^-$, $K = Y^+ – X^+$, $L = Y^- – X^-$, $M = Y^+ – X^+$, $N = Y^+ – X^-$. Используя эти интервалы, можно ввести такие темпоральные отношения, как:

$\boldsymbol{b}(I = 2)$, $\boldsymbol{b}(2 \leq I \leq 5; J \geq 3)$, $\boldsymbol{b}(K \neq 4)$,

интерпретируемые следующим образом:

“X $\boldsymbol{b}(I = 2)$ Y” = 1 ⇔ “X” $\boldsymbol{b}$ “Y” ∧ $(X^+ – X^- = 2)$,

“ X $\boldsymbol{b}(2 \leq I \leq 5; J \geq 3)$ Y” = 1 ⇔ “X” $\boldsymbol{b}$ “Y” ∧ $(X^+ – X^- \geq 2)$ ∧
$(X^+ – X^- \leq 5)$ ∧ $(Y^- – X^- \geq 3)$,

“ X $\boldsymbol{b}(K \neq 4)$ Y” = 1 ⇔ “X” $\boldsymbol{b}$ “Y” ∧ $[(Y^+ – X^+ < 4) \vee (Y^+ – X^+ > 4)]$.

Содержащуюся в Табл.4 информацию о связях интервалов I, J, K, L, M и N с алленовскими отношениями можно отобразить с помощью операции ‘•’, записанной в Табл.5.

В логике **IL-2** используется система правил вывода $\mathbf{S_2}$, содержпщая дополнительно к правилам системы $\mathbf{S_2}$ правила 23–28 из Табл.2 и правила из Табл.5.

В логике **IL-2** , так же, как и в логике **IL-1**, **м**ожно решать типичные задачи для Т-метаграфов:

А. Пусть $\boldsymbol{O}$ – онтология (см. выше), представляющая знание о моделируемом приложении с помощью логики **IL-2**. Выяснить, является ли онотология $\boldsymbol{O}$ невыполнимой;

Б. Пусть φ – предложение в логике **IL-2**. Выяснить, следует ли оно из онтологии $\boldsymbol{O}$;

В. Пусть χ – запрос к онтологии $\boldsymbol{O}$. Вычислить ответ на запрос χ, обращенный к онтологии $\boldsymbol{O}$.

Таблица 4. Интервалы для алленовских отношений

X ***b*** *Y* $X^- ===== X^+$ $Y^- ======Y^+$ |------*I*-----|----*J*----|---- *K* -----| $I = X^+ – X^-$, $J = Y^- – X^-$, $K = Y^+ – X^+$, $L = Y^- – X^-$, $M = Y^+ – X^+$, $N = Y^+ – X^-$	*X* ***m*** *Y* $X^- =======X^+$ $Y^- ======Y^+$ |------*I*------|---- *K* -----| $I = X^+ – X^-$, $J = 0$, $K = Y^+ – X^+$, $N = Y^+ – X^-$
X ***d*** *Y* $X^- ==== X^+$ $Y^- ==========Y^+$ |-----*I*----|----*J*----|----*K* ----| $I = X^- – Y^-$, $J = X^+ – X^-$, $K = Y^+ – X^+$, $L = X^+ – Y^-$, $M = Y^+ – X^-$, $N = Y^+ – X^+$	*X* ***s*** *Y* $X^- =====X^+$ $Y^- ==========Y^+$ |------*I*----|----*K*-----| $I = X^+ – X^-$, $J = 0$, $K = Y^+ – X^+$, $N = Y^+ – X^-$
X ***o*** *F* $X^- ==========X^+$ $Y^- ==========Y^+$ |-----*I*-----|-----*J*----|----*K* ---| $I = Y^- – X^-$, $J = X^+ – Y^-$, $K = Y^+ – X^+$, $L = X^+ – X^-$, $M = Y^+ – X^+$, $N = Y^+ – X^-$	*X* ***f*** *F* $X^- ======X^+$ $Y^- ==========Y^+$ |-----*I*-----|-----*J*-------| $I = X^- – Y^-$, $J = Y^+ – X^-$, $K = 0$, $N = F^+ – F^-$

Таблица 5. «Таблица умножения» для операции '•'

	I	*J*	*K*	*L*	*M*	*N*
B	$X^+ – X^-$	$Y^- – X^+$	$Y^+ – X^+$	$Y^- – X^-$	$Y^+ – X$	$Y^+ – X^+$
M	$X^+ – X^-$	0	$Y^+ – X^+$	0	0	$Y^+ – X^-$
S	$X^+ – Y^-$	$X^+ – X^-$	$Y^+ – X^+$	$X^+ – Y^-$	$Y^+ – X^-$	$Y^+ – X^+$
F	0	$X^+ – X^-$	$Y^+ – X^+$	0	0	$Y^+ – Y^-$
O	$Y^- – X^-$	$X^+ – E^-$	$Y^+ – X^-$	$X^+ – X^-$	$Y^+ – X^+$	$Y^+ – X^-$
D	$X^- – Y^-$	$X^+ – X^-$	$Y^+ – X^+$	$X^+ – Y^-$	$Y^+ – X^-$	$Y^+ – X^+$
E	$X^+ – X^-$	0	0	0	0	0

Рассмотрим пример решения задачи B.

Пример 4. Пусть в некотором T-метаграфе имеются вершины для действий *a*, *b*, *c* с временными интервалами *A*, *B*, *C*. Пусть длины этих интервалов есть соответственно 4, 6 и 5. Пусть также имеются условия *p* и *q*, для которых справедливы следующие утверждения:

(1) если верно условие *p*, то действие *a* выполняется во время выполнения действия *b*, причем *a* заканчивается за 2-3 единицы времени до окончания *b*;

(2) если верно условие *q*, то работа *c* заканчивается вместе с действием *b*.

Рассмотрим вопрос: «Перекрывается ли по времени действие a с действием c в предположении, что оба условия p и q выполнены? Если ДА, то указать наилучшую оценку для времени перекрытия».

Знание (1) и (2) в языке **MAL** можно записать в виде онтологии

$\boldsymbol{O} = \{|A| = 4,\ |B| = 6,\ 4\ |C| = 5,\ p \rightarrow A\ \boldsymbol{d}(2 \le K \le 3)\ B,\ q \rightarrow C\ \boldsymbol{f}\ B\}$.

Вышеуказанный вопрос можно формально представить следующим запросом к онтологии $\boldsymbol{O}$:

? (max x, min y): $p \wedge q \rightarrow A\ \boldsymbol{o}(x \le J \le y)\ C$.

Ответом на этот запрос служат наибольшее значение x и наименьшее значение y, такие, что из онтологии $\boldsymbol{O}_2$ логически следует $p \wedge q \rightarrow A\ \boldsymbol{o}(x \le J \le y)\ C$.

На рис.4 показано дерево вывода для множества

$+\ \boldsymbol{O}_2 \cup \{-\ p \wedge q \rightarrow A\ \boldsymbol{o}(x \le J \le y)\ C\ \}$.

Это дерево имеет 7 ветвей, первые две из которых замкнуты благодаря тому, что содержат контрарные пары $(+\ p, -\ p)$ и $(+\ q, -\ q)$. Выпишем из остальных ветвей все неравенства и равенства:

$\mathbf{B}_3 = \{A^+ - A^- \ge 4,\ A^- - A^+ \ge -4,\ B^+ - B^- \ge 8,\ B^- - B^+ \ge -8,$
$C^+ - C^- \ge 5,\ C^- - C^+ \ge -5,\ A^- - B^- \ge 1,\ B^+ - A^+ \ge 1,\ B^+ - A^+ \ge 2,$
$A^+ - B^+ \ge -3,\ C^- - B^- \ge 1,\ C^+ = B^+,\ A^- - C^- \ge 0\}$;

$\mathbf{B}_4 = \{A^+ - A^- \ge 4,\ A^- - A^+ \ge -4,\ B^+ - B^- \ge 8,\ B^- - B^+ \ge -8,\ C^+ - C^- \ge 5,$
$C^- - C^+ \ge -5,\ A^- - B^- \ge 1,\ B^+ - A^+ \ge 1,\ B^+ - A^+ \ge 2,$
$A^+ - B^+ \ge -3,\ C^- - B^- \ge 1,\ C^+ = B^+,\ C^- - A^+ \ge 0\}$;

$\mathbf{B}_5 = \{A^+ - A^- \ge 4,\ A^- - A^+ \ge -4,\ B^+ - B^- \ge 8,\ B^- - B^+ \ge -8,\ C^+ - C^- \ge 5,$
$C^- - C^+ \ge -5,\ A^- - B^- \ge 1,\ B^+ - A^+ \ge 1,\ B^+ - A^+ \ge 2,$
$A^+ - B^+ \ge -3,\ C^- - B^- \ge 1,\ C^+ = B^+,\ A^+ - C^+ \ge 0\}$;

$\mathbf{B}_6 = \{A^+ - A^- \ge 4,\ A^- - A^+ \ge -4,\ B^+ - B^- \ge 8,\ B^- - B^+ \ge -8,\ C^+ - C^- \ge 5,$
$C^- - C^+ \ge -5,\ A^- - B^- \ge 1,\ B^+ - A^+ \ge 1,\ B^+ - A^+ \ge 2,$
$A^+ - B^+ \ge -3,\ C^- - B^- \ge 1,\ C^+ = B^+,\ A^- - A^+ \ge 1 - x\}$;

$+\ |A| = 4$ [1]
$+\ |B| = 6$ [2]
$+\ |C| = 5$ [3]
$+\ p \rightarrow A\ \boldsymbol{d}(2 \le K \le 3)\ B$ [6]
$+\ q \rightarrow C\ \boldsymbol{f}\ B$ [11]
$-\ p \wedge q \rightarrow A\ \boldsymbol{o}(x \le J \le y)\ C$ [4]

$\mathbf{B}_7 = \{A^+ - A^- \ge 4,\ A^- - A^+ \ge -4,\ B^+ - B^- \ge 8,\ B^- - B^+ \ge -8,$ 3:
$C^+ - C^- \ge 5,\ C^- - C^+ \ge -5,\ A^- - B^- \ge 1,\ B^+ - A^+ \ge 1,$
$B^+ - A^+ \ge 2,\ A^+ - B^+ \ge -3,\ C^- - B^- \ge 1,\ C^+ = B^+,$
$A^+ - A^- \ge 1 + y$.

1: $A^+ - A^- \ge 4$
1: $A^- - A^+ \ge -4$

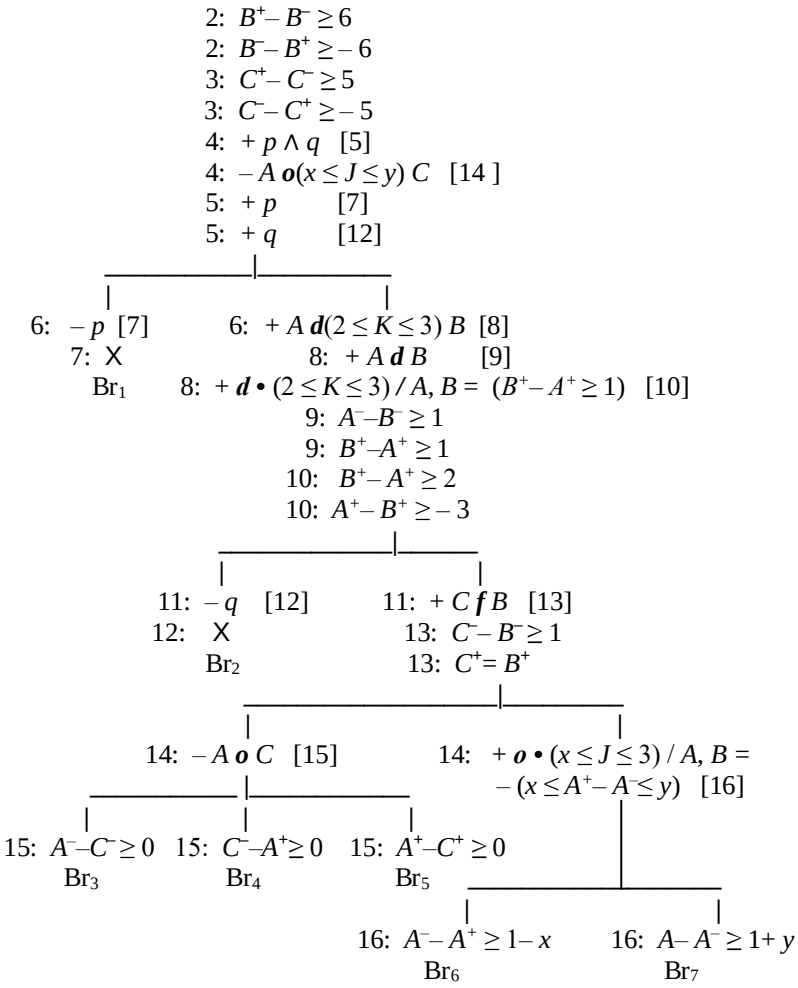


Рис.4. Дерево вывода для онтологии и запроса из Примера 4

Если построить графы $\Gamma(\mathbf{B}_3)$, $\Gamma(\mathbf{B}_4)$ и $\Gamma(\mathbf{B}_5)$, то можно обнаружить в них положительные циклы:

$C_3 = A^+ (2) \; B^+ (-6) \; B^- (1) \; A^- (4) \; A^+$, длина $C_3 = 2+(-6)+1+4 = 1$;

$C_4 = A^+ (0) \; C^- (5) \; C^+ (0) \; B^+ (-3) \; A^+$, длина $C_4 = 0+5+0+(-3) = 2$;

$C_5 = A^+ (2) \; B^+ (0) \; C^+ (0) \; A^+$, длина $C_5 = 2+0+0 = 2$.

Поэтому ветви Br_3, Br_4 и Br_5 замкнуты. Но ветви Br_6 и Br_7 могут быть замкнутыми только для определенных значений переменных x и y.

Чтобы найти эти значения, построим графы Г($\mathbf{B}_6$) и Г($\mathbf{B}_7$) (рис.5). Мы видим, что в этих графах имеются следующие содержащие $1-x$ и $1+y$ циклы:

$$C_1 = A^+(1-x)\,A^-(5)\,A^+(0)\,B^+(-3)\,A^+ \text{ и}$$
$$C_2 = A^+(2)\,B^+(0)\,A^+(-5)\,A^-(1+y)\,A^+,$$

которые соответственно имеют длины $1-x+5+0+(-3)=3-x$ и $2+(-5)+(1+y)=y-2$. Цикл C_1 положителен тогда и только тогда, когда $3-x \geq 1$, т.е. когда $x \leq 2$; цикл C_2 положителен тогда и только тогда, когда $y-2 \geq 1$, т.е. когда $y \geq 3$. Отсюда получаем, что ответом на запрос служит предложение $p \wedge q \rightarrow A\,\boldsymbol{o}(2 \leq J \leq 3)\,C$.

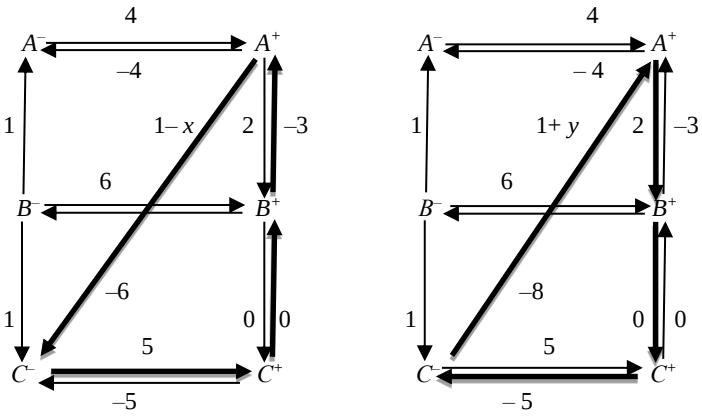


Рис.5. Графы Г($\mathbf{B}_6$) и Г($\mathbf{B}_7$) из Примера 4

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе введено определение темпорального метаграфа. Поскольку функция τ, сопоставляющая его вершинам временные интервалы, является частичной, этот метаграф содержит переменные вершины. Определённый таким образом общий Т-метаграф является схемой, из которой получаются конкретные Т-метаграфы. Для формального выражения ограничений на значения темпоральных переменных построены интервальные логики **IL-1** и **IL-2.** Показано на примерах, как знание в виде ограничений для Т-метаграфа можно представить в этих логиках. Предложен основанный на аналитических таблицах метод дедукции для интервальных онтологий. Приведена теорема о состоятельности и полноте системы правил вывода для логики ограничений в Т-метаграфах.

Литература

1. Астанин С.В., Драгныш Н.В., Жуковский Н.К. Вложенные метаграфы как модели сложных объектов// Инженерный вестник Дона. Электронный журнал. – 2012. – Т.23, №4.
2. Берж К. Теория графов и её применения: Пер. с фр. – М.: ИИЛ, 1962.
3. Берштейн Л.С., Боженюк А.В. Использование темпоральных графов как моделей сложных систем // Известия ЮФУ: Технические науки. – 2010. – №4 (105). – С.198-203.
4. Плесневич Г.С., Нгуен Тхи Минь Ву. Алгоритмы дедукции для некоторых расширений интервальной логики Аллена// Искусственный интеллект и принятие решений. – 2016. – №1. – С.75-88.
5. Самохвалов Э.Н., Ревунков Г.И.,Гапанюк Ю.Е. Использование метаграфов для описания семантики и прагматики информационных систем// Вестник МГТУ им. Н.Э.Баумана. Сер. «Приборостроение». – 2015. –№1. – С.83-99.
6. Тарасов В.Б. Нечёткие порождающие множества: единый подход к построению нечётких графов и метаграфов// Нечёткие системы, мягкие вычисления и интеллектуальные технологии. Труды VIII-й Всероссийской научно-практической конференции (НСМВИТ-2020, Смоленск, 29-30 июня 2020г.). – Смоленск: Универсум, 2020. – Том 1. – С.30-42.
7. Agostino M., Gabbay D., Hahnle R., Possega J. Handbook of Tableaux Methods. – Berlin: Springer, 2009.
8 Allen J. Maintaining Knowledge about Temporal Intervals// Communications of the ACM. –1983. – Vol.26, №11. – P.832-843.
9. Anbalagan T, Maheswari S.U. Classifcation and Prediction of Stock Market Index Based on Fuzzy Metagraph// Procedia Computer Science. – 2014. – 47(C). – P.214-222.
10. Ata S.K., Fang Yu., Wu M, Li X.-L., Xiao X. Disease Gene Classification with Metagraph Representations// Methods. – 2017. –Vol.131. – P.83-92
11. Basu A., Blanning R.W. Enterprise Modeling Using Metagraphs// Decision Support Systems: Experiences and Expectations/ Ed. by T.Jelassi, M.R.Klien, W. M. Mayon-White. – Amsterdam: North-Holland, 1992. – P.183-199.
12. Basu A., Blanning, R.W. Metagraphs and Petri Nets in Model Management// Proceedings of the Second Annual Workshop on Information Technologies and Systems (WITS-92)/ Ed.by V.C. Storey and A.B. Whinston. Dallas, 1992. – P.64-73.
13. Basu A., Blanning R.W. Metagraphs: A Tool for Modeling Decision Support Systems// Management Science. – 1994. – Vol.40. – P.1579-1600.
14. Basu A., Blanning, R.W. Metagraphs and Their Applications. Integrated Series in Information Systems. – Berlin: Springer-Verlag, 2007.
15. Fang Y., Lin W., Zheng V.W., Wu M., Chang K., Li X.-L. Semantic Proximity Search on Graphs with Metagraph-Based Learning// Proceedings of 2016 IEEE 32nd International Conference on Data Engineering (ICDE-2016, Helsinki, Finland, May 16-20, 2016). – Helsinki: IEEE, 2016. – P.277-288.
16. Fang Y., Lin W., Zheng V.W., Wu M., Shi J., Chang K., Li X.-L. Metagraph-Based Learning on Heterogeneous Graphs. IEEE TKDE, (2019), pp. 201-215.

17. Kostakos V. Temporal Graphs // Proc. of Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. – 2008. – Vol.388, Issue 6. – P.1007-1023.
18. Mukherjee A., Sen A.K., Bagchi A. The Representation, Analysis and Verification of Business Processes: a Metagraph-Based Approach// Information Technology and Management. – 2007. – Vol.8, №1. – P.65-81.
19. Sun Y, Han J., Yan X., Yu P.S. Wu, T. PathSim: Metapath-Based Top-k Similarity Search in Heterogeneous Information Networks// Proceedings of International Conference on Very Large Data Bases (VLDB Endowment-2011, The Westin, Seattle, USA, August 29-September 3). – 2011. – Vol.4, №11, P.992-1003.
20. Tarassov V.B., Gapanyuk Yu.E. Complex Graphs in the Modeling of Multi-Agent Systems: From Goal-Resource Networks to Fuzzy Metagraphs// Lecture Notes in Artificial Intelligence. Vol.12412.–Berlin: Springer, 2020.–P.177-198.
21. Zhao H., Yao Q., Li J., Song Y., Lee D.L. Metagraph Based Recommendation Fusion over Heterogeneous Information Networks// Proceedings of the 23rd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (KDD'17, Halifax, Canada, August 13-17, 2017). – New York: Association for Computing Machinery, August 2017. – P.635-644.

УДК 004.8

МЕТОД ВЫВОДА И ОБУЧЕНИЕ НЕЙРО-НЕЧЕТКОЙ СИСТЕМЫ С НЕЧЕТКИМИ ВХОДАМИ НА ГРАФИЧЕСКОМ ПРОЦЕССОРЕ*

***Синюк В.Г.**, к.т.н.*
e-mail: vgsinuk@mail.ru
Панченко М.В.
e-mail: panchenko.maks@gmail.com
БГТУ им. В.Г. Шухова

1. ВВЕДЕНИЕ

Рассматриваются нечеткие модели типа Мамдани [1] со многими нечеткими входами. Метод вывода при их применении в общем случае сводится к экспоненциальной вычислительной сложности. Предлагаемый вывод в рамках представленных моделей выполняется на основе нечеткого значения истинности и меры возможности. В качестве алгоритма настройки представлена эволюционная стратегия (μ, λ) [2]. Представлена реализация данного алгоритма на графическом процессоре. Адекватность разработанных методов и алгоритмов доказана при проведении вычислительных экспериментов.

В первом разделе представлена постановка задачи и оценка сложности нечеткого вывода. Во втором разделе рассмотрен вывод выходного значения для базы правил на основе теоремы о декомпозиции многомерной функции принадлежности. Третий раздел посвящен настройке и разработке алгоритма машинного обучения. В четвертом разделе приведена реализация алгоритма обучения нейро-нечеткой системы с применением параллельных технологий и описан модельный вычислительный эксперимент.

2. ЛИНГВИСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Лингвистическая модель представляет собой базу нечётких правил $R_k, k = \overline{1,N}$ вида:

$$R_k\text{: Если } x_1 \text{ есть } A_{1k} \text{ И } x_2 \text{ есть } A_{2k} \text{ И } \dots \text{ И } x_n \text{ есть } A_{nk},$$
$$\text{то } y \text{ есть } B_k \text{ (с весом } w_k\text{)}, \qquad (2.1)$$

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект №20-07-00030 А

где N – количество нечётких правил, $A_{ik} \subseteq X_i$, $i = \overline{1,n}$, $B_k \subseteq Y$– нечёткие множества, которые характеризуются функциями принадлежности $\mu_{A_{ik}}(x_i)$ и $\mu_{B_k}(y)$ соответственно. $x_1, x_2, \dots, x_n$– входные переменные лингвистической модели, причём $[x_1, x_2, \dots, x_n]^T = \boldsymbol{x} \in X_1 \times X_2 \dots \times X_n$. Символами X_i, $i = \overline{1,N}$ и Y обозначаются соответственно пространства входных и выходных переменных. w_k– весовой коэффициент правила R_k.

Если ввести обозначение $\boldsymbol{X} = X_1 \times X_2 \dots \times X_n$ и $\boldsymbol{A_k} = A_{1k} \times A_{2k} \times \dots \times A_{nk}$, то правило (2.1) представляется в виде нечёткой импликации

$$R_k: \boldsymbol{A_k} \longrightarrow B_k, \; k = \overline{1,N}.$$

Правило R_k можно формализовать как нечёткое отношение, определённое на множестве $\boldsymbol{X} \times Y$, *т.е.* $R_k \subseteq \boldsymbol{X} \times Y$ – нечёткое множество с функцией принадлежности

$$\mu_{R_k}(\boldsymbol{x}, y) = \mu_{\boldsymbol{A_k} \longrightarrow B_k}(\boldsymbol{x}, y).$$

Модель Мамдани определяет задание функции $\mu_{\boldsymbol{A_k} \longrightarrow B_k}(\boldsymbol{x}, y)$ на основе известных функций принадлежности $\mu_{A_k}(x)$ и $\mu_{B_k}(y)$ следующим образом [1,2]

$$\mu_{\boldsymbol{A_k} \longrightarrow B_k}(\boldsymbol{x}, y) = T_1\left(\mu_{\boldsymbol{A_k}}(\boldsymbol{x}), \mu_{B_k}(y)\right) = \mu_{\boldsymbol{A_k}}(\boldsymbol{x}) \overset{T_1}{*} \mu_{B_k}(y), \qquad (2.2)$$

где $\overset{T_1}{*}$– произвольная t-норма используется как параметр.

При обучении системы, представленной в виде (2.1), нечеткое значение выхода $B'_k \subseteq Y$, при условии, что на входах системы – нечёткие множества, определяется, как $\boldsymbol{A'} = A'_1 \times A'_2 \times \dots \times A'_n \subseteq \boldsymbol{X}$ или x_1 есть A'_1 и x_2 есть A'_2 и ... и x_n есть A'_n с соответствующей функцией принадлежности $\mu_{\boldsymbol{A'}}(x)$. В соответствии с обобщённым правилом modus ponens [2], нечёткое множество B'_k определяется композицией нечёткого множества $\boldsymbol{A'}$ и отношения R_k, т.е.

$$B'_k = \boldsymbol{A'} \circ (\boldsymbol{A_k} \to B_k) \qquad (2.3)$$

или на уровне функций принадлежности:

$$\mu_{B'_k}(y) = \sup_{\boldsymbol{x} \in \boldsymbol{X}} \left\{ \mu_{\boldsymbol{A'}}(\boldsymbol{x}) \overset{T_2}{*} \left(\mu_{\boldsymbol{A_k}}(\boldsymbol{x}) \overset{T_1}{*} \mu_{B_k}(y) \right) \right\}, \qquad (2.4)$$

где $\overset{T_2}{*}$ может быть любым оператором в классе t-норм.

Вычислительная сложность выражения (2.2) является экспоненциальный и составляет $O(|X|^{\mathrm{n}} \cdot |Y|)$.

3. МЕТОД ВЫВОДА ДЛЯ БАЗЫ ПРАВИЛ НА ОСНОВЕ ДЕФАЗЗИФИКАЦИИ ПО СРЕДНЕМУ ЦЕНТРУ

Для снятия проблемы экспоненциальной сложности (2.4) воспользуемся следующей теоремой. Её результаты могут быть использованы при условии, если моделирование лингвистической связки "И" в антецеденте правила (2.1) применима *t*-норма – min, а для лингвистической связки "ИЛИ" применяется *t*-конорма – max

Теорема

Если $T(\mu_{A_{ik}}(x_i), \mu_B(y))$, $i = \overline{1,n}$ не возрастает по аргументу $\mu_{A_{ik}}(x_i)$, то:

1) В случае лингвистической связки "И":

$$T\left(\mu_{A_k}(x), \mu_B(y)\right) = T\left(\underset{i=\overline{1,n}}{min}\{\mu_{A_{ik}}(x_i)\}, \mu_B(y)\right) = \\ = \underset{i=\overline{1,n}}{min}\left\{T\left(\mu_{A_{ik}}(x_i), \mu_B(y)\right)\right\};$$

2) В случае лингвистической связки "ИЛИ":

$$T\left(\mu_{A_k}(x), \mu_B(y)\right) = T\left(\underset{i=\overline{1,n}}{max}\{\mu_{A_{ik}}(x_i)\}, \mu_B(y)\right) = \\ = \underset{i=\overline{1,n}}{max}\left\{T\left(\mu_{A_{ik}}(x_i), \mu_B(y)\right)\right\}.$$

Рассмотрим доказательство свойства 1:

Определение

Функция $T(\mu_{A_{ik}}(x_i), \mu_B(y))$ является неубывающей по аргументу $\mu_{A_{ik}}(x_i)$, если $\forall\, \mu_B(y) \in [0,1]$ из условия $\mu_{A_{ik}}(x_i') \geq \mu_{A_{ik}}(x_i'')$ следует неравенство:

$$T\left(\mu_{A_{ik}}(x_i'), \mu_B(y)\right) \geq T\left(\mu_{A_{ik}}(x_i''), \mu_B(y)\right). \quad (3.1)$$

Данное свойство имеет место для любой *t-нормы*, согласно её определению [3].

Доказательство

Предположим, любое из значений $\mu_B(y) \in [0,1]$. Пусть также $(x_1, x_2, \dots, x_n) \in X_1 \times X_2 \dots \times X_n$ и определим:

$$\mu_{A_{ik}}(x_e) = \underset{i=\overline{1,n}}{min}\{\mu_{A_{ik}}(x_i)\}. \quad (3.2)$$

Отсюда следует: $\mu_{A_{ik}}(x_e) \leq \mu_{A_{ik}}(x_i) \quad \forall i = \overline{1,n}$, в соответствии с (3.1):

$$\mathrm{T}\left(\mu_{A_{ik}}(x_e), \mu_B(y)\right) \leq \mathrm{T}\left(\mu_{A_{ik}}(x_i), \mu_B(y)\right), \forall i = \overline{1,n}, \quad (3.3)$$

тогда с учётом (3.2):

$$\mathrm{T}\left(\mu_{A_{ik}}(x_e), \mu_B(y)\right) = \underset{i=\overline{1,n}}{min}\left\{T\left(\mu_{A_{ik}}(x_i), \mu_B(y)\right)\right\}. \quad (3.4)$$

Так как $\mathrm{T}(\mu_{A_{ik}}(x_e), \mu_B(y))$ существует в правой части выражения (3.4), принимая во внимание (3.2), получим:

$$\mathrm{T}\left(\underset{i=\overline{1,n}}{min}\{\mu_{A_{ik}}(x_i)\}, \mu_B(y)\right) = \underset{i=\overline{1,n}}{min}\left\{T\left(\mu_{A_{ik}}(x_i), \mu_B(y)\right)\right\}.$$

Свойство 1 теоремы доказано. Свойство 2 доказывается аналогично.

При выполнении условия теоремы о декомпозиции многомерной функции принадлежности (2.2) и при использовании лингвистической связки "И" (1.4) примет вид:

$$\mu_{\mathrm{B}'_k}(y) = \min_{i=\overline{1,n}}\left\{\sup_{x_i \in X_i}\left\{\mu_{A'_i}(x_i) \overset{T_2}{*} T_1\left(\mu_{A_{ik}}(x_i),\ \mu_{B_k}(y)\right)\right\}\right\}, k = \overline{1,\mathrm{N}} \quad (3.5)$$

Заметим, что выражение (3.5) характеризуется сложностью порядка $O(|v_i| \cdot |Y| \cdot n)$, т.е. соответствует полиномиальной.

Функцию принадлежности одного из входов можно определить как:

$$\mu_{A'_i}(x_i) = \tau_{A_{ik}/A'_i}(\mu_{A_{ik}}(x_i)),$$

где $\tau_{A_{ik}/A'_i}(\cdot)$ – нечёткое значение истинности нечёткого множества A_{ik} относительно A'_i, представляющее собой функцию принадлежности совместимости $CP(A_{ik}, A'_i)$ A_{ik} по отношению к A'_i, причём A'_i рассматривается как достоверное [4]:

$$\tau_{A_{ik}/A'_i}(v_i) = \mu_{CP(A_{ik},A'_i)}(v_i) = \sup_{\substack{\mu_{A'_i}(x_i)=v_i \\ x_i \in X_i}}\left\{\mu_{A_{ik}}(x_i)\right\}, v_i \in [0,1].$$

Перейдём от переменной x к переменной v, обозначив $\mu_{A_{ik}}(x_i) = v_i$, получим:

$$\mu_{A'_i}(x_i) = \tau_{A_{ik}/A'_i}(\mu_{A_{ik}}(x_i)) = \tau_{A_{ik}/A'_i}(v_i).$$

Выражение (2.5) можно представить через нечёткое значение степени истинности:

$$\mu_{\mathrm{B}'_k}(y) = \min_{i=\overline{1,n}}\left\{\sup_{v_i \in [0,1]}\left\{\tau_{A_{ik}/A'_i}(v_i) \overset{T_2}{*}\left(v_i \overset{T_1}{*}\ \mu_{B_k}(y)\right)\right\}\right\}, k = \overline{1,\mathrm{N}}. \quad (3.6)$$

Если $T_1 = T_2 = T$, то учитывая свойство ассоциативности t-нормы, (3.6) можно преобразовать к виду:

$$\begin{aligned}\mu_{\mathrm{B}'_k}(y) &= \min_{i=\overline{1,n}}\left\{\sup_{v_i \in [0,1]}\left\{\tau_{A_{ik}/A'_i}(v_i) \overset{T}{*}\left(v_i \overset{T}{*}\ \mu_{B_k}(y)\right)\right\}\right\} = \\ &= \min_{i=\overline{1,n}}\left\{\sup_{v_i \in [0,1]}\left\{(\tau_{A_{ik}/A'_i}(v_i) \overset{T}{*} v_i) \overset{T}{*}\ \mu_{B_k}(y)\right\}\right\} = \\ &= \min_{i=\overline{1,n}}\left\{\sup_{v_i \in [0,1]}\left\{\tau_{A_{ik}/A'_i}(v_i) \overset{T}{*} v_i\right\} \overset{T}{*}\ \mu_{B_k}(y)\right\} =\end{aligned} \quad (3.7)$$

$$\min_{i=\overline{1,n}}\left\{\Pi_{A_{ik}/A_i'} \overset{T}{*} \mu_{B_k}(y)\right\}, k = \overline{1,n},$$

где

$$\Pi_{A_{ik}/A_i'} = \sup_{v_i\in[0,1]}\left\{\tau_{A_{ik}/A_i'}(v_i) \overset{T}{*} v_i\right\} \quad (3.8)$$

есть скалярная величина, которая является мерой возможности того, что A_{ik} соответствует входу A_i' или наоборот [5].

Учитывая вышеприведенные преобразования, получим четкое выходное значение, используя метод дефаззификации по среднему центру [3]. В этом случае выходное значение может быть вычислено по формуле:

$$\bar{y} = \frac{\sum_{k=\overline{1,N}} \bar{y}_k . w_k \cdot \mu_{B_k'}(\bar{y}_k)}{\sum_{k=\overline{1,N}} w_k \cdot \mu_{B_k'}(\bar{y}_k)}, \quad (3.9)$$

где $\bar{y}$ – четкий выход системы, состоящей из N правил вида (3.1); $\bar{y}_k$ – центры функций принадлежности $\mu_{B_k}(y)$, $k = \overline{1,N}$, т.е. значения, в которых:

$$\mu_{B_k}(\bar{y}_k) = \sup_{y\in Y}\{\mu_{B_k}(y)\} = 1. \quad (3.10)$$

Так как t-нормы по определению удовлетворяет граничному условию $T(a;1) = a$, то подставляя (3.7) в (3.9), с учетом (3.10) получим:

$$\bar{y} = \frac{\sum_{к=\overline{1,N}} \bar{y}_k \cdot w_k . \min\limits_{i=\overline{1,n}}\left\{\Pi_{A_{ik}/A_i'}\right\}}{\sum_{к=\overline{1,N}} w_k . \min\limits_{i=\overline{1,n}}\left\{\Pi_{A_{ik}/A_i'}\right\}}. \quad (3.11)$$

4. НАСТРОЙКА НЕЧЕТКОЙ МОДЕЛИ И АЛГОРИТМ ОБУЧЕНИЯ

Обучающую и тестовую выборку определим соответственно, как набор пар входных и выходных значений:

$$(X^r, y^r), r = \overline{1,M}, \quad (4.1)$$

где $X^r = (x_1^r, x_2^r, \ldots, x_n^r)$ – входной вектор в r-ой паре, y^r – соответствующий выход.

Входными значениями могут быть четкие значения, которые с помощью фаззификации перед выводом приводятся к нечеткости, или нечеткие значения, заданные термами, например, «низкий», «средний», «высокий» и т.п., которые определены в базе знаний системы. При использовании нечетких значений входы системы будут неизменными на протяжении всего обучения, при использовании численных значений

напротив входы системы могут изменяться в процессе обучения при изменении параметров, определяющих функции принадлежности термов.

Настройка нечеткой модели заключается в нахождении таких ее параметров, которые минимизируют отклонения между желаемым и действительным поведением модели. При этом предполагается, что желаемое поведение модели задано нечеткой обучающей выборкой.

Обозначим через $\mu_{A_{ij}}(x_i)$ функцию принадлежности входа нечеткому терму A_{ij}, где $i,j=\overline{1,n}$. Функция принадлежности определена на области определения лингвистической переменной.

Для описания функция принадлежности будет использоваться Гауссова функция:

$$\mu_T(x) = e^{-\frac{(x-b)^2}{2c^2}}, \qquad (4.2)$$

где b и c – координата максимума и коэффициент концентрации функции принадлежности нечеткого множества T.

В реализуемом методе вывода возможно использование различных *t-норм*. При обучении также возможен подбор наиболее подходящей *t-нормы*.

Параметры *b* и *c* функций принадлежности всех термов системы, весовые коэффициенты правил, а также вид и параметр *t-нормы* будут подлежать настройке при обучении системы.

Зададим нечеткую модель объекта $y = f(x_1, x_2, \ldots, x_n)$ в следующем виде:

$$y = F(X, B, C, W, t, \gamma),$$

где $X = (x_1, x_2, \ldots, x_n)$ – входной вектор; $B = (b_1, b_2, \ldots, b_q)$ и $C = (c_1, c_2, \ldots, c_q)$ – векторы параметров функций принадлежности (4.2) нечетких термов из базы знаний (2.1); $W = (w_1, w_2, \ldots, w_N)$ – вектор весовых коэффициентов нечетких правил в (2.1); *N* – общее количество правил-строчек в (2.1); q – общее количество термов; t, γ – вид и параметр t-нормы; *F* – функция связи «входы – выход», соответствующая (3.11).

Настройку нечеткой модели сформулируем в виде следующей задачи оптимизации [2]: найти такой вектор (*B, C, W, t,* γ), чтобы

$$R = \sqrt{\frac{1}{M}\sum_{r=\overline{1,M}}[y^r - F(X^r, B, C, W, t, \gamma)]^2} \to min. \qquad (4.3)$$

Для обучения применяется эволюционная стратегия (μ, λ) [2], так как при ее использовании снижена вероятность того, что локальный минимум из поиска решений будет выдан в качестве решения задачи.

В данном случае особь представляет собой генотип, который

состоит из двух хромосом. Хромосома x содержит N генов-параметров системы, а хромосома σ содержит значения стандартных отклонений, используемых в процессе мутации соответствующих генов хромосомы x. Алгоритм настройки может быть описан в виде следующей последовтельности шагов:

1. формируется родительская популяция P, которая содержит μ особей с хромосомой x, содержащей параметры системы, заданные экспертом, гены хромосомы σ у всех особей равны 1;
2. производится репродукция для формирования временной популяции T размера λ, причем $\lambda > \mu$, из родительской популяции P;
3. формируется популяция потомков O путем мутации временной популяции T;
4. оценивается популяция O. Чтобы оценить особь, строится система с параметрами, которые записаны в x хромосоме. Далее для каждой пары «входы-выход» из обучающей выборки вычисляется квадрат разности между выходом системы, на вход которой поступают «входы», и «выходом». Сумма полученных квадратов является оценкой данной особи;
5. формируется новая родительская популяция P из μ лучших особей популяции потомков O. Чем меньше оценка особи, тем она лучше;
6. проверяется условие завершения алгоритма и если оно не выполняется, то необходимо повторить шаги 2-6 с новой родительской популяцией P;
7. производится вывод лучшей особи.

Рассмотрим подробнее некоторые этапы алгоритма. При генерации первой родительской особи, хромосома σ заполняется единичными значениями и далее меняет их только путем мутации.

Операции мутации подвергаются все особи популяции, причем каждая в отдельности. Мутируют обе хромосомы, но процесс мутации различен. Первой мутирует хромосома $\sigma = [\sigma_1^2, \ldots, \sigma_n^2]^T$ в соответствии с выражением:

$$\sigma_i' = \sigma_i \exp\left(\tau' N(0,1) + \tau N_i(0,1)\right),$$

где $i = 1, \ldots, n$, n –длина хромосомы; $N(0,1)$ – случайное число, имеющее нормальное распределение (генерируется один раз для всей хромосомы); $N_i(0,1)$ – случайное число, имеющее нормальное распределение (генерируется для каждого гена в отдельности); τ' и τ– параметры эволюционной стратегии, влияющие на сходимость алгоритма. В литературе встречается форма, где C чаще всего принимает значение 1:

$$\tau' = \frac{c}{\sqrt{2n}}, \qquad \tau = \frac{c}{\sqrt{2\sqrt{n}}}.$$

Новые величины мутации σ_i'влияют на изменение значения x_i, следующим образом:

$$x_i' = x_i + \sigma_i' N_i(0,1), \tag{4.4}$$

где $N_i(0,1)$ – случайное число, имеющее нормальное распределение, $i = 1,..,n$ [2].

Операция мутации выбранной эволюционной стратегии была доработана введением ограничений для значений, которые могут принимать гены хромосомы x. Для каждого гена хромосомы перед началом алгоритма подбирается минимальное и максимальное возможное значение. Если в процессе мутации значение гена или аллель выходит за пределы заданного отрезка возможных значений, новое значение рассчитывается по формуле:

$$x_i'' = \begin{cases} a_{max} - c, x_i' > a_{max}, \\ a_{min} + c, x_i' < a_{min}, \end{cases}$$

где x_i – значение гена, полученное операцией мутации; a_{min} и a_{max} – минимально и максимально возможное значение гена соответственно; c – корректирующее значение, равное

$$c = |x_i' - [x_i'/(a_{\max} - a_{min})]|.$$

После изменения свойства гена, также следует изменить соответствующий ген хромосомы σ, используя формулу (4.4):

$$\sigma_i'' = (x_i'' - x_i)/N_i(0,1).$$

Таким образом в результате операции мутации значения генов равны x_i''и σ_i''.

Применяя данный алгоритм для обучения нечеткой системы, в качестве целевой функции выступает функция (4.3). Лучшей является особь, у которой значение целевой функции меньше, чем у других особей популяции.

Условием завершения алгоритма может быть количество порожденных особей или достижение установленной оценки особью популяции *P*.

5. РЕАЛИЗАЦИЯ АЛГОРИТМА ОБУЧЕНИЯ НА ГРАФИЧЕСКОМ ПРОЦЕССОРЕ И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

Операции обучения проводились на графическом процессоре с использованием технологии OpenCL [6].

Популяция состоит из некоторого количества особей. В памяти компьютера популяция представляется как массив, элементом которого является особь.

Для операции репродукции была сгенерирована временная популяция в виде массива размера λ, содержащего числа от 0 до $(\mu - 1)$ (μ – размер родительской популяции). Данный массив определяет индексы особей, которые попадут в новую временную популяцию *T*.

Операция мутации выполняется для каждой особи временной популяции отдельно. В алгоритме мутации эволюционной стратегии предусмотрено использование нормально распределенных случайных чисел. Это дорогостоящая операция на графическом процессоре, которая требует создания генератора случайных чисел, поэтому предварительно генерируются массив случайных чисел размера $\lambda * 2 * n$.

Блок-схема операции мутации для каждой особи представлена на рис.1, где *orgs* – массив особей популяции, i – индекс особи, подвергающейся мутации, t и t_1 – параметры эволюционной стратегии, *rands* – массив случайных чисел, *limitations* – массив ограничений для значений генов, *mutated_orgs* – массив измененных особей.

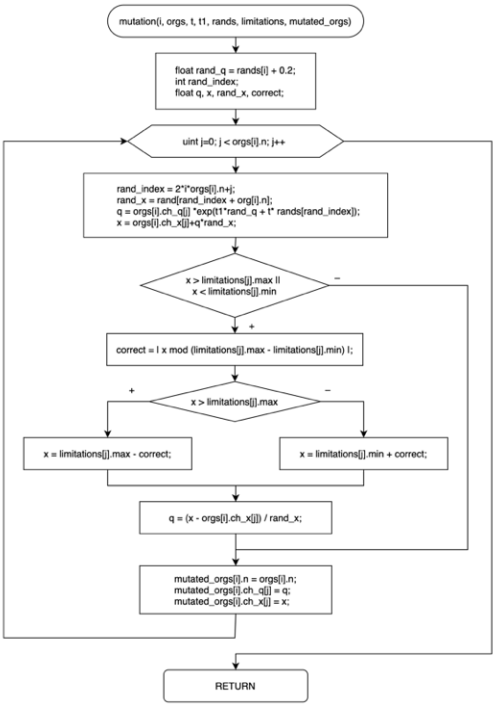


Рис.1. Блок-схема операции мутации

Измененные особи оцениваются по (4.3), выход нечеткой системы вычисляется также на графическом процессоре. Данный процесс описан в [7].

Операция селекции организована сортировкой особей по возрастанию полученных оценок и последующим выбором μ первых особей. Если условием завершения алгоритма является достижение определенной средней оценки, то для отобранных особей вычисляется средняя оценка.

Для реализации вычислительного эксперемента воспользуемся подходом, изложенном в [8]. Рассматривается объект с двумя входами $x_1, x_2 \in [0, 10]$ и одним выходом y, заданный зависимостью:

$$y = (x_1 - 7)^2 \cdot \sin(0.61 \cdot x_2 - 5.4). \qquad (5.1)$$

Ставилась задача по графику эталонной зависимости, представленной на рис.2, создать нечеткую модель и настроить ее по нечеткой обучающей выборке. Адекватность нечеткой модели необходимо проверить по критерию (4.3) на тестовой выборке из случайно сгенерированных пар «входы-выход».

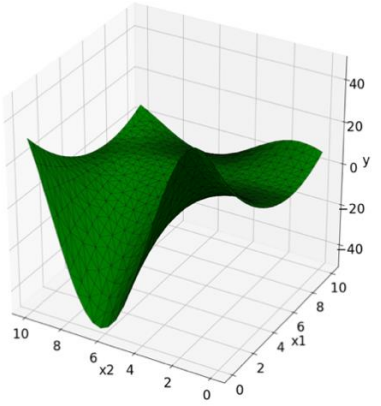


Рис.2. Эталонная зависимость (5.1)

Нечеткая база знаний была сгенерирована экспертом визуально на основе рис.2. Она состоит из семи правил, которые сведены в таблице 1. Для лингвистической оценки входных переменных x_1 и x_2 и выходной переменной y используются термы «Низкий» (Н), «Ниже Среднего» (НС), «Средний» (С), «Выше Среднего» (ВС) и «Высокий» (В). При этом значение критерия (4.3) на тестовой выборке составляет 11,25 (рис.3а). Весовые коэффициенты (W) правил этих нечетких

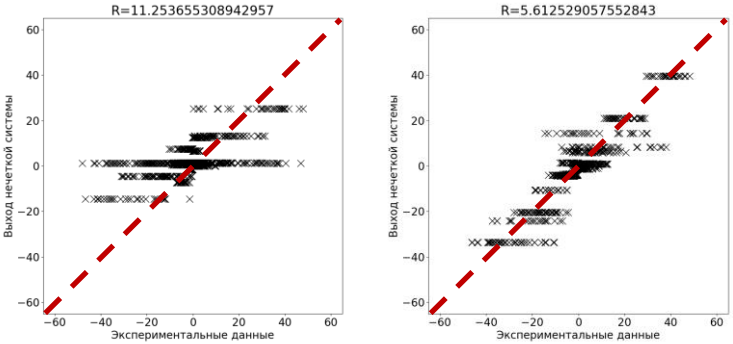
моделей приведены в таблице 1. Тестирование обученных нечетких моделей (рис.3б) свидетельствует о приемлемом качестве идентификации нелинейной зависимости (5.1).

Для исследования процесса настройки нечеткой модели использовались обучающие выборки из 10, 20, …, 100 пар «входы-выход». Обучающая выборка генерировалась как случайно выбранные входные значения из области их определения и рассчитанные соласно (5.1) выходные значения, которые затем использовались для оценки критерия точности идентификации. Для превращения данной обучающей выборки в нечеткую, сгенерированные четкие значение входных переменных оценивались термами лингвистическими переменных до настройки модели, выходные значения оставались без изменения (четкими).

Таблица 1. Нечеткая база знаний

x_1	x_2	y	W	
			до настройки	после настройки
Низкий	Низкий	Высокий	1	0,61
Низкий	Средний	Низкий	1	0,63
Низкий	Высокий	Высокий	1	0,20
Средний	–	Средний	1	0,99
Высокий	Низкий	Выше среднего	1	0,10
Высокий	Средний	Ниже среднего	1	0,21
Высокий	Высокий	Выше среднего	1	0,01

На рис.4 показаны кривые обучения нечетких моделей. Они отражают зависимости ошибок идентификации (4.3) на обучающей и тестовой выборках от объема (M) самой обучающей выборки. Настройка проводилась с помощью эволюционной стратегии $(\mu, \lambda), \mu = 40, \lambda = 160$ на протяжении 100 итераций. Каждая точка на кривых обучения (рис. 4) рассчитывалась как среднее значение результатов экспериментов для 10 разных обучающих выборок. С увеличением объема нечеткой обучающей выборки уменьшается невязка на тестовой выборке, а также уменьшается разница между невязками на обучающей и тестовой выборке.



а) до настройки б) после настройки

Рис.3. Тестирование нечетких систем

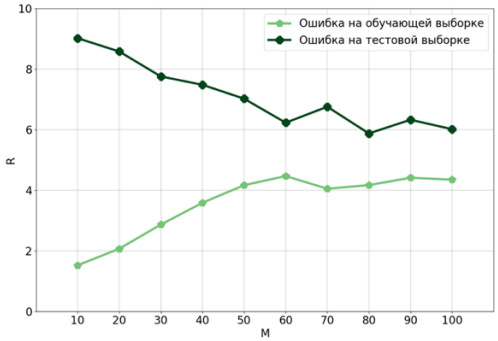


Рис.4. Кривые обучения

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье представлен метод вывода для систем типа Мамдани с нечеткими входами с полиномиальной вычислительной сложностью. Разработан алгоритм обучения таких систем с использованием нечеткой обучающей выборки и с применением параллельных технологий. Проведенные компьютерные эксперименты показывают, что нечеткость в экспериментальных данных снижает эффективность обучения, но при увеличении обучающей выборке точность обучения увеличивается.

Литература

1. Пегат А. Нечеткое моделирование и управление. М.: БИНОМ, Лаборатория знаний, 2009.
2. Рутковский Л. Методы и технологии искусственного интеллекта. М.: Горячая линия–Телеком, 2010.
3. Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы: Пер. с польск. И. Д. Рудинского. – М.: Горячая линия – Телеком, 2006. – 452 с.: ил.
4. Дюбуа Д., Прад А. Теория возможностей. Приложение к представлению знаний в информатике. М.: Радио и связь, 1990.
5. Yager R. R. Some relationships between possibility, truth and certainty // Fuzzy Sets and Systems. 1983. № 11. P. 151-156.
6. A. Munshi, B. R. Gaster, T. G. Mattson, J. Fung and D. Ginsburg, OpenCL Programming Guide, Boston, MA, USA:Addison-Wesley Prof, 2011.
7. Синюк В.Г., Поляков В.М., Панченко М.В. Метод вывода для систем MISO-структуры при нечетких входах с применением технологий параллельных вычислений // VIII Международная научно-практическая конференция «Нечеткие системы, мягкие вычисления и интеллектуальные технологии» НСМВИТ-2020 (29 июня – 1 июля 2020 г., г. Смоленск, Россия). Труды конференции. В 2-х томах. Т 1. – Смоленск: Универсум, 2020 с 54-64.
8. Ротштейн А.П., Штовба С.Д. Идентификация нелинейной зависимости нечеткой базой знаний с нечеткой обучающей выборкой // Кибернетика и системный анализ. – 2006 – №2. – С. 17-24.

УДК 004.8

МЕТОД ПРЕЦЕДЕНТНОГО ОБУЧЕНИЯ НЕЧЕТКИХ МОДЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКОГО БАЙЕСОВСКОГО ПОДХОДА*

***Борисов В.В.**, д.т.н.*
e-mail: vbor67@mail.ru
Луферова Е.А.
e-mail: elena.67reg@gmail.com
Филиал НИУ «МЭИ» в г. Смоленске

1. ВВЕДЕНИЕ

Нечеткие модели хорошо зарекомендовали себя при решении различных задач анализа и моделирования сложных систем и процессов, в том числе за счет: учета неточности и неопределенности; возможности оперирования с разнокачественными данными, представленными с помощью различных шкал; представления и моделирования нелинейности; хорошей интерпретируемости зависимостей [1].

К таким моделям можно отнести как универсальные нечеткие модели (применяемые для выполнения типовых аналитических задач), так и проблемно-ориентированные модели (для анализа событийных, ситуационных и иных специфических аспектов анализируемых систем и процессов) [2].

При этом вне зависимости от степени универсальности и иных свойств для расширения адаптационных возможностей практически всех типов нечетких моделей эффективно реализуются различные методы их структурно-параметрической настройки и обучения [3, 4].

Использование конкретных подходов и методов обучения обусловлено как особенностями нечетких моделей, так и характером доступной для их обучения информации.

Так, типовым является подход, предполагающий предварительное формирование структуры нечеткой модели, подготовку обучающей выборки и последующее обучение нечеткой

* Исследование выполнено в рамках государственного задания № FSWF-2020-0019, а также при финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-29-03088)

модели (настройку параметров функций принадлежности нечетких множеств) в соответствии с используемым алгоритмом обучения [5].

Однако зачастую для построения нечетких моделей доступны только экспертные данные.

Кроме того, описанный выше подход, как правило, недостаточно эффективен, если требуется оперативная параметрическая подстройка модели в результате получения и необходимости учета отдельных дополнительных фактов об исследуемой системе/процессе. Это обусловлено тем, что рассматриваемые нечеткие модели, как правило, лишены свойства «пластичности», трактуемого здесь как возможность «наложения» новых сведений на предыдущий опыт без повторного переобучения всей модели заново. При этом воздействие отдельных фактов, вновь появляющихся свидетельств (новых, прецедентных примеров) чаще всего носит локальный характер, и поэтому достаточно осуществить настройку только тех параметров модели, на которые эти отдельные факты оказывают воздействие.

Это, в свою очередь, влечет за собой проблему невозможности локализации (с использованием известных подходов) изменяемых параметров нечетких моделей и определения необходимых их изменений.

Указанные проблемы усугубляются еще и тем, что вновь поступающие данные могут вступать в противоречие с данными, ранее использованными при обучении нечетких моделей.

Предлагаемый метод позволяет, во-первых, повысить обоснованность экспертного подхода к построению и настройке нечетких моделей и, во-вторых, обеспечить локализацию и изменение требуемых параметров нечетких моделей при поступлении новых данных с обеспечением верификации этих параметров за счет использования нечетких байесовских сетей, по сути представляющих собой модели учителя для этих нечетких моделей.

2. ОПИСАНИЕ И ПРИМЕР ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТОДА ПРЕЦЕДЕНТНОГО ОБУЧЕНИЯ НЕЧЕТКИХ МОДЕЛЕЙ

Предлагаемый метод состоит из рассмотренных ниже обобщенных этапов.

Этап 1. Задание структур нечеткой модели и нечеткой байесовской сети.

Рассмотрим в качестве примера задачу анализа воздействия климатических явлений на уязвимости городской среды. На рис.1 показана структура модели для анализа воздействия климатических явлений на уязвимости природной среды [6].

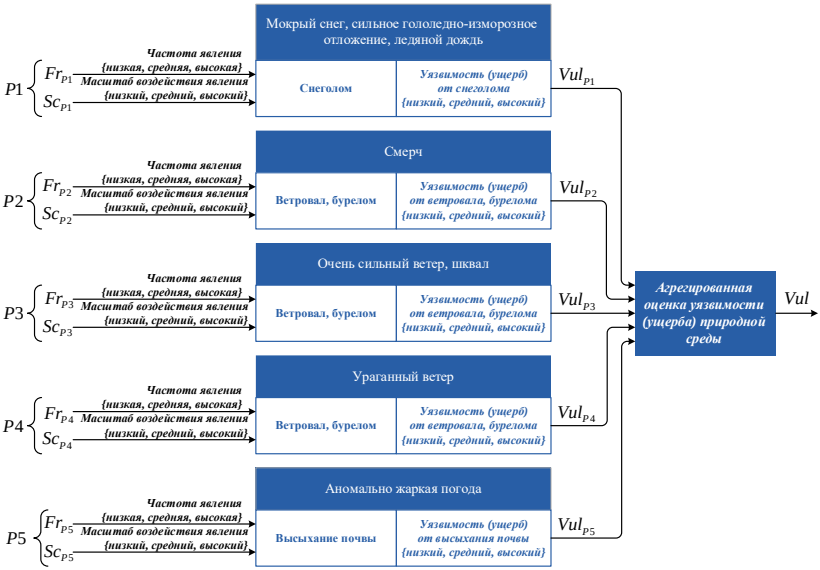


Рис.1. Структура модели для анализа воздействия климатических явлений на уязвимости природной среды

Модель имеет 2-уровневую структуру. Первый уровень соответствует выявленным устойчивым паттернам воздействия климатических явлений на уязвимости природной среды, представляющим собой тернарные сочетания типа: «*климатическое явление*» ↔ «*тип уязвимости*» ↔ «*событие*». Выявлены следующие устойчивые паттерны:

- «*мокрый снег, сильное гололедно-изморозное отложение, ледяной дождь*» ↔ «*снеговая нагрузка*» ↔ «*снеголом*»;
- «*смерч*» ↔ «*ветровая нагрузка*» ↔ «*ветровал, бурелом*»;
- «*очень сильный ветер, шквал*» ↔ «*ветровая нагрузка*» ↔ «*ветровал, бурелом*»;
- «*ураганный ветер*» ↔ «*ветровая нагрузка*» ↔ «*ветровал, бурелом*»;
- «*аномально жаркая погода*» ↔ «*отсутствие влажности*» ↔ «*высыхание почвы*».

Входными показателями (входными нечеткими переменными) являются частота (Fr_{Pi}) и масштаб (Sc_{Pi}) воздействия соответствующего климатического явления Pi ($P1$ – мокрый снег, сильное гололедно-изморозное отложение, ледяной дождь; $P2$ – смерч; $P3$ – очень сильный ветер, шквал; $P4$ – ураганный ветер; $P5$ – аномально жаркая погода), а выходными показателями (выходными нечеткими

переменными) – показатели уязвимости (ущерба) Vul_{Pi} от событий, соответствующих этим климатическим явлениям.

На 2-м уровне осуществляется агрегирование (Vul) оценок уязвимости природной среды от выявленных воздействий (Vul_{Pi}) климатических явлений.

Представленная структура является общей как для нечеткой модели, так и для соответствующей ей нечеткой байесовской сети (модели учителя).

Этап 2. Построение нечеткой модели.

В результате этапа для 1-го уровня формируется согласованная совокупность нечетких продукционных правил модели анализа воздействия климатического явления Pi на уязвимость природной среды от соответствующего ему «события» следующего вида:

Если Pr_{Pi} есть L **И** Sc_{Pi} есть L, **то** Vul_{Pi} есть L;

…

Если Pr_{Pi} есть M **И** Sc_{Pi} есть M, **то** Vul_{Pi} есть M;

…

Если Pr_{Pi} есть H **И** Sc_{Pi} есть H, **то** Vul_{Pi} есть H.

где {L – малый, M – средний, H – большой} – нечеткие множества (например, с треугольной функцией принадлежности) для задания всех входных и выходных переменных модели.

Для 2-го уровня формируется нечеткая продукционная модель, состоящая из нечетких продукционных правил вида:

Если Vul_{P1} есть L **ИЛИ** … **ИЛИ** Vul_{P5} есть M, **то** Vul есть M.

Этап 3. Построение нечеткой байесовской сети (модели учителя).

На рис.2 представлена нечеткая байесовская модель, структура и параметры которой соответствуют структуре и параметрам нечеткой продукционной модели анализа воздействия климатических явлений на уязвимости природной среды. Для рассматриваемого примера нечеткие априорные вероятности показателей Fr_{Pi}, Sc_{Pi}, а также условные нечеткие вероятности показателей Vul_{Pi} и Vul типизированы в виде нечетких множеств {L – низкий, M – средний, H – высокий}.

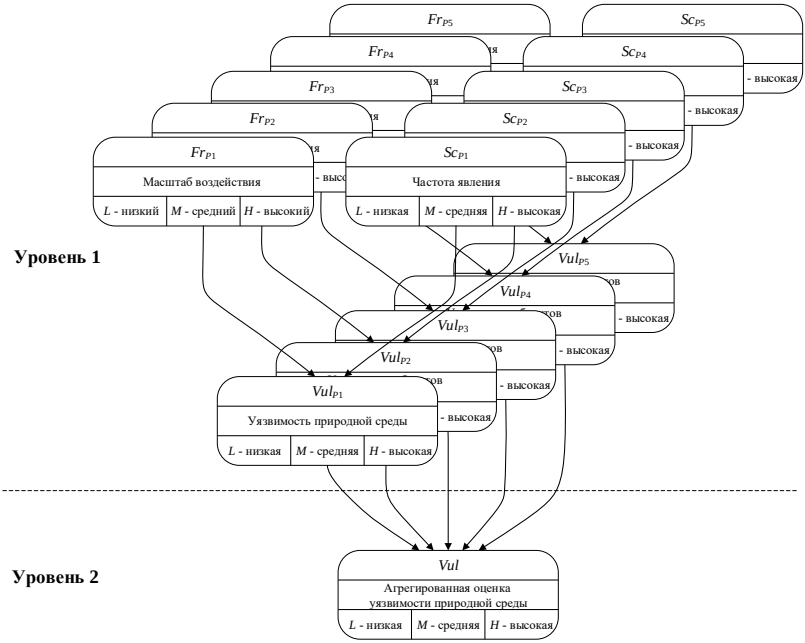


Рис.2. Нечеткая байесовская сеть для прецедентного обучения построенной нечеткой продукционной модели

В таблице 1 представлены примеры экспертно заданных нечетких априорных вероятностей (в виде треугольных нечетких чисел) для показателей Fr_{P2}, Sc_{P2}, а в таблице 2 – сформированная по результатам последующих расчетов ([7]) таблица нечетких условных вероятностей для показателя Vul_{P2}.

Таблица 1. Нечеткие априорные вероятности для показателей Fr_{P2} и Sc_{P2}

Fr_{P2}	Sc_{P2}
$P(Fr_{P2} = L) = [0{,}2;\ 0{,}2;\ 0{,}6]$	$P(Sc_{P2} = L) = [0{,}0;\ 0{,}0;\ 0{,}5]$
$P(Fr_{P2} = M) = [0{,}2;\ 0{,}6;\ 1{,}0]$	$P(Sc_{P2} = M) = [0{,}0;\ 0{,}5;\ 1{,}0]$
$P(Fr_{P2} = H) = [0{,}6;\ 1{,}0;\ 1{,}0]$	$P(Sc_{P2} = H) = [0{,}5;\ 1{,}0;\ 1{,}0]$

Таблица 2. Нечеткие условные вероятности для показателя Vul_{P2}

Fr_{P2}	Sc_{P2}	$P(Vul'_{P2} = L)$	$P(Vul'_{P2} = M)$	$P(Vul'_{P2} = H)$
L	L	[0,04; 0,04; 0,08]	[0,04; 0,08; 0,16]	[0,08; 0,16; 0,16]
L	M	[0,06; 0,06; 0,12]	[0,06; 0,12; 0,24]	[0,12; 0,24; 0,24]
L	H	[0,06; 0,06; 0,12]	[0,06; 0,12; 0,24]	[0,12; 0,24; 0,24]
M	L	[0,04; 0,04; 0,08]	[0,04; 0,08; 0,16]	[0,08; 0,16; 0,16]
M	M	[0,08; 0,08; 0,16]	[0,08; 0,16; 0,32]	[0,16; 0,32; 0,32]
M	H	[0,1; 0,1; 0,2]	[0,1; 0,2; 0,4]	[0,2; 0,4; 0,4]
H	L	[0,04; 0,04; 0,08]	[0,04; 0,08; 0,16]	[0,08; 0,16; 0,16]
H	M	[0,08; 0,08; 0,16]	[0,08; 0,16; 0,32]	[0,16; 0,32; 0,32]
H	H	[0,14; 0,14; 0,28]	[0,14; 0,28; 0,56]	[0,28; 0,56; 0,56]

На основе полученных нечетких условных вероятностей вычисляются нечеткие безусловные вероятности показателей Vul_{Pi}, так, например, для показателя Vul_{P2} [8]:

$$P(Vul_{P2} = L) \cong \tilde{\oplus}_{Fr_{P2}, Sc_{P2}} P(Fr_{P2}, Sc_{P2}, Vul_{P2} = L) = [0{,}21; 0{,}28; 0{,}42],$$

$$P(Vul_{P2} = M) \cong \tilde{\oplus}_{Fr_{P2}, Sc_{P2}} P(Fr_{P2}, Sc_{P2}, Vul_{P2} = M) = [0{,}42; 0{,}56; 0{,}84],$$

$$P(Vul_{P2} = H) \cong \tilde{\oplus}_{Fr_{P2}, Sc_{P2}} P(Fr_{P2}, Sc_{P2}, Vul_{P2} = H) = [0{,}85; 1{,}0; 1{,}0].$$

Аналогично вычисляется полная нечеткая вероятность для итогового показателя Vul уязвимости городской среды, так для $P(Vul = L)$:

$$P(Vul = L) \cong \tilde{\oplus}_{\substack{Fr_{P1}, ..., Fr_{P5}, \\ Sc_{P1}, ..., Sc_{P5}, \\ Vul_{P1}, ..., Vul_{P5}}} P(Vul = L \mid Vul_{P1}, ..., Vul_{P5}) \tilde{\otimes}$$

$$\tilde{\otimes} P(Vul_{P1} \mid Fr_{P1}, Sc_{P1}) \tilde{\otimes} P(Fr_{P1}) \tilde{\otimes} P(Sc_{P1}) \tilde{\otimes}$$

$$...$$

$$\tilde{\otimes} P(Vul_{P5} \mid Fr_{P5}, Sc_{P5}) \tilde{\otimes} P(Fr_{P5}) \tilde{\otimes} P(Sc_{P5}).$$

Полученные таким образом значения $P(Vul_{Pi} = L)$, $P(Vul_{Pi} = M)$, $P(Vul_{Pi} = H)$, а также $P(Vul = L)$, $P(Vul = M)$, $P(Vul = H)$ характеризуют настроенные параметры нечеткой модели.

Отдельный, вновь поступающий прецедентный факт в виде данных, характеризующих, например, новые значения показателей Fr_{Pi}, Sc_{Pi} и соответствующее им значение показателя Vul_{Pi}, приводят к

изменению априорных нечетких вероятностей нечеткой байесовской сети, и влияет на соответствующие параметры нечеткой модели для анализа воздействия климатических явлений на уязвимости природной среды.

Так, частота Fr_{Pi} определенного климатического явления влияет на итоговую агрегированную оценку уязвимости Vul природной среды:

$$P(Fr_{Pi} = L \,|\, Vul = L) \cong \frac{P(Fr_{Pi} = L, Vul = L)}{P(Vul = L)},$$

как и изменение масштаба воздействия Sc_{Pi} влияет на Vul:

$$P(Sc_{Pi} = L \,|\, Vul = L) \cong \frac{P(Sc_{Pi} = L, Vul = L)}{P(Vul = L)}.$$

Локализацию конкретных измененяемых параметров нечеткой модели и определение необходимых их изменений можно более налядно проследить на примере расчета соответствующих совместных нечетких вероятностей:

$$P(Fr_{P1} = L, Vul = L) \cong \tilde{\oplus}_{Vul_{P1},\ ...,\ Vul_{P5}} P(Vul = L \,|\, Vul_{P1}, ..., Vul_{P5}) \tilde{\otimes}$$
$$\tilde{\otimes} P(Vul_{P1} \,|\, Fr_{P1} = L, Sc_{P1}) \tilde{\otimes} P(Fr_{P1} = L) \tilde{\otimes} P(Sc_{P1}) \tilde{\otimes}$$
$$...$$
$$\tilde{\otimes} P(Vul_{P5} \,|\, Fr_{P5}, Sc_{P5}) \tilde{\otimes} P(Fr_{P5}) \tilde{\otimes} P(Sc_{P5}),$$
$$P(Sc_{P1} = L, Vul = L) \cong \tilde{\oplus}_{Vul_{P1},\ ...,\ Vul_{P5}} P(Vul = L \,|\, Vul_{P1}, ..., Vul_{P5}) \tilde{\otimes}$$
$$\tilde{\otimes} P(Vul_{P1} \,|\, Fr_{P1}, Sc_{P1} = L) \tilde{\otimes} P(Fr_{P1}) \tilde{\otimes} P(Sc_{P1} = L) \tilde{\otimes}$$
$$...$$
$$\tilde{\otimes} P(Vul_{P5} \,|\, Fr_{P5}, Sc_{P5}) \tilde{\otimes} P(Fr_{P5}) \tilde{\otimes} P(Sc_{P5}).$$

Результаты проведенного компьютерного моделирования позволили сделать вывод, что ошибка ущерба от климатических явлений природной среде при использовании нечеткой продукционной модели, обученной с применением предложенного метода, составляет в среднем на 6,7% меньше, по сравнению с использованием нечеткой модели, построенной и обученной только на основе экспертных данных.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен метод прецедентного обучения нечетких моделей на основе нечеткого байесовского подхода. Метод позволяет повысить обоснованность экспертного подхода к построению и настройке нечетких моделей, а также обеспечить локализацию и изменение требуемых параметров нечетких моделей при поступлении новых данных с обеспечением верификации этих параметров за счет использования нечетких байесовских сетей.

Представлен пример использования предложенного метода прецедентного обучения нечетких моделей для анализа воздействия климатических явлений на уязвимости природной среды, позволяющий обосновать вывод, что использование предложенного метода позволяет повысить качество обучения нечетких моделей по сравнению с методами, основанными только на экспертных данных.

Литература

1. Fundamentals of Fuzzy Sets: edited by D. Dubois and H. Prade in The Handbook of Fuzzy Sets Series, D. Dubois, H. Prade (Eds.), Springer Science & Business Media, NY, 2012. – 647 p.
2. Борисов В.В. Систематизация нечетких и гибридных нечетких моделей // Мягкие измерения и вычисления. 2020. Т. 29, № 4. – С. 98-120.
3. Тарасов В.Б., Голубин А.В. Нечеткие генетические алгоритмы // Интеллектуальные системы/ Под ред. В.М. Курейчика. – М.: Физматлит, 2007. – С. 23-30.
4. Averkin A. (2019) Hybrid Intelligent Systems Based on Fuzzy Logic and Deep Learning. In: Osipov G., Panov A., Yakovlev K. (eds) Artificial Intelligence. Lecture Notes in Computer Science, vol 11866. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-33274-7_1.
5. Piegat A. Fuzzy Modeling and Control. Heidelberg; New York: Physica-Verl., 2001. P. 728/.
6. Klimenko V.V., Klimenko A.V., Tereshin A.G., Mitrova (2019) T.A.: Impact of Climate Changes on the Regional Energy Balances and Energy Exports from Russia. Thermal Engineering, 66(1), 3-15.
7. Borisov V., Luferova E. Analysis of the multifactorial phenomena based on fuzzy Bayesian model // Russian Advances in Artificial Intelligence: selected contributions to the 8-th International Conference on Fuzzy Systems, Soft Computing and Intelligent Technologies (FSSCIT-2020), June 29 – July 1, 2020, Smolensk, Russia, pp. 48-58. http://ceur-ws.org/Vol-2782/paper_07.pdf.
8. Borisov V.V., Ponomarenko A.S., Fedulov A.S., Bobkov V.I. Complex System Risk Assessment Based on the Fuzzy Probabilistic Bayesian Inference // Mechanics, Resource and Diagnostics of Materials and Structures (MRDMS-2019). AIP Conf. Proc. 2176, 040003-1–040003-4; https://doi.org/10.1063/1.5135152.

УДК 004.8

ПРОЦЕССНЫЙ ПОДХОД К ОРГАНИЗАЦИИ ИНДИВИДУАЛЬНОЙ И КОЛЛЕКТИВНОЙ ПОДГОТОВКИ СПЕЦИАЛИСТОВ НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКИХ СЕТЕЙ ПЕТРИ

***Фролов И.А.**, к.т.н.*
ВА ВПВО ВС РФ, г. Смоленск

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время существует проблема организации качественной индивидуальной и коллективной подготовки специалистов, заключающаяся в трудности организации и реализации ее адаптивного процесса, контроля качества обучения, как на этапе индивидуальной подготовки, так и на этапе коллективной подготовки, а также сложности учета целей и правил обучения. Особенностью коллектива специалистов, как сложной организационно-технической системы, является, кроме того, и реализация деятельности, характеризующейся неопределенностью, вследствие его «социальной природы», результаты которой могут оказывать влияние на подготовку специалистов (например, оперативных служб МЧС) в составе их подразделений.

Решение указанной проблемы может достигаться за счет применения в подобных системах методов процессного управления, основанных на моделировании коллективной деятельности в сложных организационно-технических системах [1].

Под процессным управлением понимается концепция организации деятельности предприятия (компании, организации) посредством управления ее бизнес-процессами («деловыми» процессами).

Несмотря на то, что концепция процессного управления Business Process Management (BPM) разработана для решения экономических задач, с ее использованием можно решать и другие задачи, связанные с организацией производства, управлением рабочими процессами, государственным и административным (военным) управлением, а также исследованием социальных процессов и любой другой поддающейся автоматизации деятельности, в которой человек принимает непосредственное участие в качестве исполнителя и (или) организатора [1]. Таким образом, целесообразно применение

BPM-концепции для реализации качественной индивидуальной и коллективной подготовки специалистов.

2. ПРОЦЕСС КОЛЛЕКТИВНОЙ ПОДГОТОВКИ СПЕЦИАЛИСТОВ

В зависимости от этапа коллективной подготовки специалистов применяются индивидуальные, групповые и коллективные формы обучения.

Индивидуальные формы обучения предполагают персональную работу обучающего с обучаемым или работу обучаемого в составе группы, но по индивидуальному заданию.

Групповые формы обучения применяются при проведении занятий в составе подразделения, отрабатывающего единые учебные вопросы и учебные задачи (нормативы).

Коллективные формы обучения предполагают привлечение больших коллективов, отрабатывающих по единому плану различные учебные вопросы, учебные задачи.

Исходя из этого процесс коллективной подготовки специалистов представляет собой совокупность взаимосвязанных процессов индивидуальной подготовки отдельных специалистов, групповой подготовки и коллективной подготовки в целом.

Очевидно, что для реализации качественной коллективной подготовки специалистов, имеющей неопределенность, необходимо согласование всех процессов подготовки на всех ее этапах. Для этого целесообразно применить методы процессного управления, которые основываются на моделировании процессов деятельности в сложных системах.

Процессный подход к управлению основан на понятии «делового» процесса, представляющего собой конечную совокупность взаимосвязанных, последовательных, регламентированных действий с распределением различных ресурсов. «Деловые» процессы выполняются в условиях различных рисков. В случае реализации рисков цель «делового» процесса может достигаться частично либо не достигается вовсе.

В настоящее время существует множество методологий моделирования «деловых» процессов (BPMN, IDEF, DFD).

Для согласованного и формализованного представления «деловых» процессов коллективной подготовки специалистов целесообразно использовать диаграммы нотации ARIS eEPC, особенностями которой, обеспечивающими их применимость при процессном управлении, являются:

- простота её интерпретируемости;
- достаточно жесткие правила построения диаграмм в нотации;
- наличие в диаграммах «деловых» процессов событий, определяющих ход протекания «деловых» процессов.

Фрагмент процессов индивидуальной подготовки специалиста по различным дисциплинам в нотации ARIS eEPC представлен на рис.1.

Очевидно, что при таком подходе представления процесса коллективной подготовки специалистов «деловой» процесс можно интерпретировать как индивидуальную траекторию обучения специалистов. В зависимости от этапа подготовки индивидуальные траектории обучения должны отражать не только последовательность подготовки отдельных специалистов различных специальностей, но и объединяться в групповую траекторию обучения подразделения.

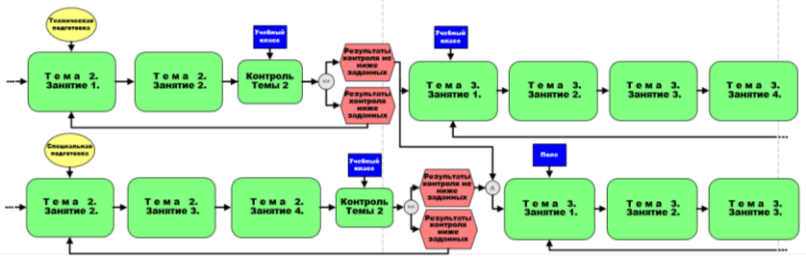


Рис.1. Фрагмент процессов подготовки специалиста по различным дисциплинам

Для качественного информационно-аналитического обеспечения процессного управления при коллективной подготовки специалистов необходимо применение онтологического подхода к построению модели информационных ресурсов.

Онтологическая модель информационных ресурсов в формализованном виде отражает весь справочный материал, необходимый для коллективной подготовки специалистов по различным предметам, включает класс «предмет» (содержит различные предметы обучения), который связан с классами изучаемых тем и занятий для каждой специальности. Содержание каждого занятия разбито на определенное количество элементарных единиц знаний и набор элементарных операций, представляющих собой знания и умения, вырабатываемые в процессе соответствующего занятия. В последующем такая структура занятий используется для проведения текущего контроля освоения учебного материала обучаемыми.

Онтологическая модель информационных ресурсов имеет вид:

$$Or = <T, S, Z, R>,$$

где $T = \{t_1, \ldots, t_n\}$ – множество объектов, характеризующих предметную область; S – множество семантических связей в предметной области; $Z = \{z_1, \ldots, z_n\}$ – множество учебных задач, решаемых специалистами; R – результаты выполнения учебных задач.

3. ПРОФИЛЬ ОБУЧАЮЩЕГО

Для управления процессом коллективной подготовки специалистов и контроля качества достижения целей на каждом этапе подготовки необходимо участие интеллектуального агента, выполняющего функцию обучающего. Интеллектуальным агентом в этом случае может выступать человек или специальная программа выполняющие следующие функции:

- автоматический контроль результатов коллективной подготовки специалистов по индивидуальным траекториям обучения;
- анализ и обобщение результатов контроля процесса подготовки;
- корректировка индивидуальной траектории обучения, то есть ее адаптация в зависимости от результатов подготовки на определенном этапе (реинжиниринг «делового» процесса).

Воздействие интеллектуального агента на процесс коллективной подготовки специалистов осуществляется через профиль обучающего. Профиль обучающего содержит эталонные процессы подготовки (индивидуальные траектории обучения) как отдельных специалистов, так и коллектива в целом (групповые траектории обучения). Кроме того, профиль обучающего содержит правила, по которым в случае необходимости (например, не достижения целей подготовки на определенном этапе) будет изменяться процесс подготовки либо отдельного специалиста, либо всего коллектива.

При актуализации интеллектуального агента на процесс коллективной подготовки специалистов через профиль обучающего «накладывается» эталонный процесс. Путем сопоставления этих двух процессов, а также контроля результатов достижения целей на каждом этапе с использованием определенных правил агентом принимается решение об изменении процесса подготовки или его продолжения без внесения изменений.

4. ПРОФИЛЬ ОБУЧАЕМОГО

Коллективная подготовка специалистов осуществляется при взаимодействии модели процесса подготовки и онтологической модели ресурсов путем обеспечения каждого этапа подготовки определенной информацией (учебными материалами) в соответствии с индивидуальной и (или) групповой траекторией обучения. Обучаемыми

в этом случае выступают как отдельные специалисты, так и коллективы специалистов.

Профиль обучаемого содержит его достижения (знания, умения и навыки), приобретенные в процессе подготовки, а также определенные атрибуты, необходимые для его идентификации при актуализации профиля.

Для определения изменения количества знаний, умений и навыков в процессе подготовки и соответствия обучаемого определенному уровню подготовленности происходит взаимодействие модели процесса подготовки и профиля обучаемого специалиста посредством интеллектуального агента через профиль обучающего. При этом осуществляется сопоставление количества элементарных единиц знаний и элементарных операций, усвоенных обучаемым, текущему этапу процесса подготовки путем «наложения» профиля обучаемого на модель процесса подготовки. При несоответствии текущего уровня подготовленности обучаемого заданному уровню происходит корректировка (реинжиниринг) индивидуальной и (или) групповой траектории обучения.

5. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА КОЛЛЕКТИВНОЙ ПОДГОТОВКИ СПЕЦИАЛИСТОВ

Для реализации вышеизложенного подхода к коллективной подготовке специалистов с помощью методов процессного управления целесообразно использовать инструмент нечетких сетей Петри, которые позволят выявить:

- риск недостижимости определенного выходного элемента «делового» процесса при заданном наборе входных элементов;
- риск не выявить те функции «делового» процесса, которые ранее исполнители могли выполнить, а после корректировки бизнес-процесса не могут выполнить.

При построении модели процесса коллективной подготовки специалистов необходимо преобразовать структуру «делового» процесса в нечеткую сеть Петри с использованием такого подхода, когда каждой функции бизнес-процесса в нотации ARIS eEPC ставится в соответствие позиция сети Петри, а каждому событию – её переход [6].

В процессе подготовки уровень обучаемого соотносится с маркером нечеткой сети Петри. При достижении определенного уровня подготовленности (приобретения определенного количества знаний, умений и навыков) происходит срабатывание переходов нечеткой сети Петри и маркер обучаемого перемещается по сети (обучаемый

переходит к изучению следующей темы, отработке следующего норматива). Если уровень подготовленности обучаемого недостаточен для перехода, то обучаемому предлагается повторить (изучить) необходимый материал или отработать необходимый норматив.

Пример преобразования фрагмента структуры «делового» процесса индивидуальной подготовки специалиста по различным дисциплинам в нечеткую сеть Петри представлен на рис.2.

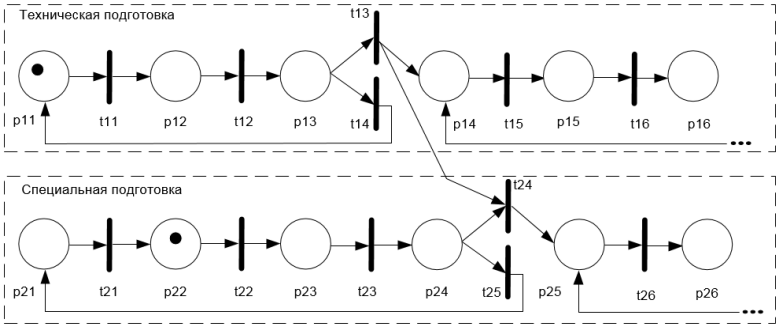


Рис.2. Пример преобразования процессов подготовки специалиста по различным дисциплинам в нечеткую сеть Петри

На рис.2:

- *p*11…*p*16 – позиции нечеткой сети Петри, соответствующие изучаемым темам по технической подготовке;
- *p*21…*p*26 – позиции нечеткой сети Петри, соответствующие изучаемым темам по специальной подготовке;
- *t*11…*t*16, *t*21…*t*26 – переходы нечеткой сети Петри.

6. МЕТОД АДАПТИВНОЙ КОЛЛЕКТИВНОЙ ПОДГОТОВКИ СПЕЦИАЛИСТОВ

Для обеспечения качественной коллективной подготовки специалистов при реализации подходов процессного управления предлагается новый метод (рис.3), отражающий все особенности и специфику коллективной подготовки специалистов.

Данный метод устанавливает систематизированный порядок действий и позволяет описывать новые или усовершенствованные способы (приемы) для учета существенных особенностей коллективной подготовки специалистов в разрабатываемых с его помощью моделях процесса подготовки.

Кроме того, этот метод позволяет проводить формализацию и графическую разработку моделей процесса подготовки, отражающих разнохарактерность его выполнения (согласованность, субъективность, последовательность или отсутствие жесткого порядка), а также связь с различными источниками данных и определенными правилами.

Предложенный метод включает следующие этапы:

- выявление процессов и построение их структуры;
- построение профилей обучаемых и идентификация их свойств (наличия знаний, умений и навыков) относительно эталонов процессов подготовки;
- построение профиля обучающего и правил управления процессами подготовки обучаемых;
- построение моделей процессов подготовки на основе нечетких сетей Петри;
- процесс коллективной подготовки специалистов, который подразумевает взаимодействие обучаемого и обучающего посредством их профилей, которые накладываются на эталонный процесс подготовки (при необходимости с последующей его корректировкой).

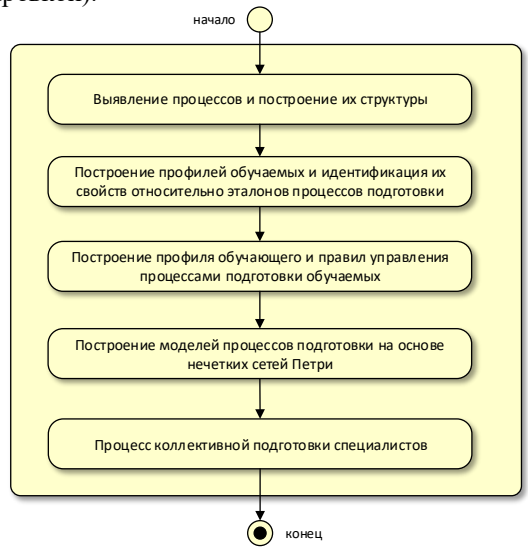


Рис. 3. Обобщенная структура метода адаптивной коллективной подготовки специалистов

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, для решения проблемы организации качественной коллективной подготовки специалистов, необходимо использовать методы процессного управления, реализуемые с помощью нечетких сетей Петри. Применение указанных методов позволит реализовать адаптивный подход к обучаемым специалистам, осуществить согласование процессов подготовки и контроль выполнения задач обучения, как на этапе индивидуальной подготовки, так и на этапе коллективной подготовки, что в свою очередь положительно скажется на эффективности выполнения задач коллективом. Предлагаемый метод адаптивной коллективной подготовки специалистов обеспечивает учет его «социальной природы» при реализации деятельности, характеризующейся неопределенностью, результаты которой могут оказывать влияние на подготовку специалистов в составе подразделений.

Литература

1. Сысков В. В., Борисов В.В. Постановка задачи процессного управления в сложных организационно-технических системах// Известия Смоленского государственного университета. Смоленск: СмолГУ, 2015. № 2/1. С. 301-311.
2. Сысков В. В., Борисов В.В. Подход к построению системы интеллектуального процессного управления для обеспечения эффективной коллективной деятельности // Управление экономическими системами: электронный научный журнал, 2015. №83. URL: http://www.uecs.ru.
3. Чеботарев В.Г., Громов А.И. Эволюция подходов к управлению бизнес-процессами // Бизнес-информатика. 2010. № 1. С. 14-21.
4. Бабкин Э.А., Князькин В.П., Шиткова М.С. Сравнительный анализ языковых средств, применяемых в методологиях бизнес моделирования // Бизнес-информатика. 2011. № 2. С. 31-42.
5. Рогушина Ю.В. Технологии Semantic Web и их использование при разработке интеллектуальных приложений / Ю.В. Рогушина, А.Я. Гладун // ISSN 1727-4907. Проблемы программирования. – 2008. – № 2–3. С. 385-394.
6. Марголин М.С. Анализ существующих способов и средств моделирования бизнес-процессов / М.С. Марголин, Е.В. Сорокин // Международный журнал информационных технологий и энергоэффективности. – 2016. – Т.1 №2 с. 22-38.

УДК 004.8

УПРАВЛЕНИЕ ПРОИЗВОДСТВЕННО-ТЕХНИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ В СЛОЖНЫХ СИСТЕМАХ НА ОСНОВЕ НЕЙРО-НЕЧЁТКИХ СЕТЕЙ ПЕТРИ

***Бобряков А.В.**, д.т.н.*
e-mail: avbob@mail.ru
ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»
***Мисник А.Е.**, к.т.н.*
e-mail: anton@misnik.by
МОУ ВО «Белорусско-Российский университет»
Прокопенко С.А.
e-mail: puss95@yandex.by
ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»

1. ВВЕДЕНИЕ

Организация процесса управления в современных сложных технических системах является актуальной задачей, решение которой существенно затрудняется с увеличением информационных потоков в таких системах. Зачастую специалисты просто не в состоянии охватить все события и явления, происходящие внутри системы, влияющие на систему извне, а также их комбинации. Наблюдается устойчивый рост объёма разнокачественной информации, поступающей из разнородных источников, которая необходима для анализа и выработки управляющих решений в ходе выполнения системой поставленных задач.

Возможным решением является управление сложными системами и производственно-технологическими процессами на основе моделирования [7]. В качестве основы для моделирования предлагается использовать нейро-нечёткую разновидность сетей Петри, которые зарекомендовали себя как удобный, наглядный, и в то же время математически строгий формализм для моделирования и анализа сложных систем и присущих им процессолв. Они позволяют с достаточной степенью детализации и визуализации моделировать процессы, протоколы взаимодействия, а также процессы управления. Сети Петри позволяют естественно описывать синхронизацию,

параллелизм, конфликт и причинную зависимость, а также наглядно представлять структуру и функционирование сложных систем.

2. СЛОЖНЫЕ СИСТЕМЫ И ИХ ПРОИЗВОДСТВЕННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

В качестве примеров сложных систем, можно привести предприятия нефтяной и газовой промышленности, предприятия топливно-энергетического комплекса, системы энергоснабжения (электро-, тепло- и водоснабжение), системы управления энергопотреблением и энергосбережением конечных потребителей, а также предприятия азотной промышленности.

Особенностями таких сложных систем являются:

- сложность структуры, многокомпонентность, наличие функциональных подсистем, решающих различные целевые задачи, большое число параметров, характеризующих производственно-технологические процессы системы [2];
- динамичное изменение структуры и параметров системы;
- неполнота информации о функционировании и состоянии системы;
- разнообразие внешних и антропогенных воздействий на систему;
- наличие сложных нелинейных зависимостей между параметрами;
- сложность принятия управленческих решений по повышению эффективности функционирования системы;
- ограниченные возможности проведения экспериментальных исследований системы и протекающих процессов;
- невозможность использования единого подхода к созданию моделей производственно-технических и информационно-аналитических процессов, протекающих в таких системах.

К особенностям производственно-иехнологических процессов в сложных системах можно отнести следующее:

- большинство производственно-технологических процессов характеризуются непрерывным циклом;
- функциональные подсистемы и их элементы взаимозависимы, кроме того, элементы одной подсистемы могут являться одновременно и элементами другой подсистемы;
- производственно-технологических процессы являются энерго- и ресурсоемкими;
- ряд производственно-технологических процессов относится к категории вредных и опасных (с точки зрения техногенных нарушений и аварийных ситуаций);

- производственно-технологические процессы отличаются высокой сложностью, которая увеличивается по мере повышения требований к эффективности функционирования;
- модели производственно-технологических процессов слабо ориентированы на решение задач управления [4];
- производственно-технологические процессы тесно связаны с информационно-аналитическими процессами.

3. ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В СЛОЖНЫХ СИСТЕМАХ

Информационно-аналитические процессы тесно связаны с производственно-технологическими процессами и необходимы для обеспечения функционирования сложных систем. К информационно-аналитическим процессам относятся процессы сбора, обработки, обобщения, оценки и прогнозирования состояния системы, выработки обоснованных управленческих решений, оценки их реализуемости, эффективности и ресурсосбережения.

Они характеризуются:

- необходимостью обработки больших объемов разнородной слабоструктурированной информации;
- необходимостью учета специфики системы нелинейно зависимых обобщенных и частных показателей;
- высокой динамикой изменения системных и внешних факторов, влияющих на эффективность управления.

В сложных системах параллельно выполняется большое количество информационно-аналитических процессов, отличающихся не только направлением потока данных (ввод и вывод информации), но ориентацией на различные как пересекающиеся, так и независимые предметные области в рамках общей сложной системы.

В большинстве сложных систем количество процессов измеряется сотнями и тысячами, а их проектированием занимаются эксперты в различных областях.

Для описания и проектирования информационно-аналитических процессов в сложных системах используются различные подходы. Чем быстрее и точнее разрабатывается, и модифицируется информационно-аналитический процесс, а также выявляются информационно-аналитические процессы, требующие корректировки, тем меньше времени сложная система затратит на адаптацию к изменившимся условиям [5].

4. МОДЕЛИ И МЕТОДЫ ДЛЯ АНАЛИЗА И УПРАВЛЕНИЯ СЛОЖНЫМИ СИСТЕМАМИ

Для уменьшения временных и материальных издержек, связанных с разработкой или модификацией информационно-аналитических процессов, вызванных изменением параметров системы, внешней среды или изменением параметров информационно-аналитических или производственно-технологических процессов, целесообразно использовать подход, предполагающий моделирование таких процессов. Моделирование предоставляет инструменты глубокого анализа процессов, выполняющихся в системе, а также возможности по оценке влияния на систему или ее окружение изменения того или иного информационно-аналитического процесса.

Моделирование процесса также является важным этапом для анализа и управления разработанным процессом. Использование моделирования помогает обнаружить дефекты процесса, его узкие места, уточнить сложность процесса [9].

Существующие модели, преднгазначенные для анализа и управления сложными техническими системами, как правило, громоздки и трудно поддаются анализу, или их анализ занимает много времени. Большинство таких моделей не обладает достаточной гибкостью и адаптивностью к изменяющимся условиям, а также не учитывают влияние факторов внешней среды. Типовые нейро-нечёткие модели, как правило, не ориентированы на анализ состояний анализируемых процессов и не ориентированы на адаптацию к постоянно изменяющимся производственно-технологическим процессам [8].

В большинстве случаев, задачи моделирования и управления такими системами решаются отдельно друг от друга, а именно существующие модели не ориентированы на анализ, обоснованный выбор и реализацию управляющих воздействий (мероприятий) в ходе производственно-технологических процессов.

Можно сформулировать требования к моделям и методам анализа и управления сложными системами:

- учет иерархической вложенности процессов;
- учет состояния процессов и их развития во времени;
- гибкое задание и изменение условий (в том числе, и временных) управления процессами;
- учет ограничений и рисков (экономических, техногенных и других) нарушения производственно-технологических процессов;
- учет влияния неопределенности системных и внешних факторов;

- учет тесной взаимозависимости производственно-технических и информационно-аналитических процессов;
- возможность оперативного изменения структуры и параметров модели при изменении производственно-технологических и/или информационно-аналитических процессов [6].

5. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СЕТИ ПЕТРИ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ В СЛОЖНОЙ СИСТЕМЕ

Одно из основных достоинств аппарата сетей Петри заключается в том, что они могут быть представлены как в графической форме (это обеспечивает наглядность), так и в аналитической (это позволяет автоматизировать процесс их анализа). В графической интерпретации сеть Петри представляет собой граф особого вида, состоящий из вершин двух типов: позиций и переходов, соединенных ориентированными дугами (ветвями), причем каждая ветвь может связывать лишь разнотипные вершины (позицию с переходом или переход с позицией) [3].

В рамках подхода для моделирования и разработки процессов в сложной системе предлагается использовать разновидностей сетей Петри, включающих темпоральные нейро-нечеткие нейроны Квана и Кэи.

Классический нечеткий нейрон может иметь несколько выходов M, выходные значения формируют степень принадлежности к неким нечетким множествам (рис.1) [1].

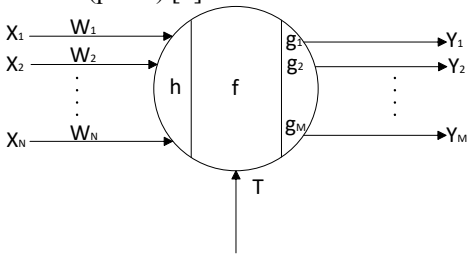


Рис.1. Пример нечеткого нейрона

Для учёта состояня процессов и развития их во времени предложена темпоральная модификация нейрона Квана и Кэи (рис.2).

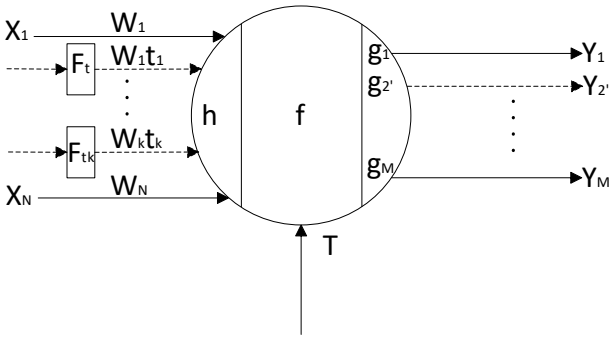


Рис.2. Нечёткий нейрон с темпоральными входами

6. ПРИМЕР МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА В СЛОЖНОЙ СИСТЕМЕ

Рассмотрим схему управления процессом нефтепереработки (рис.3).

Процесс работы нефтеперабатывающего предприятия во многом зависит от типа нефти, которая поступает. Нефть состоит из большого количества разных углеводородов. Их молекулы различаются массой, которая, в свою очередь, определяется количеством составляющих их атомов углерода и водорода. Чтобы получить тот или иной нефтепродукт, нужны вещества с совершенно определенными характеристиками. Каждая партия нефти, которая поступает на завод различна по своему химическому составу.

Существующую схему производственно-технологического процесса состоит из двух основных частей:

- Технологическое оборудование (нижняя часть рисунка) на котором протекает технологический процесс переработки нефти. Поступающие сырье проходит подготовку через обессоливающею установку, после нагревается и поступает в установку атмосферной дистилляции разделении нефти на фракции, путем многократного испарения и конденсации паров, проводящийся при нормальном (атмосферном) давлении. После каждая фракция обрабатывается в соответствии со своим технологически-производственным процессом.
- Система управления (верхняя часть рисунка), которая состоит из блока фильтрации входных данных, а также из блоков автоматического и ручного управления процессами. На данной схеме в контур управления введена модель системы (включающая

тесно взаимодействующие через шину данных модель производственно-технологического процессов, протекающих в системе и соответствующую модель информационно-аналитических процессов, используемую для анализа и управления системой). Также в схему введена система поддержки принятия управляющих решений, подключенная к выходам модели и формирующая варианты решений для оператора.

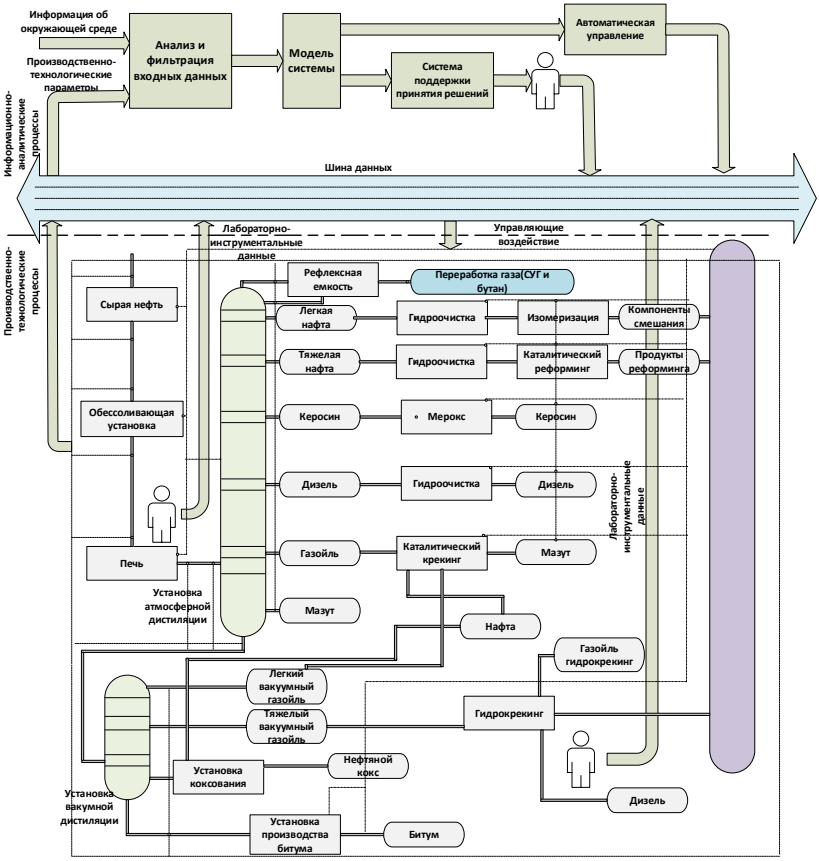


Рис.3. Схема производственно-технологического процесса переработки нефти

Модель производственно-технологического и информационно-аналитического процессов на основе нейро-нечёткой сети Петри можно представить следующим образом (рис. 4)

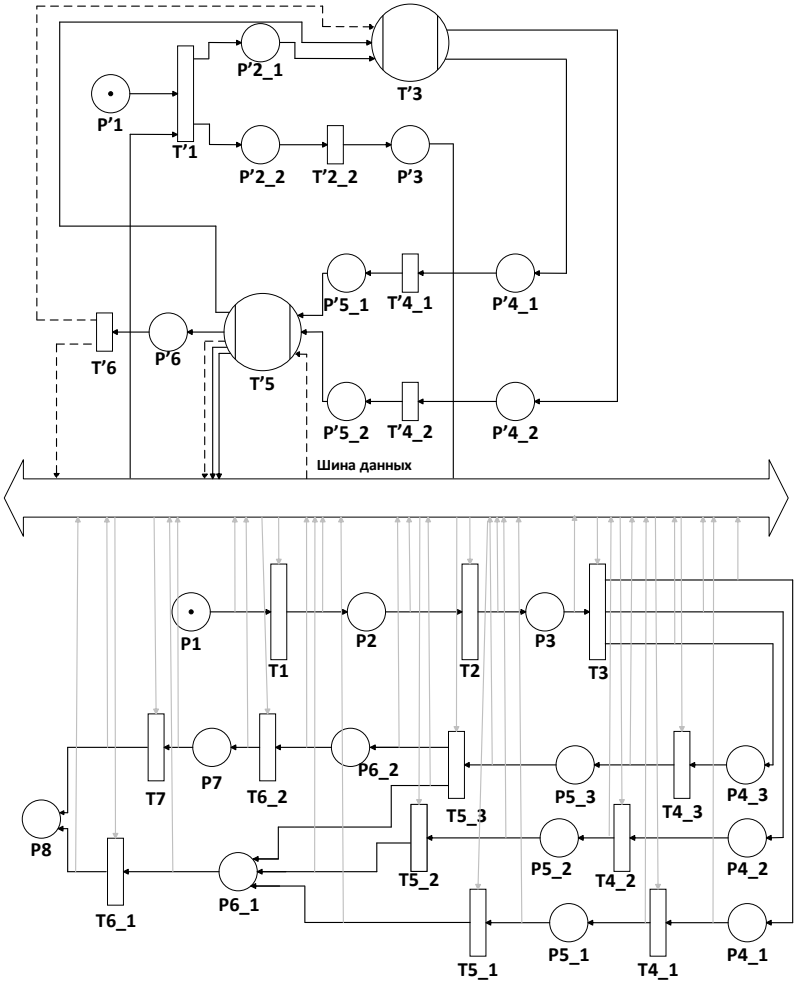


Рис.4. Модель производственно-технологического и информационно-аналитического процессов на основе нейро-нечёткой сети Петри

Нейро-нечёткая сеть Петри может быть представлена следующим образом:

$$NPN=(P,T,I,O,A,PR,FP,f,\alpha,m\_0,n,\mu),$$

где:

- $P = \{p1,p2,\ldots,pn\}$- конечное непустое множество позиций сети Петри;
- $T = \{t1,t2,\ldots,tm\}$- конечное непустое множество переходов сети Петри;
- I – входная функция переходов;
- O – выходная функция переходов;
- A – конечное множество дуг;
- PR – конечное множество приоритетов, определяющих порядок срабатывания переходов в случае наличия нескольких активных переходов;
- FP – функция, которая присваивает каждому переходу приоритет срабатывания $FT:T\text{->}PR;$
- $F = \{f1,f2,\ldots,fn\}$-вектор значений функции нечеткого срабатывания переходов;
- $\alpha = \{\alpha1,\alpha2,\ldots,\alpha n\}$- вектор значений срабатывания перехода;
- $m0$ – вектор начальной маркировки, каждая компонента которого определяется значением функции принадлежности нечеткого наличия одного маркера в соответствующей позиции. Где множество все возможных маркировок сети
- $M \cong \{m{:}m{:}P\rightarrow(U\text{^}((\dashv)\,)\cup\{\emptyset\})\times R\};$
- $n = \{n1,n2,\ldots,pm\ \}$- конечное множество целочисленных значений меток, которое необходимо для срабатывания перехода;
- $\mu = (\mu1,\mu2,\ldots,\ \mu n)$ –вектор маркировки сети.

7. СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОЕ ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Разработано специализированное программное обеспечение в рамках которой возможно моделирование производственно-технологических и реализация информационно-аналитических процессов сложной системы, обладающая следующими возможностями:

- формирование онтологической модели сложной системы, включающей классы информационных сущностей и квазиерархические связи между ними;
- ввод и хранение пользовательских и получаемых из внешних источников данных;

- использование нейросетевого супервизора для валидации внешних и аналитических данных;
- построение информационно-аналитического процесса с использованием механизмов конструкторов на основе нейро-нечетких сетей Петри;
- гибкая настройка управления приоритетами конкурирующих за ресурсы информационно-аналитических процессов на основе аппарата нейро-нечётких сетей Петри.

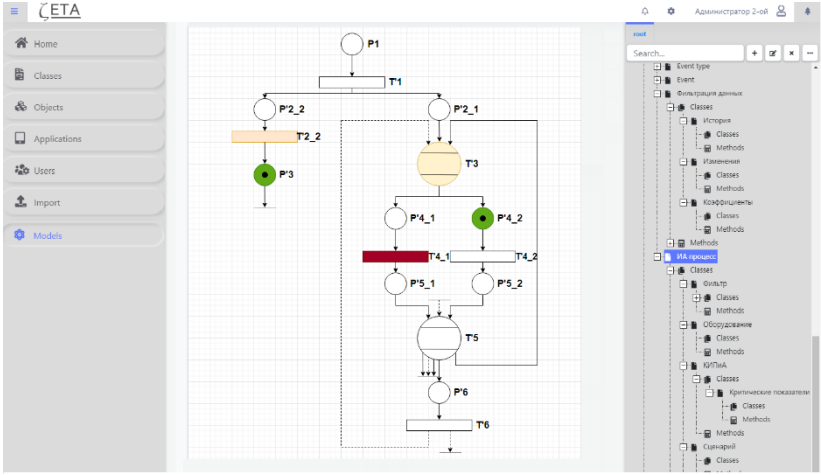


Рис.5. Экранная форма специализированного программного обеспечения для моделирования производственно-технологических процессов

8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для эффективного функционирования в рамках сложной системы производственно-технологические процессы поддерживаться соответствующими информационно-аналитическими процессами, обеспечивающими сбор и анализ информации, а также моделирование и принятие управляющих решений для производственно-технологического процесса.

Предложена разновидность нейро-нечёткий сетей Петри с темпоральными нечёткими нейронами.

Рассмотрен пример построения модели производственно-технологического процесса и соответствующих информационно-аналитических процессов.

Рассмотрено разработанное специализированное программное обеспечение для моделирования производственно-технологических процессов и реализации информационно-аналитических процессов.

Литература

1. H. K. Kwan, L. Y. Cai. «A fuzzy neural network and its application to pattern recognition», IEEE Trans. Fuzzy Systems 2 (1994): 185-193.
2. A. V. Bobryakov, V. V. Borisov, A. E. Misnik and S. A. Prokopenko, «Approaches to the Implementation of Information-Analytical Processes in Complex Technical-Organizational Systems,» 2020 V International Conference on Information Technologies in Engineering Education (Inforino), Moscow, Russia, 2020, pp. 1-5, doi: 10.1109/Inforino48376.2020.9111833. https://ieeexplore.ieee.org/document/9111833.
3. J. Wu, S. Yan, «Reliability Evaluation for Mechanical Systems by Petri Nets», Petri Nets in Science and Engineering 2018, 87-93.
4. Jensen C.S., Soo M.D., Snodgrass R.T. Unifying Temporal Data Models Via a Conceptual Model, Information Systems Vol. 19, No. 7, 1994, pp. 513-547.
5. A. E. Misnik, S. A. Prakapenka and V. V. Kutuzov, "Development of Information-Analytical Processes in Cyber-Physical Systems Based on Neural-Fuzzy Petri Nets," 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon), Vladivostok, 2020, pp. 1-6, doi: 10.1109/FarEastCon50210.2020.9271400. https://ieeexplore.ieee.org/document/9271400.
6. Borisov V., Luferov V. Forecastinging of Multidimensional Time Series Basing on Fuzzy Rule-Based Models. Proceedings of the 21th International Conference: «Complex Systems: Control and modeling problems», 2019, vol. 2, pp. 217-220.
7. Борисов В. В., Круглов В. В., Федулов А. С. Нечеткие модели и сети. – М.: Горячая линия–Телеком, 2018. – 284 с.
8. Бобряков А.В., Борисов В.В., Мисник А.Е., Прокопенко С.А. Нейро-нечеткие сети Петри для разработки и управления информационно-аналитическими процессами в кибер-физических системах // Мягкие измерения и вычисления – 2020. №8. – С. 38-50.
9. Захарченков К. В., Мрочек Ж. А., Мрочек Т. В. Алгоритм решения многокритериальной задачи планирования производства труб и фасонных изделий // Системный анализ и прикладная информатика. – 2018. – № 4. – С. 4-10.

УДК 621.311: 681.518

ФАЗЗИ-МОДЕЛИ КАК СРЕДСТВО РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ОЦЕНИВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ МИКРОЭНЕРГОСИСТЕМЫ

Абд Эльрахим А.К.
e-mail: aminkamal90@hotmail.com
***Шихин В.А.**, к.т.н.*
e-mail: ShikhinVA@mpei.ru
ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время вопрос проектирования высокоэффективных локальных энергосистем, в том числе включающих разнотипные возобновляемые источники энергии (ВИЭ) и накопители энергии, является актуальным, особенно при рассмотрении совокупности технических, экономических и экологических показателей функционирования. При этом повышение их эффективности связано как с функционированием таких микроэнергосистем в целом, так и её отдельных субъектов.

При рассмотрении задач оценивания и повышения эффективности подобных систем, неодходимо читывать совокпность показателей эффективности их функционирования, которые, в общем случае, являются разнородными и разнонаправленными. Решение многокритериальных задач, связанных с многоцелевым управлением, при наличии противоречивых критериев и с неравновесным распределением критериев между разнородными субъектами динамической системы можно связать с мультиагентным представлением исходной системы. Мультиагентная (МАС) форма представления и исследования многокомпонентных динамических систем, таких как микроэнергосистем, находит всё большее применение [1–3], позволяя создавать иерархические системы управления на основе распределения функций управления между автономными и кооперативными агентами, реализуя такие важные характеристики, как модульность, гибкость, надёжность, реконфигурируемость и т. п.

Микроэнергосистеме [4] как объекту управления присущи следующие особенности: единое объединение разнородных распределенных и централизованных источников энергии, возобновляемых источников энергии, накопителей энергии и разнотипных потребителей. При этом микроэнергосистема должна обеспечивать надёжное снабжение потребителей при условии полного отделения от централизованного источника, т.е. в изолированном режиме. Важно отметить, что микроэнергосистема представляет собой комбинацию управляемых и неуправляемых источников энергии, что затрудняет достижение баланса мощности, повышает актуальность регулирования напряжения и соотношения активной и реактивной мощности в распределительной сети. Следует отметить, что в рамках микроэнергосистем решения по управлению каким-либо субъектом оказывают, как правило, существенное влияние на принимаемые решения по отношению к другим субъектам, а приоритет отдается в пользу децентрализованного управлении.

В данной работе предлагается подход к формулировке и решению задачи комплексного оценивания эффективности функционирования динамической системы на примере микроэнергосистемы в мультиагентном представлении на основе унифицированного определения агентов и с использованием фаззи-моделей. Предложенное решение позволяет формализовать процесс интеграции разнородных целевых функций в единые критерии по определенным типам, а также с учётом оценок эффективности функционирования отдельных субъектов во взаимосвязанной системе. В качестве типовых критериев эффективности рассмотрены технические, экономические и экологические критерии. С целю получения обобщённого решения, и с учётом разнородности рассматриваемых критериев эффективности, в качестве инструмента свертки критериев предложено применить фаззи-модель, разрабатываемую на основе теории нечетких множеств. Схема алгоритма оценки эффективности функционирования микроэнергосистемы построена на примере проектирования гибридно-генерирующей и экологически безопасной системы энергоснабжения арктического анклава заданной конфигурации.

2. МУЛЬТИ-АГЕНТНОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ МИКРОЭНЕРГОСИСТЕМЫ

На рис.1 приведено формализованное представление агента, предложенное в данной работе с учётом основных функциональных черт, присущих агенту: рассуждение, самонастройка, самооптимизация,

коммуникабельность, активность. В таблице 1 приведен перечень агентов, отражающих основные субъекты микроэнергосистемы, который может быть расширен для более подробного описания или в связи с конкретными специфическими чертами рассматриваемой системы.

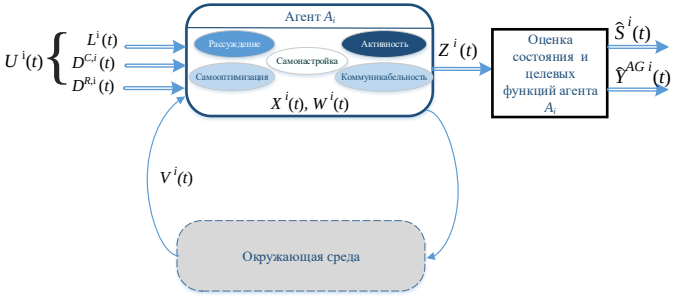


Рис.1. Формализованное представление агента МАС

На рис.1 использованы следующие обозначения: $U^i(t)$ – вектор входных ограничений и уставок, связанный с функциональной чертой «коммуникация», при этом $U^i(t) = [L^i, D^{C,i}, D^{R,i}]^T$, где L – технологические ограничения агента; $D^{C,i}$ – вектор входных команд; $D^{R,i}$ – вектор входных рекомендаций; $Z(t)$ – вектор выходных переменных, характеризующих протекание физических процессов во времени, по которым идентифицируется состояние агента; $S(t)$ – вектор состояний агента, связанный с его функциональной чертой «активность», а также показатели качества его функционирования Y^{AG}; $X(t)$ – вектор параметров и событийно-изменяющихся констант агента, связанный с его функциональными чертами «самонастройка» (в отношении параметров) и «рассуждение» (в отношении констант); $W(t)$ – вектор внутренних генерируемых управлений агента, связанный с его функциональной чертой «самооптимизация»; $V^i(t)$ – вектор возмущающих воздействий (неконтролируемых).

Таблица 1. Формализованные агенты и их функциональность в составе МАС-микрогрид

Агент, A_i	Функциональность, F_{ij1}	Агент, A_i	Функциональность, F_{ij}
1. Центр управления и связи (ЦУС) микрогрид, , агент A_1	$F_{1,1}$ – ответственность за управление микрогрид; $F_{1,2}$ – отслеживание и планирование режимов распределенных и возобновляемых источников энергии;	5. Возобновляемые источники энергии (ВИЭ): солнечная электростанция (СЭС), агент A_5	$F_{5,1}$ – ответственность за генерацию соответствующей СЭС

	$F_{1,3}$ – прогнозирование генерируемой мощности соответствующего источника ВИЭ; $F_{1,4}$ – прогнозирование состояния накопителей энергии; $F_{1,5}$ – стабилизация частоты; $F_{1,6}$ – обеспечение динамической устойчивости	6.Возобновляемые источники энергии (ВИЭ): ветровая электростанция (ВЭС), агент A_6	$F_{6,1}$ – ответственность за генерацию соответствующей ВЭС
		7. Система накопления энергии (СНЭ), агент A_7	$F_{7,1}$ – участие в покрытии дефицита мощности; $F_{7,2}$ – участие в поглощении избытка мощности; $F_{7,3}$ – участие в регулировании частоты; $F_{7,4}$ – повышение динамической устойчивости
2.Распределительная электросеть (РЭС), включающая подстанцию, агент A_2	$F_{2,1}$ – ответственность за внешнее по отношению к микрогрид электроснабжение, $F_{2,2}$ – прием излишков электроэнергии от микрогрид во внешнюю электросеть	8. Спрос потребителя (ПЭЭ), агент А8	$F_{8,1}$ – целевое использование электроэнергии
		9. Спрос ценозависимого потребителя (ЦЗП), агент А9	$F_{9,1}$ – целевое использование электроэнергии; $F_{9,2}$ – участие в регулировании мощности
3. Распределенные дизель-генераторные установки (ДГУ), агент A_3	$F_{3,1}$ – ответственность за генерируемую мощность соответствующего распределённого генератора или группы генераторов	10. База данных реального времени (БДРВ), агент A_{10}	$F_{10,1}$ –сбор, хранение, обмен данными и архивами
4. Распределенные газопоршневые установки (ГПУ), агент A_4	$F_{4,1}$ – ответственность за генерируемую мощность соответствующего распределённого генератора или группы генераторов	11. Система имитационного моделирования (SIM), агент A_{11}	$F_{11,1}$ – моделирование, тестирование режимов функционирования микрогрид

3. ФОРМУЛИРОВКА ЦЕЛЕВЫХ ФУНКЦИЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ МИКРОГРИД

Большинство известных из литературы [5-8] подходов к решению оптимизационных задач применительно к управлению микрогрид формулируется в рамках однокритериальной постановки, но в то же время имеются формулировки оптимизационных задач в многокритериальной постановке [9, 10]. Однако во всех этих подходах осуществляется сведение многокритериальной задачи к скалярному

случаю, включая формальное объединение технических и экономических показателей, что, по мнению большинства отраслевых экспертов в области создания и эксплуатации микроэнергосистем, недопустимо [11]. Эффективность функционирования микроэнергосистемы не рекомендуется оценивать единым интегрированным показателем и, как минимум, следует подразделять на относительно обособленное рассмотрение технической и экономической эффективности с введением соответствующих целевых показателей и групп критериев. Это является особенностью подхода в данной работе.

Кроме того, предложенное в работе мультиагентное представление микроэнергосистемы позволяет перейти к совокупному учёту показателей эффективности как отдельных агентов, так и системы в целом.

Основные критерии эффективности функционирования микроэнергосистемы представлены в таблице 2. На основе этих критериев были сформулированы целевые функции эффективности функционирования микроэнергосистемы.

Таблица 2. Формализованные агенты и их функциональность в составе МАС-микрогрид

Критерий эффективности функционирования	Целевая функция (ЦФ)	Оптимизационная задача на *min* или *max*	Входные переменные и параметры	Допустимый предел погрешности измерений
1. Критерий технической эффективности, $Y_{ТЭ}^{SYS}$	1.1. Отклонение режима процесса генерации $y_1^{SYS} \triangleq \lvert\Delta P^{Total}\rvert$	Min	1.1.1 актуальное значение генерируемой мощности, P^{Total}; 1.1.2. регламентируемое (планируемое) значение генерируемой мощности, $P_{Plan}{}^{Total}$	1 %
	1.2. Отклонение от ожидаемой доли энергии, произведённой из ВИЭ $y_2^{SYS} \triangleq \lvert\Delta P^{ВИЭ}\rvert$	Min	1.2.1. актуальное значение генерируемой ВИЭ мощности, $P^{ВИЭ}$; 1.2.2. регламентируемое (планируемое) значение генерируемой ВИЭ мощности, $P_{Plan}{}^{ВИЭ}$	1 %
	1.3. Индекс средней продолжительности отключения одного потребителя, $y_3^{SYS} \triangleq$ CAIDI	Min	1.3.1. Суммарное время отключения потребителей, T_Σ; 1.3.2. Общее число отключений, OUT_Σ	1 %
	1.4. Индекс средней продолжительнос	Min	1.4.1. суммарное время отключения потребителей T_Σ	1 %

	ти перерыва в электроснабжении потребителей $y_4^{SYS} \triangleq$ SAIDI		1.4.2. общее количество потребителей N_Σ	
	1.5. Индекс средней частоты перерывов в электроснабжении потребителей $y_5^{SYS} \triangleq$ SAIFI	Min	1.5.1. Общее число отключений, OUT_Σ; 1.5.2. Общее количество потребителей, N_Σ	1 %
	1.6. Неудовлетворенный спрос на электроэнергию y_3^{SYS} $y_6^{SYS} \triangleq$ DNS	Min	1.6.1. Общий спрос на электроэнергию, D^{Total}; 1.6.2. Общая выдаваемая мощность, P^{Total}	1 %
2. Критерий экономической эффективности, $Y_{ЭЭ}^{SYS}$	2.1.Стоимость генерируемой электроэнергии $y_7^{SYS} \triangleq C^{EN}$	Min	2.1.1. Стоимость топлива, C^F; 2.1.2. Расходы на эксплуатацию и техническое обслуживание, C^{OM}; 2.1.3. Плата / штрафы за выброс загрязняющих веществ, C^{PO}	10 %
	2.2. Цена для потребителя $y_8^{SYS} \triangleq PR$	Min	2.2.1. Фиксированный многозонный тарифный график	1 %
	2.3.Прибыль владельца микроэнергосистемы $y_9^{SYS} \triangleq REV$	Max	2.3.1. Цена продажи электроэнергии, Pr^C; 2.3.2 Объем проданной электроэнергии, P^{MG}	5 %
	2.4. Отклонение режима процесса генерации $y_1^{SYS} \triangleq \lvert\Delta P^{Total}\rvert$	Min	2.4.1 актуальное значение генерируемой мощности, P^{Total}; 2.4.2. регламентируемое (планируемое) значение генерируемой мощности, $P_{Plan}{}^{Total}$	1 %
3. Экологичность $Y_{ЭКО}^{SYS}$	3.1.Количество выбросов парниковых газов (углекислый газ) $y_{10}^{SYS} \triangleq CO_2$	Min	3.1.1. Фактическое потребление топлива, M^{fuel}; 3.1.2. Объем выбросов углекислого газа, PO^{CO_2}	10 %
	3.2.Количество выбросов парниковых газов (оксиды азота) $y_{11}^{SYS} \triangleq$ NOX	Min	3.2.1. Фактическое потребление топлива, M^{fuel}; 3.2.2. Объем выбросов оксидов азота, PO^{NOX}	10 %
	3.3. Отклонение от ожидаемой доли энергии, произведённой из ВИЭ $y_2^{SYS} \triangleq \lvert\Delta P^{ВИЭ}\rvert$	Min	3.3.1. актуальное значение генерируемой ВИЭ мощности, $P^{ВИЭ}$; 3.3.2. регламентируемое (планируемое) значение генерируемой ВИЭ мощности, $P_{Plan}{}^{ВИЭ}$	1 %

4. РАЗРАБОТКА ОБЩЕЙ СХЕМЫ ОЦЕНИВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ МИКРОГРИД НА МНОЖЕСТВЕ ЦЕЛЕВЫХ ФУНКЦИЙ И КРИТЕРИЕВ

Принимая во внимание вышеопределенные специфики задачи оценки эффективности предлагается процесс её решения разбить на несколько этапов, как это представлено на рис.2.

На этапе 1 (рис.2) решается задача выбора таких моделей описания агентов, которые адекватно соответствуют исследуемым целевым функциям (ЦФ) и отвечают ограничениям по точности (таблица 2) и информативности:

$$\mathrm{MO}^{\mathrm{A_i}} \overset{\varepsilon_i}{\underset{\Theta_i}{\leftrightarrow}} \mathrm{y}_j^{SYS} \tag{1}$$

На этапе 2 производится синтез имитационной мультиагентной модели исследуемой системы с учетом специфики каждой ЦФ y_j^{SYS}, j= *1-11* из четырех групп критериев, указанных в таблице 2.

Оценка показателей эффективности осуществляется параллельно с расчётом точности оценивания e_j, что является важной выходной информацией. В синтезированной мульти-агентной модели описания отдельные агенты функционируют в условиях взаимодействия соответствующих моделируемых общесистемных процессов, что позволяет произвести оценку их собственных ЦФ y_j^{AG} и решать задачи по самооптимизации и самонастройке (см. рис.1).

Этап 3 соответствует решению задачи получения численной оценки эффективности функционирования микроэнергосистемы, сочетающей все три предложенных общесистемных критерия. По полученным оценкам показателей осуществляется расчёт оценки соответствующих критериев эффективности для системы в целом (таблица 2) Y_k^{SYS}, k = 1-3 а также значений индивидуальных показателей эффективности функционирования отдельных агентов y_j^{AG}. Представленная на рис.2 схема отражает формализованный процесс интеграции разнотипных ЦФ в установленные критерии.

На рис.2 РЭС-агент – распределительная электрическая сеть; ДГУ-агент – дизель-генераторная установка; ГПУ-агент – газопоршневая установка; СЭС-агент – солнечная электростанция; ВЭС-агент – ветровая электростанция; СНЭ-агент –система накопления энергии; ПЭЭ-агент – спрос потребителя; ЦЗП-агент – спрос ценозависимого потребителя; ε_i – точность модели агента A_i; Θ_i – информативность модели агента A_i; e_k – погрешность расчета целевой

функции y_k^{SYS}; c_{yk} – весовой коэффициент целевой функции y_k^{SYS}; *ИМ* – имитационная модель; БД – база данных.

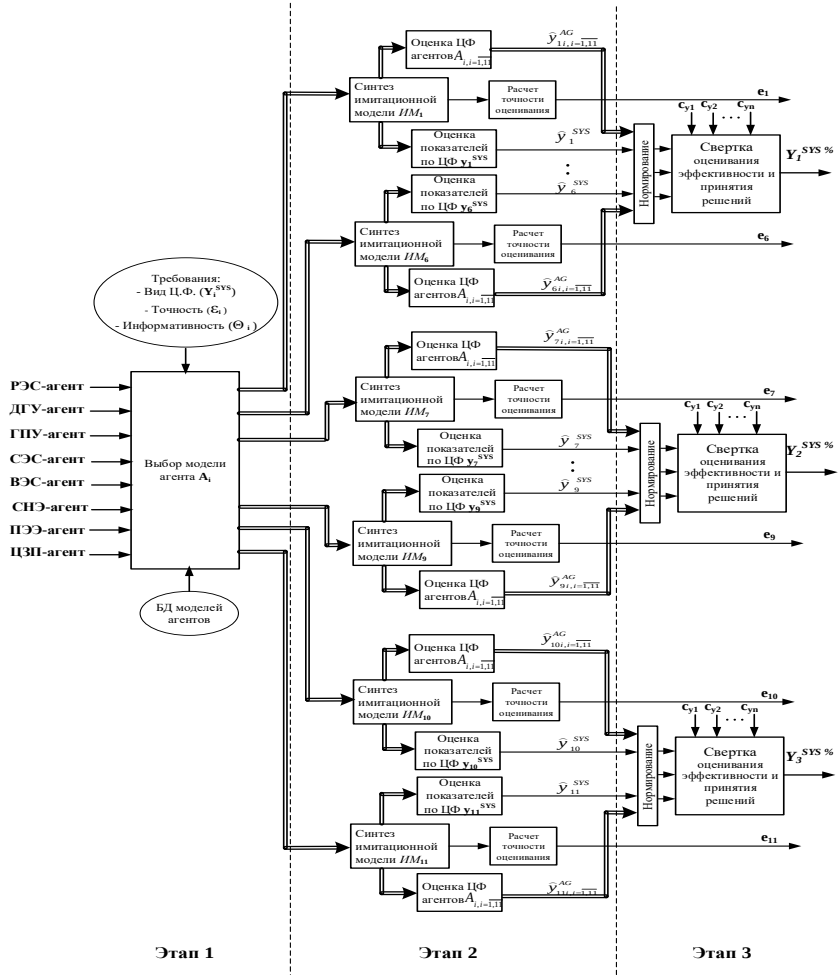


Рис.2. Решение задачи оценивания эффективности функционирования микроэнергосистемы

5. РАЗРАБОТКА ФАЗЗИ-МОДЕЛЕЙ ОЦЕНИВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОЙ, ЭКОНОМИЧЕСКОЙ И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ МИКРОГРИД

Предлагается произвести свёртку многокритериальной задачи оценивания эффективности на основе фаззи-моделей. Подобный подход позволяет преобразовать классическую задачу определения весовых коэффициентов для отдельных критериев заменив ее на получение единой комбинации разнотипных и разно-размерных показателей в форме модели нечёткого логического вывода.

Основой для проведения операции нечеткого логического вывода являются решающие правила и функции принадлежности. Алгоритмы нечеткого вывода различаются главным образом видом используемых правил, логических операций и разновидностью метода дефаззификации. В модели Мамдани значения выходных переменных задаются нечеткими множествами, т.е. в композиции производится объединение найденных усеченных функций, что приводит к получению итогового нечеткого подмножества для переменной выхода с функцией принадлежности, в отличии от других моделей, например, модели Сугено, где заключения правил, задаются не нечеткими термами, а линейной функцией от входов, и модели Цукамото, где определяются четкие значения для каждого из исходных правил, и затем определяется четкое значение переменной вывода. Указанное свойство модели Мамдани позволяет упрощать процесс вычисления в системе нечёткого логического вывода. Следует отметить, что существуют и другие модели (кроме Мамдани), где также находится итоговое нечеткое подмножество с функцией принадлежности, как, например, в модели Ларсена.

В данной работе предложено использовать модель Мамдани, как одну из наиболее распространенных и, в сравнении с другими подходами, позволяющую избегать большого объёма вычислений при отсутствии жестких ограничений на точность получаемых результатов. При этом также достигается достаточная прозрачность логического вывода.

Комплексная оценка эффективности позволяет определить ситуации, где необходимо принимать решения в виде управляющих команд и рекомендаций для улучшения эффективности функционирования микроэнергосистемы, т.е. когда значение показателей эффективности является ниже требуемого. На рис.3 в качестве примера представлена модель свёртки многокритериальной задачи оценивания технической эффективности.

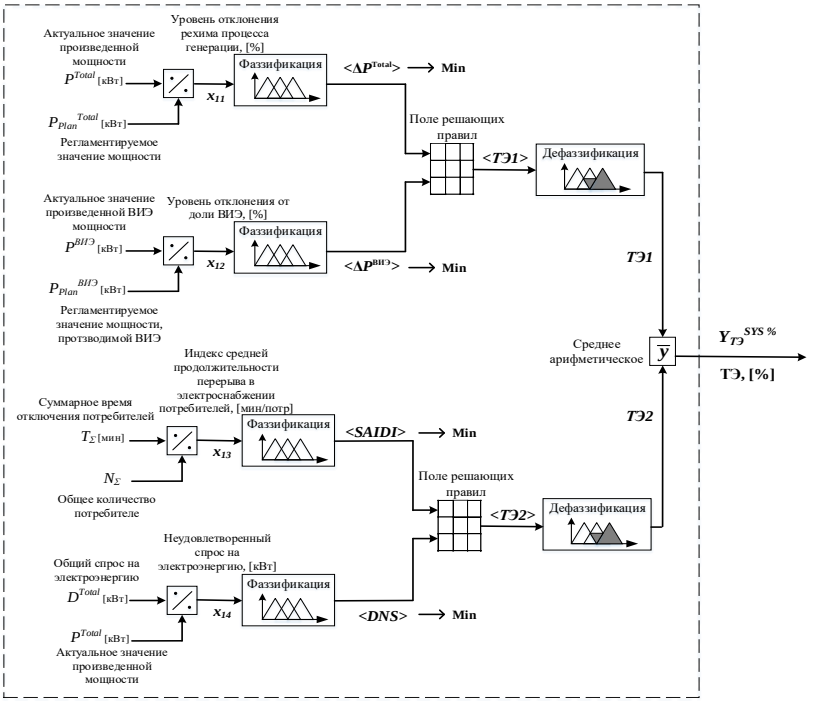


Рис.3. Модель свёртки многокритериальной задачи оценивания технической эффективности (ТЭ)

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленный комплекс моделей по решению задачи оценивания технической, экономической и экологической эффективности функционирования микроэнергосистемы в мультиагентном представлении позволяет свести решение задачи сведении оценки эффективности функционирования микрогрид к исследованию обобщённой математической модели микроэнергосистемы на основе моделей отдельных субъектов системы.

Разработаны фаззи-модели в качестве инструмента свёртки разнородных и разнонаправленных показателей эффективности на основе теории нечётких множеств. Такое решение позволило преодолеть сложность определения приоритетности и получения весов для разнородных и разнонаправленных критериев и целевых функций сведя задачу к получению числительных (в процентном выражении) оценок технической, экономической и экологической эффективности.

Литература

1. McArthur, S.D.J. Multi-agent systems for power engineering applications – part 1 : Concepts, approaches and technical challenges / S.D.J. McArthur, E.M. Davidson, V.M. Catterson, A.L. Dimeas, N.D. Hatziargyriou, F. Ponci, T. Funabashi // IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 22, No. 4, 11.2007. – pp. 1743-1752.
2. Abd Elraheem, A.K. Optimization Problem Statement for Power Generation Management and Control in Multi-Agent Microid / A.K. Abd Elraheem, V.A. Shikhin, A. Kouzalis // 2019 III International Conference on Control in Technical Systems (CTS), St. Petersburg, Russia, 2019, – pp. 176-179.
3. Gregor, R. Multi-agent systems' asset for smart grid applications / R. Gregor, J.J. Hahnel, B. Pascal, F. Simon // Computer Science and Information Systems, Volume 10, Issue 4, 2013. – pp. 1799-1822.
4. Marnay, C. Microgrid Evolution Roadmap / C. Marnay, S., Chatzivasileiadis, C. Abbey, R. Iravani, G. Joos, P. Lombardi, P. Mancarella, Jan von Appen // in: 2015 International Symposium on Smart Electric Distribution Systems and Technologies (EDST), 2015. – pp. 139-144.
5. Luis, I. Review of Optimal Control Techniques Applied to the Energy Management and Control of Microgrids / I. Luis, Minchala-Avila, E. Luis, A. Vargas-Martınez, and Y. Zhangc, // Procedia Computer Science 52, 2015. – pp. 780-787.
6. Nafisi, H. Two-stage optimization method for energy loss minimization in microgrid based on smart power management scheme of phevs / H. Nafisi, M. M. Agha, H. A. Abyaneh, and M. Abedi, // IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 7, no. 3, May 2016. – pp. 1268-1276.
7. Dulau, L.I. Optimization of Generation Cost in a Microgrid / L.I. Dulau, D. Bica // Procedia Manufacturing, vol. 22, 2018. – pp. 703-708.
8. Kong, X. Day-ahead optimal scheduling method for grid-connected microgrid based on energy storage control strategy / X. Kong, L. Bai, Q. Hu, F. Li, C. Wang // Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, vol. 4, 2016. – pp. 648-658.
9. Tian, P. A Hierarchical Energy Management System Based on Hierarchical Optimization for Microgrid Community Economic Operation / P. Tian, X. Xiao, K. Wang, R. Ding, // IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 7, issue 5, Sept. 2016. – pp. 2230-2241.
10. Dehghanpour, K. Real-Time Multiobjective Microgrid Power Management Using Distributed Optimization in an Agent-Based Bargaining Framework / K. Dehghanpour, H. Nehrir, // IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 9, issue. 6, Nov. 2018. – pp. 6318-6327.
11. Постановление Правительства РФ От 19 декабря 2016 г. № 1401 «О комплексном определении показателей технико-экономического состояния объектов электроэнергетики, в том числе показателей физического износа и энергетической эффективности объектов электросетевого хозяйства, и об осуществлении мониторинга таких показателей». № 1401. Москва, 2016. – 21 с.

СЕКЦИЯ 2 **ВОЗМОЖНОСТНЫЕ И ВЕРОЯТНОСТНЫЕ МОДЕЛИ: ТЕОРИЯ И ПРИЛОЖЕНИЯ**

УДК 519.8

ЗАДАЧА ВОЗМОЖНОСТНО-ВЕРОЯТНОСТНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ С ОГРАНИЧЕНИЯМИ ПО ВОЗМОЖНОСТИ/НЕОБХОДИМОСТИ – ВЕРОЯТНОСТИ И ВЕРОЯТНОСТИ – ВОЗМОЖНОСТИ/НЕОБХОДИМОСТИ*

***Язенин А.В.**, д.ф.-м.н.*
e-mail: yazenin.av@tversu.ru
***Солдатенко И.С.**, к.ф.-м.н.*
e-mail: soldis@tversu.ru
ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»

1. ВВЕДЕНИЕ

Предлагаемая статья продолжает исследования, начатые в [1], и посвящена проблеме оптимизации в условиях гибридной неопределенности возможностно-вероятностного типа. Ее результаты находят применение при построении и исследовании обобщенных моделей портфельного анализа, в экономико-математическом планировании и других областях.

Разрабатываемые непрямые методы решения задач указанного класса, рассматриваемых в контексте сильнейшей *t*-нормы, описывающей взаимодействие нечетких параметров, основаны на

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект №20-01-00669

построении их эквивалентных детерминированных аналогов. Для этого применяются двухуровневые процедуры для снятия неопределенности вероятностного и нечеткого типов, основанные на принципах ожидаемой возможности [2-9, 24] и выполнении ограничений по возможности/необходимости и вероятности.

В отличие от [1], где исследована модель при ограничениях по возможности/необходимости – вероятности, в данной работе исследуется проблема возможностно-вероятностного линейного программирования при ограничениях по вероятности – возможности/необходимости. В классе нормальных возможностных распределений, характеризующих нечеткие параметры модели, и при нормально распределенных случайных параметрах в сдвиг-масштабном представлении нечетких случайных величин построен эквивалентный стохастический аналог модели. Исследованы свойства построенной эквивалентной модели. Полученные результаты применены при построении модели портфеля минимального риска.

2. НЕОБХОДИМЫЕ ПОНЯТИЯ И ОБОЗНАЧЕНИЯ

В контексте работ [10-15] введем ряд определений и понятий из теории возможностей. Пусть далее (Г, Р(Г), τ) и (Ω, В, **P**) есть возможностное и вероятностное пространства, соответственно, в которых Ω – пространство элементарных событий $\omega \in \Omega$, Г – модельное пространство с элементами $\gamma \in \Gamma$, В – σ-алгебра событий, Р(Г) – множество всех подмножеств Г, $\tau \in \{\pi, \nu\}$, π и ν – меры возможности и необходимости, соответственно, а **P** – мера вероятности; $\mathbb{E}^1$ – числовая прямая.

Определение 1. *Нечеткая случайная величина $Y(\omega,\gamma)$ есть вещественная функция $Y: \Omega \times \Gamma \to \mathbb{E}^1$ σ-измеримая для каждого фиксированного γ, а функция*

$$\mu_Y(\omega,t) = \pi\{\gamma \in \Gamma: Y(\omega,\gamma) = t\}, \forall t \in \mathbb{E}^1$$

называется ее функцией распределения.

Из определения 1 следует, что функция распределения нечеткой случайной величины зависит от случайного параметра, т.е. является случайной функцией.

Определение 2. *Пусть $Y(\omega,\gamma)$ – нечеткая случайная величина. Ее ожидаемым значением* **E***[Y] называется нечеткая величина, имеющая функцию распределения возможностей*

$$\mu_{\mathbf{E}[Y]}(t) = \pi\{\gamma \in \Gamma: \mathbf{E}[Y(\omega,\gamma)] = t\},\ \forall t \in \mathbb{E}^1,$$

где **E** *– оператор взятия математического ожидания*

$$\mathbf{E}[Y(\omega,\gamma)] = \int_{\Omega} Y(\omega,\gamma)\mathbf{P}(d\omega).$$

Функция распределения ожидаемого значения нечеткой случайной величины уже не зависит от случайного параметра и является нечеткой величиной.

Для агрегирования нечеткой информации будем использовать *t*-нормы, которые обобщают операцию типа «min», заложенную в действиях над нечеткими множествами и нечеткими величинами [13,14].

В данной работе мы будем использовать экстремальную *t*-норму: $T_M(x,y) = \min(x,y)$. T_M называется сильнейшей *t*-нормой.

Следуя [15], введем понятие взаимной *t*-связанности нечетких переменных. Оно используется в качестве инструмента для построения совместных функций распределения возможностей.

Определение 3. *Нечеткие множества* $A_1, \dots, A_n \in P(\Gamma)$ *называются взаимно T-связанными, если для любого индексного множества* $\{i_1, \dots, i_k\} \subset \{1, \dots, n\}$, $k = 1, \dots, n$, *имеем*

$$\pi(A_{i_1} \cap \dots \cap A_{i_k}) = T\left(\pi(A_{i_1}), \dots, \pi(A_{i_k})\right),$$

где

$$T(\pi(A_{i_1}), \dots, \pi(A_{i_k})) = \mathrm{T}(\mathrm{T}(\dots \mathrm{T}(\pi(A_{i_1}), \pi(A_{i_2})), \pi(A_{i_3})), \dots), \pi(A_{i_k})).$$

Мы можем перенести понятие взаимной T-связанности нечетких множеств на нечеткие переменные.

Определение 4. *Нечеткие переменные* $Z_1(\gamma), \dots, Z_n(\gamma)$ *называются взаимно T-связанными, если для любого индексного множества* $\{i_1, \dots, i_k\} \subset \{1, \dots, n\}$, $k = 1, \dots, n$, *имеем*

$$\mu_{Z_{i_1}, \dots, Z_{i_k}}(t_{i_1}, \dots, t_{i_k}) = \pi\{\gamma \in \Gamma : Z_{i_1}(\gamma) = t_{i_1}, \dots, Z_{i_k}(\gamma) = t_{i_k}\}$$
$$= \pi\left\{Z_{i_1}^{-1}\{t_{i_1}\} \cap \dots \cap Z_{i_k}^{-1}\{t_{i_k}\}\right\} =$$
$$= T\{\pi(Z_{i_1}^{-1}\{t_{i_1}\}), \dots, \pi(Z_{i_k}^{-1}\{t_{i_k}\})\}, t_{i_j} \in \mathbb{E}^1.$$

3. ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ ВОЗМОЖНОСТНО-ВЕРОЯТНОСТНОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ ПРИ ОГРАНИЧЕНИЯХ ПО ВОЗМОЖНОСТИ/ НЕОБХОДИМОСТИ – ВЕРОЯТНОСТИ И ВЕРОЯТНОСТИ – ВОЗМОЖНОСТИ/НЕОБХОДИМОСТИ

Рассмотрим модель возможностно-вероятностного программирования следующего вида:

$$k \to \min,$$
$$\tau\{\mathbf{P}\{f_0(x, \omega, \gamma) \le k\} \ge p_0\} \ge \alpha_0, \quad (1)$$
$$\begin{cases} \tau\{\mathbf{P}\{f_i(x, \omega, \gamma) \le 0\} \ge p_i\} \ge \alpha_i, i = 1, \dots, m, \\ x \in X. \end{cases} \quad (2)$$

Сопряженная с (1)-(2) вероятностно-возможностная модель может быть записана в форме

$$k \to \min,$$

$$\mathbf{P}\{\tau\{f_0(x,\omega,\gamma) \le k\} \ge \alpha_0\} \ge p_0, \tag{3}$$

$$\begin{cases} \mathbf{P}\{\tau\{f_i(x,\omega,\gamma) \le 0\} \ge \alpha_i\} \ge p_i, i = 1,\dots,m, \\ x \in X. \end{cases} \tag{4}$$

Нетрудно видеть, что введенные модели оптимизации отличаются лишь последовательностью применения возможностно-вероятностных принципов для снятия гибридной (комбинированной) неопределенности.

В этих моделях $f_i(x,\omega,\gamma),\ i = 0,\dots,m$ есть возможностно-вероятностные функции, имеющие смысл отображений

$$f_i(\cdot,\cdot,\cdot)\colon X \times \Omega \times \Gamma \to \mathbb{E}^1,$$

$X \subset \mathbb{E}_n^+ = \{x \in \mathbb{E}^n\colon x \ge 0\}, \tau \in \{\pi,\nu\},\ p_i, \alpha_i, i = 0,\dots,m$ есть заданные уровни вероятности и возможности, $p_i, \alpha_i \in (0,1]$, k – дополнительная скалярная переменная.

Рассмотрим конкретные представления $f_i(x,\omega,\gamma)$. Пусть они являются линейными возможностно-вероятностными функциями. В этом случае

$$f_i(x,\omega,\gamma) = \sum_{j=1}^{n} A_{ij}(\omega,\gamma)x_j - B_i(\omega,\gamma) \tag{5}$$

при $i = 0,\dots,m$ и $B_0(\omega,\gamma) \equiv 0$.

Будем предполагать, что $A_{ij}(\omega,\gamma)$ и $B_i(\omega,\gamma)$ имеют сдвиг-масштабное представление гибридного (комбинированного) типа:

$A_{ij}(\omega,\gamma) = a_{ij}(\omega) + \sigma_{ij}(\omega)Y_{ij}(\gamma)$, $\quad B_i(\omega,\gamma) = b_i(\omega) + \sigma_i(\omega)Y_i(\gamma)$, возможностные величины $Y_{ij}(\gamma)$, $Y_i(\gamma)$ характеризуются квазивогнутыми, полунепрерывными сверху возможностными распределениями с конечными носителями, а $a_{ij}(\omega) \in \mathcal{N}_p(a_{ij}^0, d_{ij}^a)$, $\sigma_{ij}(\omega) \in \mathcal{N}_p(\sigma_{ij}^0, d_{ij}^\sigma)$, $b_i(\omega) \in \mathcal{N}_p(b_i^0, d_i^b)$, $\sigma_i(\omega) \in \mathcal{N}_p(\sigma_i^0, d_i^\sigma)$, $\mathcal{N}_p$ – есть класс нормальных вероятностных распределений.

Введем обозначения для коэффициентов ковариации случайных параметров, участвующих в сдвиг-масштабном представлении нечетких случайных величин:

$$C_{a_{ij}a_{ik}} = cov(a_{ij}, a_{ik});\quad C_{\sigma_{ij}\sigma_{ik}} = cov(\sigma_{ij}, \sigma_{ik});$$

$$C_{a_{ij}\sigma_{ik}} = cov(a_{ij}, \sigma_{ik});\quad C_{\sigma_{ij}a_{ik}} = cov(\sigma_{ij}, a_{ik});$$

$$C_{b_i\sigma_i} = cov(b_i, \sigma_i);\quad C_{a_{ij}b_i} = cov(a_{ij}, b_i);$$

$$C_{a_{ij}\sigma_i} = cov(a_{ij}, \sigma_i);\quad C_{\sigma_{ij}b_i} = cov(\sigma_{ij}, b_i);$$

$$C_{\sigma_{ij}\sigma_i} = cov(\sigma_{ij}, \sigma_i),$$

а также ковариационную матрицу $\mathbb{C}^i = \{\mathbb{C}_{ijk}(t_{ik}, t_{ij})\}_{j,k=1}^n$, $i = 0, \dots, m$ с коэффициентами

$$\mathbb{C}_{ijk}(t_{ik}, t_{ij}) = C_{a_{ij}a_{ik}} + C_{a_{ij}\sigma_{ik}} t_{ik} + C_{\sigma_{ij}a_{ik}} t_{ij} + C_{\sigma_{ij}\sigma_{ik}} t_{ij} t_{ik}.$$

Пусть взаимодействие нечетких параметров модели описывается сильнейшей t-нормой T_M а $t^i = (t_{i1}, t_{i2}, \dots, t_{in}, t_i)$ – их фиксированные значения. Тогда мы можем записать

$$f_i(x, \omega, t^i) = \sum_{j=1}^{n} \big(a_{ij}(\omega) + \sigma_{ij}(\omega) t_{ij}\big) x_j - (b_i(\omega) + \sigma_i(\omega) t_i).$$

Понятно, что при фиксированных x и t^i, $i = 1, \dots, m$, $f_i(x, \omega, t^i)$ является нормальной случайной величиной. Тогда с возможностью

$$\mu(t^i) = \min\left\{\min_{1 \le j \le n}\left\{\mu_{Y_{ij}}(t_{ij})\right\}, \mu_{Y_i}(t_i)\right\}$$

ее математическое ожидание определяется формулой [10]:

$$m_i(x, t^i) = \mathbf{E}\{f_i(x, \omega, t^i)\} = \sum_{j=1}^{n} \big(a_{ij}^0 + \sigma_{ij}^0 t_{ij}\big) x_j - (b_i^0 + \sigma_i^0 t_i).$$

Для дальнейшего нам понадобится также дисперсия функции $f_i(x, \omega, t^i)$. В соответствии с классическим подходом ее можно определить следующим образом:

$$d_i(x, t^i) = \mathbf{E}\left\{\left(f_i(x, \omega, t^i) - m_i(x, t^i)\right)^2\right\}.$$

Специфицируем эту формулу. Имеем после соответствующих подстановок

$$d_i(x, t^i) = \mathbf{E}\left\{\left(\sum_{j=1}^{n}\left(a_{ij}(\omega) + \sigma_{ij}(\omega) t_{ij} - \left(a_{ij}^0 + \sigma_{ij}^0 t_{ij}\right)\right) x_j - \right.\right.$$
$$\left.\left. - (b_i(\omega) - b_i^0 + (\sigma_i(\omega) - \sigma_i^0) t_i)\right)^2\right\}.$$

После соответствующих перестановок и с использованием введенных ранее обозначений имеем

$$d_i(x, t^i) = \langle \mathbb{C}^i x, x\rangle - 2\sum_{j=1}^{n}\left(C_{a_{ij}b_i} + C_{a_{ij}\sigma_i} t_i + C_{\sigma_{ij}b_i} t_{ij} + C_{\sigma_{ij}\sigma_i} t_{ij} t_i\right) x_j +$$
$$+ d_i^b + d_i^\sigma t_i^2 + 2C_{\sigma_i b_i} t_i, \qquad (6)$$

где $\langle \cdot, \cdot \rangle$ – операция скалярного умножения векторов.

В том случае, когда случайные величины являются некоррелированными, полученная формула (6) приобретает вид

$$d_i(x, t^i) = \sum_{j=1}^{n}\left(d_{ij}^a + d_{ij}^\sigma t_{ij}^2\right) x_j^2 + d_i^b + d_i^\sigma t_i^2 . \qquad (7)$$

Функция $d_i(x,t^i)$ обладает следующими свойствами, обусловленными ковариационной матрицей $\mathbb{C}^i$:

- $d_i(x,t^i)$ – выпуклая функция по x при фиксированном t^i;
- для любых векторов x и t^i функция $d_i(x,t^i)$ неотрицательна;
- функция $d_i(x,t^i)$ выпукла по t^i при фиксированном x.

Соответственно математическое ожидание возможностно-вероятностной функции (5) имеет вид:

$$\widetilde{m}_i(x,\gamma) = \mathbf{E}\{f_i(x,\omega,\gamma)\} = \sum_{j=1}^{n}\left(a_{ij}^0 + \sigma_{ij}^0 Y_{ij}(\gamma)\right)x_j - (b_i^0 + \sigma_i^0 Y_i(\gamma)).$$

В дальнейшем нам потребуется формула дисперсии нечеткой случайной функции $f_i(x,\omega,\gamma)$, определяемая в нечеткой форме, следуя [10]:

$$\tilde{d}_i(x,\gamma) = \mathbf{E}\left\{\left(f_i(x,\omega,\gamma) - \widetilde{m}_i(x,\gamma)\right)^2\right\}.$$

Специфицируем эту формулу. После подстановки в нее конкретных выражений для $f_i(x,\omega,\gamma)$ и $\widetilde{m}_i(x,\gamma)$, раскрытия скобок и перегруппировки членов, а также на основании свойства линейности математического ожидания получаем следующую формулу для нечеткой дисперсии:

$$\tilde{d}_i(x,\gamma) = \langle\tilde{\mathbb{C}}^i(\gamma)x,x\rangle - 2\sum_{j=1}^{n}\left(C_{a_{ij}b_i} + C_{a_{ij}\sigma_i}Y_i(\gamma) + C_{\sigma_{ij}b_i}Y_{ij}(\gamma) + C_{\sigma_{ij}\sigma_i}Y_{ij}(\gamma)Y_i(\gamma)\right)x_j + d_i^b + d_i^\sigma Y_i^2(\gamma) + 2C_{\sigma_i b_i}Y_i(\gamma),$$

где $\tilde{\mathbb{C}}^i(\gamma)$ – матрица $\left\{\tilde{\mathbb{C}}_{ijk}(\gamma)\right\}_{j,k=1}^{n}$, $i = 0,\dots,m$, а

$$\tilde{\mathbb{C}}_{ijk}(\gamma) = C_{a_{ij}a_{ik}} + C_{a_{ij}\sigma_{ik}}Y_{ik}(\gamma) + C_{\sigma_{ij}a_{ik}}Y_{ij}(\gamma) + C_{\sigma_{ij}\sigma_{ik}}Y_{ij}(\gamma)Y_{ik}(\gamma).$$

Перейдем к построению эквивалентных четких аналогов задач.

4. ЭКВИВАЛЕНТНЫЕ ЧЕТКИЕ АНАЛОГИ ЗАДАЧ (1)-(2) И (3)-(4)

Сначала рассмотрим процесс построения эквивалентного четкого аналога задачи (1)-(2). Для этого нам достаточно построить эквивалентную детерминированную систему ограничений для (2), а модель критерия (1) может быть приведена к эквивалентной детерминированной аналогичным способом.

В [1] получены следующие результаты. Так как при фиксированном векторе t^i

$$f_i(x,\omega,t^i) \in \mathcal{N}_p\left(m_i(x,t^i), \sqrt{d_i(x,t^i)}\right),$$

то в соответствии с классическими результатами стохастического программирования [16]

$$\mathbf{P}\{f_i(x,\omega,t^i)\le 0\}=\mathbf{P}\left\{\frac{f_i(x,\omega,t^i)-m_i(x,t^i)+m_i(x,t^i)}{\sqrt{d_i(x,t^i)}}\le 0\right\}=$$

$$=\mathbf{P}\left\{\frac{f_i(x,\omega,t^i)-m_i(x,t^i)}{\sqrt{d_i(x,t^i)}}+\frac{m_i(x,t^i)}{\sqrt{d_i(x,t^i)}}\le 0\right\}=1-\mathcal{F}_i\left(\frac{m_i(x,t^i)}{\sqrt{d_i(x,t^i)}}\right)\ge p_i,$$

где $\mathcal{F}_i$ – функция стандартного нормального распределения веростностей.

Последнее неравенство эквивалентно неравенству $\frac{m_i(x,t^i)}{\sqrt{d_i(x,t^i)}}\le\beta_i$, в котором β_i есть решение уравнения $\mathcal{F}_i(t)=1-p_i$.

В результате получаем неравенство

$$m_i(x,t^i)-\beta_i\sqrt{d_i(x,t^i)}\le 0 \qquad (8)$$

с возможностью $\mu(t^i)$ эквивалентное i-му ограничению системы (2).

После спецификации (8) принимает форму

$$\sum_{j=1}^{n}\left(a_{ij}^0+\sigma_{ij}^0 t_{ij}\right)x_j-\beta_i\sqrt{d_i(x,t^i)}\le b_i^0+\sigma_i^0 t_i. \qquad (9)$$

Если $p_i>0{,}5$, то $\beta_i<0$ и функция, находящаяся в левой части неравенства (9), является выпуклой и монотонной по нечетким параметрам.

Подставив в неравенство (9) вместо параметров t_{ij}, t^i, t_i соответствующие нечеткие величины $Y_{ij}(\gamma)$ и $Y_i(\gamma)$ и потребовав выполнения полученного возможностного неравенства с возможностью α_i, мы тем самым получаем ограничение, эквивалентное i-му ограничению системы (2), содержащее только нечеткие параметры. Имеем

$$\pi\left\{\sum_{j=1}^{n}\left(a_{ij}^0+\sigma_{ij}^0 Y_{ij}(\gamma)\right)x_j-\beta_i\sqrt{\tilde{d}_i(x,\gamma)}\le b_i^0+\sigma_i^0 Y_i(\gamma)\right\}\ge\alpha_i. \qquad (10)$$

В [1], опираясь на результаты [12,17], доказана следующая теорема.

Теорема 1. *Пусть в модели ограничений (2)* $\tau=\pi$, $p_i>0{,}5$, $i=1,\dots,m$, *нечеткие величины* $Y_{ij}(\gamma)$, $Y_i(\gamma)$ *в сдвиг-масштабном представлении нечетких случайных величин являются взаимно минисвязанными и характеризуются квазивогнутыми, полунепрерывными сверху распределениями с конечными носителями, а коэффициенты сдвига и масштаба являются нормально*

распределенными случайными величинами с соответствующими параметрами. Тогда система ограничений (2) эквивалентна детерминированной модели ограничений

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^{n} \left(a_{ij}^0 + \min\{\sigma_{ij}^0 Y_{ij}^-, \sigma_{ij}^0 Y_{ij}^+\}\right) x_j - \beta_i \sqrt{d_i(x,\alpha_i)} \le b_i^0 + \max\{\sigma_i^0 Y_i^-, \sigma_i^0 Y_i^+\}, \\ x \in X, i = 1, \dots, m, \end{cases}$$

в которой $Y_{ij}^{\pm}$, $Y_i^{\pm}$ *есть правые и левые границы* α_i *уровневых множеств нечетких величин* $Y_{ij}(\gamma)$, $Y_i(\gamma)$,

$$\begin{aligned} d_i(x,\alpha_i) &= \sum_{j=1}^{n}\sum_{k=1}^{n} C_{ijk}(\alpha_i) x_j x_k + \\ &+ 2\sum_{j=1}^{n} \Big(-C_{a_{ij}b_i} + \min\{-C_{a_{ij}\sigma_i} Y_i^-, -C_{a_{ij}\sigma_i} Y_i^+\} \\ &+ \min\{-C_{\sigma_{ij}b_i} Y_{ij}^-, -C_{\sigma_{ij}b_i} Y_{ij}^+\} \\ &+ \min\{-C_{\sigma_{ij}\sigma_i} \left(Y_{ij} Y_i\right)^-, -C_{\sigma_{ij}\sigma_i} \left(Y_{ij} Y_i\right)^+\}\Big) x_j + d_i^b \\ &+ d_i^{\sigma} (Y_i^2)^- + 2\min\{C_{\sigma_i b_i} Y_i^-, C_{\sigma_i b_i} Y_i^+\}, \\ C_{ijk}(\alpha_i) &= C_{a_{ij}a_{ik}} + \min\left\{C_{a_{ij}\sigma_{ik}} Y_{ik}^-, C_{a_{ij}\sigma_{ik}} Y_{ik}^+\right\} \\ &+ \min\left\{C_{\sigma_{ij}a_{ik}} Y_{ij}^-, C_{\sigma_{ij}a_{ik}} Y_{ij}^+\right\} \\ &+ \min\left\{C_{\sigma_{ij}\sigma_{ik}} \left(Y_{ij} Y_{ik}\right)^-, C_{\sigma_{ij}\sigma_{ik}} \left(Y_{ij} Y_{ik}\right)^+\right\}. \end{aligned}$$

Замечание 1. *Границы* α_i*-уровневых множеств нечетких величин, их степеней и произведений находятся с использованием результатов, представленных в [10,18,19,20]. К примеру:*

$$\left(Y_i Y_{ij}\right)^- = \min\left\{Y_i^- Y_{ij}^-, Y_i^- Y_{ij}^+, Y_i^+ Y_{ij}^-, Y_i^+ Y_{ij}^+\right\},$$
$$\left(Y_i Y_{ij}\right)^+ = \max\left\{Y_i^- Y_{ij}^-, Y_i^- Y_{ij}^+, Y_i^+ Y_{ij}^-, Y_i^+ Y_{ij}^+\right\}.$$

В [1] представлена также теорема, позволяющая строить эквивалентный четкий аналог модели критерия (1).

Теорема 2. *Пусть в модели критерия (1)* $\tau = \pi$, $p_0 > 0.5$, $i = 1, \dots, m$, *нечеткие величины* $Y_{0j}(\gamma)$, $j = 1, \dots, n$ *в сдвиг-масштабном представлении нечетких случайных величин являются взаимно минисвязанными и характеризуются квазивогнутыми, полунепрерывными сверху распределениями с конечными носителями, а коэффициенты сдвига и масштаба являются нормально распределенными случайными величинами с соответствующими параметрами. Тогда модель критерия (1) эквивалентна модели*

$$\sum_{j=1}^{n}\left(a_{0j}^{0}+\min\{\sigma_{0j}^{0}Y_{0j}^{-},\sigma_{0j}^{0}Y_{0j}^{+}\}\right)x_j-\beta_0\sqrt{\sum_{j=1}^{n}\sum_{k=1}^{n}C_{0jk}(\alpha_0)x_jx_k}\to\min_{x\in X}.$$

Целевая функция в последней проблеме является выпуклой, а в случае $p_0<0{,}5$ задача переходит в класс невыпуклой многоэкстремальной оптимизации. Тем не менее, условие $p_0>0{,}5$ соответствует требованиям большинства задач, решаемых на практике.

Перейдем к исследованию модели (3)-(4). Обозначим через $\mathcal{N}_\pi(\hat{a},\hat{b})$ класс нормальных возможностных величин:

$$\chi\in\mathcal{N}_\pi(\hat{a},\hat{b})\Rightarrow\mu_\chi(x)=e^{-\frac{(x-\hat{a})^2}{\hat{b}^2}}\ \ \forall x\in\mathbb{E}^1.$$

Теорема 3. *Пусть в модели ограничений (4) возможностные составляющие в сдвиг-масштабном представлении нечетких случайных величин $A_{ij}(\omega,\gamma)$ и $B_i(\omega,\gamma)$ являются нормальными T_M-связанными возможностными величинами:*

$$Y_{ij}(\gamma)\in\mathcal{N}_\pi(\hat{a}_{ij},\hat{d}_{ij}),\ \ Y_i(\gamma)\in\mathcal{N}_\pi(\hat{b}_i,\hat{d}_i).$$

Тогда вероятностно-возможностная модель построчных ограничений по вероятности и возможности (4) имеет эквивалентный стохастический аналог вида

$$\begin{cases}\mathbf{P}\left\{\sum_{j=1}^{n}A_{ij}^{\{\mp\}}(\omega)x_j\le B_i^{\{\pm\}}(\omega)\right\}\ge p_i,i=1,\dots,m,\\ x\in X,\end{cases}\qquad(11)$$

в котором

$$A_{ij}^{-}(\omega)=a_{ij}(\omega)+\hat{a}_{ij}\sigma_{ij}(\omega)-\hat{\sigma}_{ij}\left|\sigma_{ij}(\omega)\right|\sqrt{-\ln\alpha_i},$$
$$B_i^{+}(\omega)=b_i(\omega)+\hat{b}_i\sigma_i(\omega)+\hat{\sigma}_i|\sigma_i(\omega)|\sqrt{-\ln\alpha_i},$$
$$A_{ij}^{+}(\omega)=a_{ij}(\omega)+\hat{a}_{ij}\sigma_{ij}(\omega)+\hat{\sigma}_{ij}\left|\sigma_{ij}(\omega)\right|\sqrt{-\ln\beta_i},$$
$$B_i^{-}(\omega)=b_i(\omega)+\hat{b}_i\sigma_i(\omega)-\hat{\sigma}_i|\sigma_i(\omega)|\sqrt{-\ln\beta_i},$$

$\beta_i=1-\alpha_i$; *верхние индексы (- +) в обозначениях границ уровневых множеств возможностных величин соответствуют $\tau=\pi$ (возможностному ограничению), нижние индексы (+ -) соответствуют $\tau=\nu$ (ограничение по необходимости).*

Доказательство. Пусть $\tau=\pi$. При фиксированном $\omega\in\Omega$, в соответствии с исчислением возможностей [10]

$$A_{ij}(\omega,\gamma)=a_{ij}(\omega)+\sigma_{ij}(\omega)Y_{ij}(\gamma)\in\mathcal{N}_\pi\left(a_{ij}(\omega)+\hat{a}_{ij}\sigma_{ij}(\omega),\left|\sigma_{ij}(\omega)\right|\hat{d}_{ij}\right)$$
$$B_i(\omega,\gamma)=b_i(\omega)+\sigma_i(\omega)Y_i(\gamma)\in\mathcal{N}_\pi\left(b_i(\omega)+\hat{b}_i\sigma_i(\omega),|\sigma_i(\omega)|\hat{d}_i\right).$$

Тогда, на основании результатов [21], ограничение по возможности

$$\pi\left\{\sum_{j=1}^{n} A_{ij}(\omega,\gamma)x_j \le B_i(\omega,\gamma)\right\} \ge \alpha_i$$

имеет эквивалентный стохастический аналог

$$\sum_{j=1}^{n} A_{ij}^{-}(\omega)x_j \le B_i^{+}(\omega).$$

Из полученного неравенства следует, что ограничение по вероятности/возможности

$$\mathbf{P}\left\{\pi\left\{\sum_{j=1}^{n} A_{ij}(\omega,\gamma)x_j \le B_i(\omega,\gamma)\right\} \ge \alpha_i\right\} \ge p_i$$

эквивалентно ограничению по вероятности

$$\mathbf{P}\left\{\sum_{j=1}^{n} A_{ij}^{-}(\omega)x_j \le B_i^{+}(\omega)\right\} \ge p_i.$$

Пусть теперь $\tau = \nu$. Доказательство в этом случае основывается на соотношении двойственности возможностной и необходимостной мер [10]:

$$\nu(A) = 1 - \pi(A^C), \qquad \forall A \in P(\Gamma)$$

и доказывается аналогичным образом. Теорема доказана.

Теорема 3 может быть обобщена на основании результатов [17] на класс квазивогнутых полунепрерывных сверху распределений.

Полученная система ограничений (11) представляет собой систему построчных ограничений по вероятности. Построение ее эквивалентного детерминированного аналога затруднено в связи с присутствием в выражениях, определяющих случайные величины $A_{ij}^{\{\mp\}}(\omega)$ и $B_i^{\{\pm\}}(\omega)$, модулей случайных величин. Так, к примеру, если случайная величина $\xi \in \mathcal{N}_p(0,1)$, то плотность f случайной величины $|\xi|$ имеет вид [22]:

$$f_{|\xi|}(y) = \begin{cases} f_\xi(y) + f_\xi(-y), y > 0, \\ 0, y < 0. \end{cases}$$

Однако эту систему с помощью характеристических функций

$$\chi^i(x,\omega) = \begin{cases} 1, f^i(x,\omega) \le 0, \\ 0, f^i(x,\omega) > 0, \end{cases}$$

где $f^i(x,\omega) = \sum_{j=1}^{n} A_{ij}^{\{\mp\}}(\omega)x_j - B_i^{\{\pm\}}(\omega)$, можно свести к системе ограничений

$$\begin{cases} \mathbf{E}\{\chi^i(x,\omega)\} = \mathbf{P}\{f^i(x,\omega) \le 0\} \ge p_i, i = 1,\dots,m, \\ x \in X, \end{cases} \qquad (12)$$

и применить для решения задачи с ограничениями (12) прямые методы стохастического программирования [16], которые не требуют построения эквивалентных детерминированных аналогов.

Аналогичным образом может быть построена эквивалентная стохастическая модель критерия (3).

5. ПОРТФЕЛЬ МИНИМАЛЬНОГО РИСКА

На основании полученных результатов можно построить математическую модель портфеля минимального риска в условиях гибридной неопределенности, в которой используются возможностно-вероятностные ограничения.

Действительно, пусть возможностно-вероятностная функция

$$f_0(x,\omega,\gamma) = \sum_{j=1}^{n} A_{0j}(\omega,\gamma)x_j,$$

в которой $A_{0j}(\omega,\gamma)$ есть доходность j-го финансового актива, а вектор $x = (x_1, \dots, x_n)$ есть вектор долей капитала, представляет доходность инвестиционного портфеля.

Тогда одна из возможных моделей портфеля минимального риска может быть записана в виде

$$k \to min,$$

$$\tau\{\tilde{\mathrm{d}}_0(x,\gamma) \le k\} \ge \alpha_0, \tag{13}$$

$$\begin{cases} \tau\{\mathbf{P}\{f_0(x,\omega,\gamma) \ge d_p\} \ge p_0\} \ge \alpha_0, \\ \sum_{j=1}^{n} x_j = 1, x \ge 0, \end{cases} \tag{14}$$

где d_p есть уровень доходности, приемлемый для инвестора. Система (13)-(14) представляет собой модель возможностно-вероятностного программирования. При сделанных ранее предположениях на основании полученных выше результатов может быть построен ее эквивалентный детерминированный аналог – задача квадратичного программирования.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе исследована проблема возможностно-вероятностного линейного программирования с ограничениями по возможности/необходимости – вероятности и вероятности – возможности/необходимости. Для случая нормально распределенных случайных факторов модели, при наиболее общих предположениях относительно свойств возможностных распределений построены ее

эквивалентные детерминированный и стохастический аналоги. Свойства модели (выпуклость-вогнутость), как и в классическом стохастическом программировании [16], существенным образом зависят от уровней вероятности, задаваемых в исходной модели. Для случая меры необходимости ($\tau = \nu$) в эквивалентной модели (можно доказать это, опираясь на [12]) в левой части неравенств, входящих в систему (11), будут задействованы правые границы уровневых множеств для $1 - \alpha_i$, а в правой части – левые.

Можно показать, что при значениях вероятности $p_i = 0{,}5$, моменты второго порядка (дисперсии) исключаются и модель (1)-(2) трансформируется в задачу линейного программирования. Сформулирована модель портфеля минимального риска. Она может быть исследована в контексте полученных результатов возможностно-вероятностной оптимизации.

В плане перспективных исследований представляется целесообразным обобщение полученных результатов на вероятностные распределения, отличные от нормального, а также на случай слабейшей t-нормы, описывающей взаимодействие нечетких параметров [23, 24].

Литература

1. Yazenin A., Soldatenko I. On the Problem of Possibilistic-Probabilistic Optimization with Constraints on Possibility/Probability. Lecture Notes in Computer Science, WILF 2018. Giove S., Masulli F., Fuller R. (eds.). Advances in Intelligent Systems and Computing. – Vol. 11291. – Springer, Cham, 2019. – P. 43-54.
2. Язенин А.В. Линейное программирование со случайными нечеткими данными // Изв. АН СССР. Техн. кибернетика. – 1991. – №3. – С.52-58.
3. Язенин А.В. О методе решения одной задачи линейного программирования со случайными нечеткими данными // Изв. РАН. Теория и системы управления. – 1997. – №5. – С. 91-95.
4. Yazenin A.V.: Possibilistic-probabilistic models and methods of portfolio optimization // Studies in Computational Intelligence. Batyrshin, I., Kacprzyk, J. et al. (eds.). – 2007. – Vol. 36. – P. 241-259.
5. Luhandjula M.K. Linear programming under randomness and fuzziness // Fuzzy Sets and Systems. – 1983. – Vol. 10(1-3). – P. 45-55.
6. Язенин А.В., Шефова Н.А. Об одной возможностно-вероятностной модели портфеля минимального риска // Вестник Тверского государственного университета. Серия: Прикладная математика. – 2010. – №2 (17). – С. 85-95.
7. Xu J., Zhou X. Fuzzy-like multiple objective decision making // Studies in Fuzziness and Soft Computing. – Berlin: Springer, 2011. – Vol. 263.
8. Aiche F., Abbas M., Dubois D. Chance-constrained programming with fuzzy stochastic coefficients // Fuzzy Optim Decis Making. – 2013. – Vol. 12. – P. 125-152.
9. Yazenin A., Soldatenko I. A Portfolio of Minimum Risk in a Hybrid Uncertainty of a Possibilistic-Probabilistic Type: Comparative Study // Advances in Fuzzy

Logic and Technology 2017. Proceedings of the Conference of the European Society for Fuzzy Logic and Technology. – Cham: Springer, 2018. – P.551-563.
10. Язенин А.В. Основные понятия теории возможностей. – М.: Физматлит, 2016. – 142 с.
11. Nahmias S. Fuzzy variables in a random environment // Advances in Fuzzy Sets Theory and Applications. Gupta, M.M., Ragade, R.K., Yager, R.R. (eds.). – Amsterdam: NHCP, 1979. – P. 165-180.
12. Yazenin A., Wagenknecht M. Possibilistic Optimization. – Cottbus: Brandenburgische Technische Universitat, 1996.
13. Nguyen H.T., Walker E.A. A First Course in Fuzzy Logic. – CRC Press, Boca Raton, 1997.
14. Mesiar R. Triangular-norm-based addition of fuzzy intervals // Fuzzy Sets and Systems. – 1997. – Vol. 91. – Pp. 231-237.
15. Hong D.H. Parameter estimations of mutually T-related fuzzy variables // Fuzzy Sets and Systems. – 2001. – Vol. 123. – Pp. 63-71.
16. Ермольев Ю.М. Методы стохастического программирования. – М.: Наука, 1976.
17. Yazenin A.V. On the problem of possibilistic optimization // Fuzzy Sets and Systems. – 1996. – Vol. 81(1). – P. 133-140.
18. Алефельд Г., Херцбергер Ю. Введение в интервальные вычисления. –М: Мир, 1987. – 360 с.
19. Fuller R., Keresztfalvi T. t-Norm-based addition of fuzzy intervals // Fuzzy Sets and Systems. – 1992. – Vol. 51(2). – P. 155-159.
20. Fuller R., Keresztfalvi T. On generalization of Nguyen's theorem // Fuzzy Sets and Systems. – 1991. – Vol. 41(3). – P. 371-374.
21. Yazenin A.V. Fuzzy and stochastic programming // Fuzzy sets and systems. – 1987. – V. 22(1/2). – P. 171-180.
22. Ширяев А.Н. Вероятность. – М., 1980. – 574 с.
23. Yazenin A.V., Soldatenko I.S.: Possibilistic optimization tasks with mutually t-related parameters: solution methods and comparative analysis // Studies in Fuzziness and Soft Computing. Lodwick, W.A., Kacprzyk, J. (eds.). – Springer, 2010. – V.254. – P.163-192.
24. Егорова Ю.Е., Язенин А.В. К проблеме возможностно-вероятностной оптимизации // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2017. – №4. – С. 104-120.

УДК 681.3.06

ГЕНЕРАЦИЯ ОНТОЛОГИИ ТЕКСТОВЫХ ДАННЫХ

Городецкий В.И*., д.т.н.*
e-mail: gor@iias.spb.su
АО «Эврика»
Тушканова О.Н*., к.т.н.*
e-mail: tushkanova.on@gmail.com
СПб ФИЦ РАН

1. ВВЕДЕНИЕ

В работе рассматривается алгоритм автоматизации процесса построения онтологии данных, представленных текстами на естественном языке (ЕЯ). В отличие от онтологии предметной области, такую онтологию можно называть также *онтологией выборки данных,* или *семантической метамоделью данных*.

Использование онтологии ЕЯ-данных в современных приложениях имеет, по крайней мере, три веские причины. Во-первых, поскольку понятия онтологии имеют ЕЯ-семантику, то человек имеет возможность легко интерпретировать результаты обработки данных при решении, например, задач машинного обучения в понятных ему терминах ЕЯ. Во-вторых, смысл каждого слова ЕЯ всегда определён приближённо, и замена слова его синонимом практически не изменяет смысла текста. То же самое справедливо и для замены конкретных слов текста понятиями базового уровня, что приводит к заметному снижению вычислительной сложности алгоритмов обработки текстов ЕЯ. Третий аргумент за использование онтологии данных состоит с том, что процесс перехода от описания семантики текста множеством слов к её описанию в терминах множества понятий есть процесс грануляции данных. Хорошо известно, что такой процесс приводит к повышению устойчивости вычислительных процессов, что представляется очень важным, особенно для больших данных. Например, при слишком детальном представлении данных в задаче машинного обучения возникает негативный эффект, известный как «переобучение» механизма принятия решений, который приводит к его неустойчивости на новых данных. Рис.1 иллюстрирует качественно влияние уровня грануляции данных на свойства процессов обработки данных.

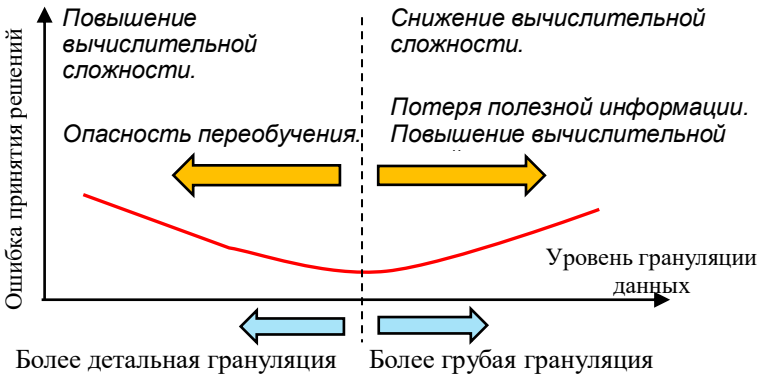


Рис. 1. Уровень грануляции и свойства процессов обработки

Подводя итог описанию преимуществ использования онтологии данных в задачах семантической обработки текстов, можно сказать, что онтологическая модель грануляция текстовых данных есть переход от их описания в терминах ключевых слов к описанию в терминах семантически интерпретируемых ключевых ЕЯ-понятий онтологии. И этот переход делает возможным эффективно реализовать процессы автоматической генерации онтологии текстов. Данная работа посвящена описанию такого алгоритма построения онтологии данных.

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Пусть $\boldsymbol{A} = \{\boldsymbol{A_j}\}$, $\boldsymbol{j} = \boldsymbol{1}, \ldots, \boldsymbol{N}$– множество текстов выборки. Например, это могут быть краткие оперативные сводки службы чрезвычайных ситуаций, резюмирующие все, что произошло за прошедшие сутки в зоне её ответственности. Пусть это множество текстов прошло очистку от случайных ошибок и выбросов, так что выборка готова к семантической обработке – построению онтологии, т.е. семантической структуры данных.

К настоящему времени предложено много различных технологий формализации семантики текстовых данных в терминах понятий онтологии. Их детальный анализ имеется в работах [1, 2]. Прежде чем описывать предлагаемый алгоритм, рассмотрим компоненты онтологии и структуру её связей. Напомним, что таксономия понятий онтологии является её обязательной компонентой, которая в ней всегда присутствует, в отличие от других компонент. Состав компонент таксономии понятий совместно с множеством данных и их иерархия представлены на рис.2.

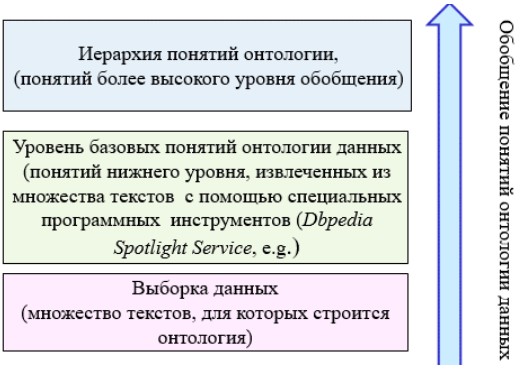


Рис. 2. Компоненты онтологии данных и базы знаний

В онтологии следует различать понятия двух типов – понятия базового уровня и понятия более высоких уровней обобщения. Понятия базового уровня строятся непосредственно как обобщение данных («над данными»), и если данные относить к уровню с номером 0, то базовые понятия образуют первый уровень обобщения данных. Второй и последующий уровни обобщения понятий онтологии обычно строятся последовательно как обобщения понятий предыдущего уровня.

Онтологию данных совместно с самими данными и заданной структурой межуровневых связей экземпляров данных и базовых понятий, а также между понятиями разных уровней обобщения принято называть *базой знаний*. Выделение трёх компонент базы знаний (рис.2) отвечает структуре алгоритма автоматизированного построения онтологии. В нем на первом этапе вычисляется множество базовых понятий, а на следующем – понятия более высокого уровня обобщения.

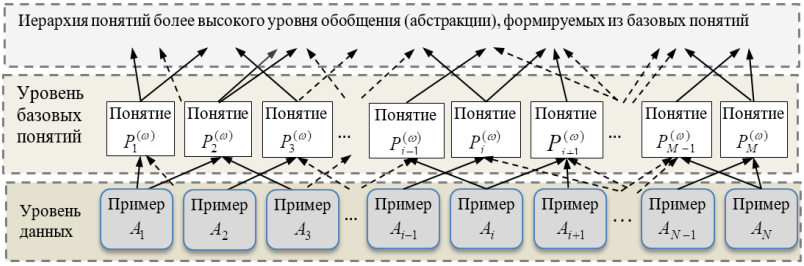


Рис.3. Общая структура онтологии данных

Для имплементации этого алгоритма используются различные программные инструменты. К ним относятся, например, коммерческие

и свободно распространяемые средства компании IBM (см., например, [3]), которые используют различные лексические базы данных (например, WordNet), а также инструменты для извлечения структурированного контента, использующие ресурсы Linked Data Web [4], среди которых наиболее мощным в настоящее время является инструмент DBpedia [5]. В программном продукте, который был разработан для автоматического извлечения понятий базового уровня из множества текстов, использовался инструмент *DBpedia Spotlight Service* [6], который в качестве базы данных понятий использует онтологию DBpedia. Понятия онтологии, извлекаемые таким способом, представляют собой статьи Wikipedia, структурированные в иерархию категорий базы данных. Далее даётся описание технологии генерации онтологии с привлечением инструментария *DBpedia Spotlight Service*.

3. СТРУКТУРА МЕЖУРОВНЕВЫХ СВЯЗЕЙ ОНТОЛОГИИ

Рассмотрим межуровневые связи в иерархии компонент онтологии. На рис.3 приведён абстрактный пример, иллюстрирующий предлагаемую организацию связей между понятиями онтологии базового уровня и примерами базы данных (текстов). В ней полагается, что любой экземпляр базы данных (объект, структура данных и т.п., в частном случае – текст) имеет ссылку на понятие онтологии базового уровня, примером которого он является. Поскольку каждый экземпляр текста, может содержит слова, которые являются представителями разных понятий (даже относительно короткий текст может содержать в себе десятки и сотни представителей разных понятий), то каждый такой объект (например, отдельный текст) ссылается на множество понятий, примеры которых он содержит в себе. Другими словами, полагается, что каждый экземпляр данных может быть примером многих базовых понятий (рис.3), что формально задаётся бинарным отношением типа $[1:n]$ между примерами базы данных и базовыми понятиями онтологии. Явное задание этого отношения позволяет быстро отвечать на запросы к базе знаний, заданные в виде формул дескриптивной логики, аргументами которых являются примеры понятий.

Ещё одно предположение о межуровневых связях состоит в том, что каждому понятию базового уровня онтологии ставится в соответствие множество его примеров в базе данных, т.е. отношение $[1:m]$ от понятий онтологии к множеству примеров, которые имеются в базе данных для каждого базового понятия. Это отношение позволяет быстро формировать ответы на запросы к базе данных в виде формул дескриптивной логики, аргументами которой являются имена понятий онтологии и/или бинарные

предикаты схемы Tbox, Эти запросы могут быть аналогичны по структуре запросам языка SPARQL.

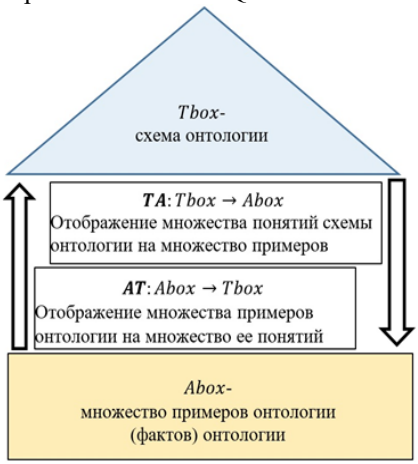


Рис.4. Формальная модель онтологии и связи её компонент

Следует обратить внимание на то, что описанная пара отношений (задающих отношения типа $[1:n]$ и $[1:m]$) позволяет совместно задавать отношение типа $[n:m]$ и строить запросы, которые могут включать в себя как экземпляры данных, так и понятия онтологии. Схематично представленная модель структуры онтологии с двухсторонними ссылками представлена на рис.3 и 4.

Приведём некоторые сведения о характеристиках базы данных (множества текстов) и ожидаемой мощности множества базовых понятий онтологии, полученные на основе опыте. При исследовании алгоритма построения онтологии текстовых данных использовалось подмножество текстов ARXIV из набора данных Sentence Classification [7]. Это подмножество содержит 100 текстов в формате .txt объёмом от 400 до 1000 слов по научной тематике Machine Learning. Использовалось также подмножество текстов из того же множества, а именно его подмножество JDM, которое содержит 100 текстов аналогичного объёма из журнала “The psychology journal Judgment and Decision Making”. Оказалось, что для такого небольшого количества специализированных и небольших текстов число понятий базового уровня имело порядок около 1200.

Зададимся вопросом, насколько реально такие двухсторонние связи найти? Эти связи устанавливаются в процессе автоматизированного построения множества понятий онтологии базового уровня как составная часть результата. Если множество текстов расширяется далее новыми документами, то это расширение выполняется аналогично, и потому расширение онтологии при добавлении новых примеров строится аналогично. Обратим внимание на преимущества такой организации межуровневых связей. Известно, что традиционная SQL-модель хранения данных в базе данных онтологии является чуждой для неё, и именно она является основным источником высоких требований к вычислительным

ресурсам компьютера и по памяти, и по скорости работы. Описанная модель представления баз данных в виде списка объектов со ссылками на примеры онтологии и с инверсными ссылками является, с одной стороны, структурой типа NoSQL, а, с другой стороны, она является естественной для выполнения запросов к онтологии (как запросов пользователя, так и запросов программ), поскольку при её использовании нет необходимости выполнять какие-то манипуляции с множеством SQL-таблиц и ключами доступа. Графовая база данных является свободной от индексов[1], и потому присоединение к ней NoSQL-базы данных по схеме, свободной от индексов, сохраняет это свойство и для базы знаний в целом. В построенной графовой базе знаний примеры являются листьями общей структуры графа знаний.

Другое важное преимущество организации связей между примерами понятий и понятиями базового уровня в виде $[n{:}\,m]$-отношения состоит в том, что в этом случае можно вместо традиционной пропозициональной семантики дескриптивной логики использовать предикатную семантику, благодаря чему поиск ответов на запросы, заданные, например, в той же форме, что и в языке запросов SPARQL, будут обрабатываться не в терминах вычислительно-затратного логического вывода, а в терминах естественно заданных теоретико-множественных операций [8].

Проанализируем требованиях к ресурсам компьютера, которые принятый вариант организации связей предъявляет. Если число примеров понятий исчисляется десятками тысяч, а число понятий базового уровня онтологии тоже исчисляется десятками тысяч, и объем текста будет около тысячи слов, и оценка среднего числа связей не превысит для каждого текста 100 – 200, тогда мощность этого вида связей можно оценить в районе миллиона-двух. Столько же связей будет и в обратном направлении, так что нужно будет хранить число связей порядка нескольких миллионов, что не является катастрофическим. Но затраты памяти полностью компенсируются повышением скорости решения задачи поиска ответов на запросы. Важно отметить, что лексика документов по одной и той же тематике изо дня в день должна иметь тенденцию стабилизироваться, так что со временем рост числа понятий базового уровня должен быть ограниченным.

[1] В графовых базах возможна индексация, но она используется только для ускорения обработки запросов.

4. АЛГОРИТМ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ПОНЯТИЙ ОНТОЛОГИИ БАЗОВОГО УРОВНЯ

Общая схема алгоритма построения онтологии данных, представленных текстами на ЕЯ, изображена на рис.5. В ней предполагается, что обучающая выборка в виде множества текстов подготовлена в требуемой форме как вход блока, названного «Автоматическое извлечение понятий онтологии базового уровня из множества текстов». В качестве инструмента для решения задачи автоматической генерации понятий онтологии базового уровня используется *DBpedia Spotlight Service*. Необходимые пояснения к его использованию, а также документацию можно найти по ссылке [6].

На первом шаге каждый текст выборки данных поддаётся на вход инструмента *Spotlight Service*. Для этого используется API, предоставляемое сервисом. Для каждого текста выборки инструмент *Spotlight Service* возвращает набор URI-статей Википедии, которые соответствуют *понятиям*, найденным сервисом в тексте. Число возвращаемых URI регулируется *параметром уверенности* (англ. confidence): чем больше его значение, тем меньше понятий вернёт сервис для каждого текста. Объединение URI, соответствующих статьям Википедии, извлечённым из всех текстов выборки, отвечает множеству понятий онтологии базового уровня.

Инструмент *Spotlight Service* реализует функции предварительной обработки текстов, включая токенизацию, стемминг и лемматизацию, и извлекает из каждого текста, поступившего на вход, понятия, для которых значение выбранной меры важности превышает заданный порог. В англоязычной литературе задача однозначного определения смысла понятия называется Word Sense Disambiguation (WSD-задачей). Смысл понятия представлен ссылкой на словарную статью Википедии, в которой для выделенного понятия указывается множество его синонимов, а также другая полезная информация.

В терминах, принятых для описания таксономии данных, множество экземпляров данных, соответствующих некоторому понятию таксономии, принято называть его *объёмом* (англ. extent). Важно подчеркнуть, что каждое понятие онтологии базового уровня, выделенное в тексте, в дальнейшем (в прикладных задачах типа кластеризации текстов или их категоризации) интерпретируется как бинарный признак, который встречается в тексте или не встречается, а множество всех понятий, выделенных в тексте, интерпретируется как множество признаков, представляющих отдельный текст. Это множество признаков текста есть его характеристика, которую принято

называть *содержанием* объекта (англ. intent). Заметим, что в нашем случае содержание объекта (текста) представляет его ЕЯ-смысл.

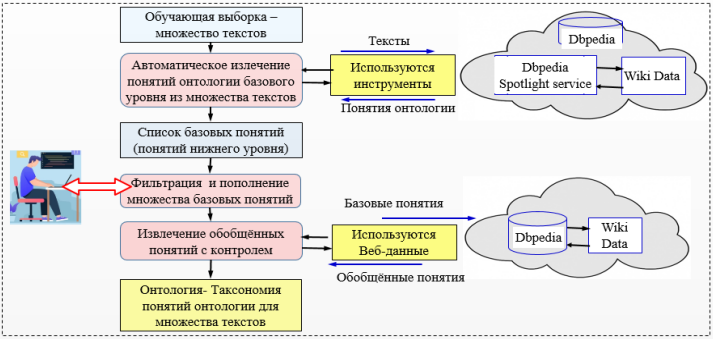


Рис.5. Контур автоматизированного построения онтологии множества текстов

Итак, в результате обработки текстов с применением инструмента Spotlight service, будут получены следующие результаты:

1. Каждому ЕЯ-тексту будет поставлен в соответствие вектор его признаков – множество понятий ЕЯ с указанием его меры важности, в качестве которой можно выбрать меру TF-IDF или меру, предложенную авторами инструмента. В итоге каждый текст будет представлен точкой в N-мерном векторном пространстве смыслов, где N – число найденных понятий для всех текстов выборки. Результат такого преобразования множества текстов в множество точек N-мерного пространства смыслов принято называть VSM-моделью (от англ. Vector Space Model).

2. Каждому найденному понятию будет поставлено в соответствие множество текстов, в которых это понятие встречается.

Итак, решением задачи будет множество *базовых понятий онтологии,* их связи с примерами и связи примеров с понятиями, о которых шла речь в разделе 3, а также VSM-модель текстов выборки.

Работа инструмента проверена на примере выборки текстов *ARXIV* [7]. Полный набор базовых понятий для этих данных, сгенерированный с помощью инструмента *DBpedia Spotlight Service*, включает в себя 1061 понятие. Каждое понятие отвечает некоторой статье Википедии и имеет множество примеров в данных (текстов), в которых это понятие встречается.

5. КОНТЕКСТ ПРОИЗВОЛЬНОГО ПОНЯТИЯ ОНТОЛОГИИ ДАННЫХ

Для характеристики свойств каждого понятия онтологии будем использовать структуру данных, называемую *контекстом понятия*:

$$Cont\left(P^{(k)}\right) =< P^{(k)}, A^{(k)}, N^{(k)}, p\left(P^{(k)}/A\right) >,$$

где $P^{(k)}$ – понятие базового уровня, $A^{(k)}$ – объем этого понятия (множество примеров понятия в базе данных), $N^{(k)}$ – мощность объёма понятия $A^{(k)}$, $p\left(P^{(k)}/A\right)$ – выборочная (априорная) вероятность примеров понятия $P^{(k)}$ в общей выборке текстов A, причём

$$p\left(P^{(k)}/A\right) = N^{(k)}/N(A), \quad (1)$$

где $N(A)$ – мощность всего множества примеров в базе данных.

Важно отметить, что знание контекста каждого *базового* понятия онтологии данных позволяет при необходимости вычислять объёмы и остальные атрибуты контекстов любых других понятий, которые могут быть получены путём специализации и обобщения базовых понятий, причём без дополнительного сканирования множества данных.

6. ОБОБЩЕНИЕ И СПЕЦИАЛИЗАЦИЯ ПОНЯТИЙ

Ключевую роль в описании семантики текстов играет структура онтологии данных. Её понятия формируются как обобщение понятий базового уровня. В разработанной технологии её построения важная роль отводится также понятиям, которые являются специализацией базовых понятий, которые участвуют в управлении построением онтологии на этапе обобщения. Поэтому параллельно с построением структуры обобщения строится также структура специализации понятий, двойственная по отношению к структуре понятий онтологии.

Для обобщённых понятий онтологии будем использовать обозначения, аналогичные тем, которые были приняты для базовых понятий: понятия уровня L будем обозначать символом $\boldsymbol{P}^{(k)}(L)$ и аналогично будем обозначать атрибуты его контекста , а именно

$$Cont\left(\boldsymbol{P}^{(k)}(L)\right) =< \boldsymbol{P}^{(k)}(L), \boldsymbol{A}^{(k)}(L), N^{(k)}(L), p\left(\boldsymbol{P}^{(k)}(L)/\boldsymbol{A}\right) >. \quad (2)$$

Понятие, двойственное по отношению к понятию $\boldsymbol{P}^{(k)}(L)$, обозначим символом $\boldsymbol{Q}^{(k)}(L)$. Для него аналогично вводится понятие контекста:

$$Cont(\boldsymbol{Q}^{(k)}(L)) =< \boldsymbol{Q}^{(k)}(L), \boldsymbol{B}^{(k)}(L), M^{(k)}(L), p\left(\boldsymbol{Q}^{(k)}(L)/\boldsymbol{A}\right) >.$$

В этой формуле элементы, расположенные на некоторой позиции, имеют в точности тот же смысл, что и элементы в формуле (2) в контексте соответствующего понятия онтологии. Значение вероятности $p\left(\boldsymbol{Q}^{(k)}(L)/\boldsymbol{A}\right)$ в контексте двойственного понятия онтологии вычисляется по формуле, аналогичной формуле (1):

$$p\left(\boldsymbol{Q}^{(k)}/\boldsymbol{A}\right) = M^{(k)}/N(\boldsymbol{A}).$$

Итак, над множеством базовых понятий строятся две структуры – структура обобщения понятий и двойственная ей структура специализации. Структура обобщения строится с помощью инструмента *DBpedia Spotlight Service,* двойственная структура строится для неё автоматически путём

простого вычисления компонент контекста $\boldsymbol{B}^{(k)}(L)$, $M^{(k)}(L)$ и $p\left(\boldsymbol{Q}^{(k)}(L)/\boldsymbol{A}\right)$ по очевидным формулам.

При работе алгоритма итеративного общении базовых понятий онтологии возникает проблема его остановки, поскольку иначе можно получить онтологию с катастрофически большим числом понятий. Например, для данных Amazon [9] технология, поддерживаемая инструментами *DBpedia*, приводит к иерархии понятий, содержащей 24 уровня, а результирующая онтология может содержать число понятий, превосходящее число слов в множестве текстов, на базе которых эта онтология строится. Понятно, что для практических целей такая онтология не только не нужна, но и вредна с позиций вычислительной эффективности. Поэтому нужно решать проблему остановки.

Авторами предложены два семантических критерия остановки, Первый из них строится на основе сравнения контекстов пары понятий онтологии, находящихся в отношении непосредственного следования. Поясним его суть на примере. Пусть в построенном фрагменте онтологии имеются два понятия, например, *Dynamic Systems* и *System theory*, при этом второе понятие является обобщением первого. Пусть оба понятия имеют одинаковый объем. Если в онтологию ввести обобщение *System theory* для понятия *Dynamic Systems*, то объем обобщённого понятия в этой паре понятий будет тот же, что и у понятия-предшественника, и потому оно не добавляет в онтологию дополнительного смысла *о семантике текста.* Более того, если ввести в онтологию обобщённое понятие *System theory* и далее продолжать процесс обобщения понятия *Dynamic Systems,* то в итоге может появиться большое число новых более общих понятий с абсолютно тем же объёмом и, значит, смыслом, поскольку любое более общее понятие всегда содержит в себе объем более частного понятия. Это рассуждение позволяет сформулировать Критерий 1 останова процесса обобщения:

Критерий 1. Для любой пары понятий порядковой структуры онтологии данных $\boldsymbol{P}^{(k)}(L)$ и $\boldsymbol{P}^{(r)}(L+1)$, таких, что $\boldsymbol{P}^{(k)}(L) < \boldsymbol{P}^{(r)}(L+1)$ (сравнимых по порядку обобщения), которые имеют одинаковый объем, т.е. $\boldsymbol{A}^{(k)}(L)$=$\boldsymbol{A}^{(r)}(L+1)$, в онтологию включается только *меньшее* из них, т. е. понятие $\boldsymbol{P}^{(k)}(L)$, в данном случае.

Второй критерий выводится из взаимосвязи свойств понятий онтологии и двойственных им элементов структуры, построенных над одним и тем же множеством базовых понятий. Если в онтологии данных появляется понятие, которое обобщает, например, пару понятий, которые не имеют общих элементов в своих объёмах, то это означает, что им соответствуют независимые множества примеров и понятие, обобщающее их, не содержит новой информации о связях этих понятий. При этом двойственное понятие

для такого обобщения будет иметь нулевой объем, что можно использовать как критерий останова:

Критерий 2. Если некоторое понятие $\boldsymbol{P}^{(k)}(L)$ онтологии таково, что двойственный ему элемент $\boldsymbol{Q}^{(k)}(L)$ структуры специализации понятий имеет пустой объем, т.е. $\boldsymbol{B}^{(k)}(L) = \phi$, то понятие $\boldsymbol{P}^{(k)}(L)$ и все большие него по порядку не включаются в онтологию данных.

Дадим теперь описание итеративного алгоритма построения онтологии данных на этапе обобщение базовых понятий. В нем на каждой итерации в качестве исходных данных используется множество понятий онтологии, представленных своими контекстами:

$$\{Cont\left(\boldsymbol{P}^{(k)}\right) =< \boldsymbol{P}^{(k)}, \boldsymbol{A}^{(k)}, N^{(k)}, p\left(\boldsymbol{P}^{(k)}/\boldsymbol{A}\right) >\}, k = 1, 2, \dots, n(k).$$

Базовые понятия формируют первый уровень целевой онтологии данных. Заметим, на этом уровне понятия онтологии и двойственные им понятия структуры специализации – это одно и то же.

Стартуя от уже построенного множества базовых понятий, инструмент *Spotlight Service* ставит в соответствие каждому найденному понятию URI статьи в Википедии. потому для него можно получить его родительские категории и по ним затем искать возможные обобщения. Далее даётся более формальное описание итераций:

Шаг 1. Для множества понятий онтологии, подлежащих обобщению, выполняется шаг обобщения с помощью инструментов *DBpedia Spotlight Service*. Для каждого нового понятия вычисляются значения атрибутов его контекста и контекста двойственного понятия.

Шаг 2. Если среди вновь найденных двойственных понятий есть понятия с пустым объёмом, то отвечающие им обобщённые понятия онтологии маркируются служебным символом, который информирует программу о том, что эти понятия далее не подлежат обобщению.

Шаг 3. Если среди вновь построенных понятий имеются такие, для которых выполняется условие критерия 1, то эти понятия маркируются служебным символом, который информирует программу о том, что данное понятие не подлежит дальнейшему обобщению.

Шаг 5. Если множество понятий онтологии, подлежащее обобщению и не помеченных служебным символом, не пусто (т.е. имеются понятия, допускающие обобщение), то номер шага обобщения увеличивается $(L = L + 1)$ и алгоритм переходит в начало шага 1.

Конец алгоритма.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложен и экспериментально проанализирован алгоритм автоматизации процесса построения онтологии выборки ЕЯ-текстовых данных. Алгоритм базируется на использовании семантических ресурсов

Wikipedia и инструментов Dbpedia. Разработанный программный комплекс зарегистрирован в [10].

К новым научным результатам работы относятся (1) вероятностная модель онтологии, (2) модель связей базовых понятий онтологии и их экземпляров, позволяющая существенно повысить скорость отработки запросов, и (3) критерии останова итеративного процесса построения онтологии, которые, как показали эксперименты, позволяют существенно повысить скорость её построения и исключить из неё понятия, которые не несут дополнительной информации о связях на множестве понятий ЕЯ-текстов обучающей выборки. Алгоритм может быть применён к задачам инкрементного построения онтологии.

Дальнейшие исследования планируется сконцентрировать на построении онтологии текстовых данных в интересах задач принятия решений в ситуациях, когда выборки текстовых данных являются малыми или они вообще отсутствуют.

Литература

1. Gorodetsky V., Samoylov V., Tushkanova O. Agent-based Customer Profile Learning in 3G Recommending Systems: Ontology-driven multi-source cross-domain case // In Proc. of the International Workshop Agent-Based Customer Profile Learning in 3G Recommender Systems: Ontology-Driven Multi-source Cross-Domain Case. In L. Cao et al. (Eds.): LNAI 9145, 2015, P. 1-14.
2. Городецкий В.И., Тушканова О.Н. Онтология и персонификация профиля пользователя в рекомендующих системах третьего поколения // Онтологии проектирования, № 3, 2014, С. 7-31.
3. IBM-Watson. https://www.ibm.com/watson/natural-language-processing
4. Synthesis Lectures on the Semantic Web: Theory and Technology. https://www.morganclaypool.com/toc/wbe.1/1/1
5. DBpedia. https://wiki.dbpedia.org/about
6. DBpedia Spotlight Shedding light on the web of documents. https://www.dbpedia-spotlight.org/
7. ARXIV https://archive.ics.uci.edu/ml/datasets/Sentence+Classification
8. Городецкий В.И., Тушканова О.Н. Эффективные методы обработки больших данных для принятия решений. Сб. пленарных докладов Российской конференции «Интеллектуальные системы управления», СПб, 2016.
9. http://jmcauley.ucsd.edu/data/amazon/index_2014.html
10. Тушканова О.Н. Компонент автоматического извлечения онтологии данных на основе семантического анализа понятий. https://www.elibrary.ru/item.asp?id=39313926

УДК 519.21

ПОДХОД К ПОСТРОЕНИЮ ВЕРОЯТНОСТНОЙ МОДЕЛИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ СОЦИОИНЖЕНЕРНОЙ АТАКИ МЕЖДУ ДВУМЯ ПОЛЬЗОВАТЕЛЯМИ*

Хлобыстова А.О.
e-mail: aok@dscs.pro
***Абрамов М.В.**, к.т.н.*
e-mail: mva@dscs.pro
СПб ФИЦ РАН
***Тулупьев А.Л.**, д.ф.-м.н.*
e-mail: alt@dscs.pro
СПбГУ

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время основной тенденцией в сфере угроз информационной безопасности остаётся социальная инженерия [1]. При этом повсеместный переход к цифровым технологиям заставляет большинство организаций расширить своё присутсвие в Интернете, что приводит в том числе и к бОльшим уязвимостям [2], а также побуждает злоумышленников изобретать новые способы социоинженерных атак, способных скомпроментировать даже самых осведомлённых пользователей [3, 4]. В связи с этим возникает необходимость в создании инструмента, способствующего повышению уровня защищённости сотруников и опосредованно информационных систем от социоинженерных атак. Комплексный подход к созданию такого инструмента, базирующийся на построении оценок защищённости/поражаемости пользователей информационных систем, был предложен в [5]. Также в своей работе авторы предлагают подходы к моделированию многоходовых социоинженерных атак – атак, при которых задействуется не один пользователей, а цепочка. Такие атаки представляют собой особую угрозу для информационной безопасности

* Работа выполнена по ГЗ СПб ФИЦ РАН № 0073-2019-0003; поддержана Санкт-Петербургским государственным университетом, проект № 73555239; при финансовой поддержке РФФИ, проект №20-07-00839

организации, так как нацелены на заполучение особо ценной информации и важных документов [6].

Для моделирования многоходовых социоинженерных атак удобно использовать социальный граф сотрудников организации [5]. Вершины такого графа ассоциированы с пользователями информационных систем, а дуги являются связями между ними. Согласно [5] каждой вершине графа сопоставлена вероятностная оценка успеха одноходовой социоинженерной атаки на пользователя, с которым данная вершина ассоциирована. При расчёте оценок успеха многоходовых социоинженерных атак необходимо учитывать, как оценки успеха одноходовой атаки, так и силу взаимосвязей между пользователями. Открытым источником информации о взаимосвязях между пользователями могут служить социальные сети, а одним из способов оценки интенсивности взаимосвязей может являться оценка информационного влияния одного пользователя на другого [7]. Целью настоящего исследования стало улучшение подхода к построению вероятностных оценок распространения социоинженерных атак между двумя пользователями за счёт учёта информационного влияния.

Новизна исследования заключается в разработке нового подхода к оценке распространения социоинженерной атаки между двумя пользователями. Значимость исследования заключается в создании основы для последующего моделирования многоходовых социоинженерных атак и заложении фундамента для дальйнейшей программной автоматизации.

2. РЕЛЕВАНТНЫЕ РАБОТЫ

Модель, описывающая процесс распространения множественной информации предлагается в [8]. Она основывается на модели динамики численности населения. К отличительным преимуществам можно отнести учёт взаимодействия между распространяемой информацией. Модель хорошо подходит для численного моделирования, однако неприменима при поиске конкретных сценариев распространения атаки.

Авторы [9] предлагают подход, основывающийся на обнаружении перекрывающихся сообществ, для идентификации вершин социального графа, распространение информации через которые максимизировало бы количество целевых вершин, на которые оказывается влияние. В [10] также рассматривается задача максимизации влияния, при этом распространение информации моделируется адаптируемой вероятностной независимой каскадной моделью. Данные подходы могут быть полезны на последующих этапах

настоящего исследования. Также в данном срезе интересным видится исследование [11], целью которого является поиск набора промежуточных узлов, которые бы способствовали максимизации вероятности влияния начального узла на целевой, для достижения данной цели предлагаются две различные модели диффузии. Подход к количественной оценке социального влияния на основе социологических теорий и теории вероятностных рассуждений был предложен в [12]. Данный подход интересен в контексте выделения наиболее влиятельного пользователя в социальной сети, но мало применим для моделирования распространения социоинженерной атаки.

Модель информационного влияния одного пользователя на другого, разработанная в [7], базируется на публичных действиях, которые совершают пользователи. Например, это может быть публикация поста, оставление комментария, отправка подарка и т.д. Данная модель наиболее подходит для настоящего исследования, так как с помощью неё могут быть получены оценки взаимодействия как между двумя пользователями, так и произведено обобщение на цепочку пользователей.

3. МОДЕЛЬ ПОСТРОЕНИЯ ВЕРОЯТНОСТНЫХ ОЦЕНОК МНОГОХОДОВЫХ СОЦИОИНЖЕНЕРНЫХ АТАК

Согласно [5] оценка вероятности того, что социоинженерная атака распространится между пользователями рассчитывается по формуле $P = 1 - Q,$ где Q – оценка вероятности того, что социоинженерная атака не распространится между пользователями, учитывающая интенсивности различных видов связи. $Q = \prod_i (1 - q_i)^{n_t}$, где q_i – оценка вероятности успеха социоинженерной атаки при одном эпизоде взаимодействия, n_t – число эпизодов. Q предлагалось рассчитывать следующим образом:

$$Q = (1 - p_{rel})(1 - p_{\text{likes}})^{\text{count\_likes}} \cdot (1 - p_{\text{reposts}})^{\text{count\_reposts}} \cdot$$
$$(1 - p_{\text{com\_photos}})^{\text{count\_photos}} \cdot (1 - p_{\text{com\_groups}})^{\text{count\_groups}},$$

где p_{rel} – вероятность успеха распространения атаки от сотрудника к сотруднику, основанная на типе декларируемой в социальной сети связи. В качестве p_{rel} могут быть использованы оценки, полученные [304]. p_{likes}, p_{reposts}, $p_{\text{com\_photos}}$, $p_{\text{com\_groups}}$ – оценки вероятности успеха социоинженерной атаки, полученные на основе лайков, репостов, общих

фотографий и сообществ, count_likes, count_reports, count_photos, count_groups – число таких эпизодов.

4. МОДЕЛЬ РАЧЁТА ИНФОРМАЦИОННОГО ВЛИЯНИЯ ПОЛЬЗОВАТЕЛЯ

Рассмотрим модель предложенную в [7] в контексте социоинженерных атак.

В первую очередь введём множество агентов N как множество пользователей информационной сети $U = \{U_1,\ldots,U_n\}$, которое будет состоять из сотрудников анализируемой организации и их друзей, информация о которых может быть получена из открытых источников, а именно из социальных сетей.

Множество K состоит из допустимых типов действий (например, публикация поста, оставление лайка). Для однозначной идентификации действий, совершаемых пользователями, введём Δ – множество действий, которое будет состоять из элементов $a \in \Delta$, $a = (U_i, K_j, T_k)$, где U_i – пользователь $(U_i \in U)$, который совершил действие типа K_j, $(K_j \in K)$ в момент времени T_k, $(T_k \in T)$. Будем считать, что один пользователь не может совершать действие чаще, чем 1 раз в секунду, и множество T является дискретным.

Зададим бинарное отношение частичного порядка – отношение причины $a \to b$. Например, пусть действие a – публикация поста в социальной сети пользователем U_i в момент времени T_i, действие b – добавление комментария к этому посту пользователем U_j в момент времени T_j $(T_i < T_j)$, тогда мы можем сказать, что действие a является причиной действия b и для них можно задать отношение $a \to b$.

Для подмножества действий $A \subseteq \Delta$ определим множество всех его последствий $\pi(A) = \{b \in \Delta \mid \exists a \in A : a \to b\}$. Введение такого множества требуется для сопоставления в дальнейшем всех последствий действий конкретного пользователя к множеству всех действий, которые он совершил, и является одним из способов получения количественной оценки влияния одного пользователя на другого. Действия, которые не являются последствием каких-либо других действий можно выделим в отдельное множество

$\Delta^0 = \{b \in \Delta \mid \exists\, a \in A : a \to b \Rightarrow a = b\}$ – множество первоначальных действий.

Введём функцию значимости $\Phi : 2^{\Delta} \to [0; +\infty)$ такую, что $\Phi(\Delta) > 0$, Φ – монотонная, если $A, B \subseteq \Delta, A \subset B,$ то $\Phi(A) \le \Phi(B)$, Φ – аддитивная, $\Phi(A \cup B) = \Phi(A) + \Phi(B), A, B, A \cup B \subseteq \Delta.$ Иными словами, область определения функции значимости – это все подмножества множества действий, а сама функция сопоставляет подмножеству множества действий некое неотрицательное число.

Функция $\alpha : \Delta \to U$ – сопоставляет действию агента, который его совершил.

Согласно [7] функция влияния пользователя U_i на пользователя U_j, с одной стороны, может основываться только на начальных действиях агента, тогда она задаётся следующим образом:

$$\chi(U_i, U_j) = \begin{cases} \dfrac{\Phi(\pi(\delta^0_{U_i}) \cap \delta_{U_j})}{\Phi(\delta_{U_j})}, & \Phi(\delta_{U_j}) > 0 \\ 0, & \Phi(\delta_{U_j}) = 0 \end{cases}, \qquad (1)$$

где $\delta_{U_j} = \{a \in \Delta \mid \exists\, \alpha(a) \in U_j\}$ – множество действий агента $U_j \in U$, $\pi(\delta^0_{U_i}) = \{b \in \Delta^0 \mid \exists\, a \in \delta_{U_i} : a \to b\}$ – множество действий, которые являются последствиями начальных действия агента $U_i \in U$.

С другой стороны, функция влияния пользователя U_i на пользователя U_j может основываться на всех действиях агента, в таком случае она будет задана следующим образом:

$$\chi(U_i, U_j) = \begin{cases} \dfrac{\Phi(\pi(\delta_{U_i}) \cap \delta_{U_j})}{\Phi(\delta_{U_j})}, & \Phi(\delta_{U_j}) > 0 \\ 0, & \Phi(\delta_{U_j}) = 0 \end{cases}, \qquad (2)$$

где $\delta_{U_j} = \{a \in \Delta \mid \exists\, \alpha(a) \in U_j\}$ – множество действий агента $U_j \in U$, $\pi(\delta_{U_i}) = \{b \in \Delta \mid \exists\, a \in \delta_{U_i} : a \to b\}$ – множество действий, которые являются последствиями всех действия агента $U_i \in U$.

5. ВЕРОЯТНОСТНАЯ МОДЕЛЬ МНОГОХОДОВОЙ СОЦИОИНЖЕНЕРНОЙ АТАКИ С УЧЁТОМ ИНФОРМАЦИОННОГО ВЛИЯНИЯ

Для применения моделей (1) и (2) информационного влияния прежде всего расширим представление действия следующим образом $a=\left(U_i,K_j,T_k,a\right)$, где U_i – пользователь $\left(U_i\in U\right)$, который совершил действие типа K_j, $\left(K_j\in K\right)$ в момент времени T_k, $\left(T_k\in T\right)$ в ответ на действие $a=(U_{l_1},K_{l_2},T_{l_3})$, $U_{l_1}\in U$, $K_{l_2}\in K$, $T_{l_3}\in T, T_k<T_{l_3}$. В случае, если действие a не является последствием какого-либо другого действия $a=\varnothing$. Тогда множество первоначальных действий Δ^0 можно представить как $\Delta^0=\left\{a\in\Delta\middle|\,pr_4(a)=\varnothing\right\}$, где $pr_i(a)$ – операция проекции, выделяющая i - ую компоненту элемента a. Множество всех последствий подмножества действий $A\subseteq\Delta$ будет выглядеть как $\pi(A)=\left\{b\in\Delta\middle|\exists a\in A\colon pr_4(b)=(pr_1(a),pr_2(a),pr_3(a))\right\}$. Включение в модель представления действия a элемента a необходимо для лучшей формализации рассматриваемых моделей, а также для упрощения в дальнейшем программного задания данных объектов. В тоже время такое задание не создаёт ситуации бесконечной вложенности действий.

Зададим функцию значимости $\Phi:2^{\Delta}\to[0;+\infty)$, как мощность множества к которому она применяется $\Phi(A)=\left|A\right|$, $A\subset\Delta$. Тогда (2) примет следующий вид.

$$\chi(U_i,U_j)=\begin{cases}\dfrac{\left|\pi(\delta_{U_i})\cap\delta_{U_j}\right|}{\left|\delta_{U_j}\right|}, & \delta_{U_j}\neq\varnothing\\ 0, & \delta_{U_j}=\varnothing\end{cases}. \qquad (3)$$

Сведём $\chi(U_i,U_j)$ к оценкам вероятности. Будем считать, что пространство Ω состоит из элементарных событий ω_{ij} – пользователь U_i имеет влияние на пользователя U_j. Введём следующее ограничение: Ω – конечно, $\left|\Omega\right|\le m$, где $m=2^n$, n – число вершин в рассматриваемом социальном графе сотрудников организации. Сигма-алгебра A – семейство подмножеств Ω, $\mathsf{A}=2^{\Omega}$. Проверим, что функция влияния одного пользователя на другого – вероятностная мера:

- Неотрицательность очевидна из задания.
- Аддитивность была доказана в [7] предложение 3.2.
- Конечность следует из аддитивности и того, что $|\Omega| \le m$.

Таким образом, $\chi(U_i, U_j)$ может быть использована для оценки вероятности того, что социоинженерная атака распространится между пользователями. Искомая формула распространения социоинженерной атаки от пользователя U_i до U_j будет иметь следующий вид:

$$P_{ij} = 1 - (1 - p_{rel}) \cdot (1 - \chi(U_i, U_j)),$$

где p_{rel} – вероятность успеха распространения атаки от сотрудника к сотруднику, основанная на типе декларируемой в социальной сети связи, $\chi(U_i, U_j)$ – оценка вероятности влияния одного пользователя на другого.

Приведём пример расчёта согласно полученной модели. Для понятности изложения ограничимся 3-мя рассматриваемыми пользователями и 3-мя допустимыми типами их действий. Множество пользователей $U = \{U_1, U_2, U_3\}$. Множество допустимых действий $K = \{K_1, K_2, K_3\}$, где K_1 – публикация поста, K_2 – комментирование поста, K_3 – лайк поста. Множества действий пользователей заданы следующим образом:

$$\delta_{U_1} = \{(U_1, K_1, T_1, \varnothing), (U_1, K_3, T_4, (U_2, K_1, T_2)), (U_1, K_1, T_7, \varnothing)\},$$

$$\delta_{U_2} = \{(U_2, K_1, T_2, \varnothing), (U_2, K_2, T_6, (U_3, K_1, T_5)), (U_2, K_3, T_8, (U_1, K_1, T_7))\},$$

$$\delta_{U_3} = \{(U_3, K_1, T_3, \varnothing), (U_3, K_1, T_5, \varnothing)\}.$$

Пусть пользователь U_2 отметил U_1 как «лучший друг», тогда согласно [13] $p_{rel}^{12} = 0,7838$, остальные типы связей характеризуются нахождением в списке друзей $p_{rel} = 0,2938$.

Вычислим вероятность успеха распространения социоинженерной атаки от пользователя U_1 к пользователю U_2.

$$P_{12} = 1 - (1 - 0,7838) \cdot \left(1 - \frac{|\pi(\delta_{U_1}) \cap \delta_{U_2}|}{|\delta_{U_2}|}\right) = 1 - 0,2162 \cdot \left(1 - \frac{1}{3}\right) \approx 0,8559.$$

Вычислим вероятность успеха распространения социоинженерной атаки от пользователя U_1 к пользователю U_3.

$$P_{13} = 1-(1-0,2938)\cdot\left(1-\frac{\left|\pi(\delta_{U_1})\cap\delta_{U_3}\right|}{\left|\delta_{U_3}\right|}\right) = 1-0,7062\cdot\left(1-\frac{0}{2}\right) \approx 0,2938.$$

То есть согласно полученным оценкам вероятность того, что социоинженерная атака распространится от пользователя U_1 к пользователю U_2 выше, чем от U_1 к U_3.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в статье предложен подход к построению вероятностных оценок распространения социоинженерной атаки между двумя пользователями за счёт учёта информационного влияния пользователей. Теоретическая значимость исследования заключается в создании основы для последующего моделирования многоходовых социоинженерных атак. Практическая значимость состоит в формировании базы для программной автоматизации идентификации наиболее вероятных и критичных сценариев развития социоинженерных атак, и как следствие создании инструмента, помогающего лицам, принимающим решения, осуществлять эффективные меры по устранению уязвимостей.

Литература

1. Information security threats of 2021: The Top List. URL: https://itglobal.com/company/blog/infosec-threats-2021/ (дата обращения: 11.03.2021)
2. Top 10 Cybersecurity Trends in 2021. URL: https://www.securebrain.co.jp/eng/blog/cybersecurity-trends-2021/ (дата обращения: 12.03.2021)
3. Klimburg-Witjes N., Wentland A. Hacking Humans? Social Engineering and the Construction of the “Deficient User” in Cybersecurity Discourses //Science, Technology, & Human Values. – 2021. – P. 0162243921992844.
4. Wang Z., Zhu H., Sun L. Social Engineering in Cybersecurity: Effect Mechanisms, Human Vulnerabilities and Attack Methods //IEEE Access. – 2021. – Т. 9. – P. 11895-11910.
5. Абрамов М.В., Тулупьева Т.В., Тулупьев А.Л. Социоинженерные атаки: социальные сети и оценки защищенности пользователей. – СПб.: ГУАП, 2018. 266 с.
6. Koide T., Chiba D., Akiyama M., Yoshioka K., Matsumoto T. To Get Lost is to Learn the Way: An Analysis of Multi-Step Social Engineering Attacks on the Web //IEICE TRANSACTIONS on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences. – 2021. – Vol. 104. – №. 1. – Pp. 162-181.

7. Gubanov D.A., Chkhartishvili A.G. Influence levels of users and meta-users of a social network //Automation and Remote Control. – 2018. – Vol. 79. – №. 3. – Pp. 545-553.
8. Chen A., Ni X., Zhu H., Su G. Model of warning information diffusion on online social networks based on population dynamics //Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. – 2021. – Vol. 567. – P. 125709.
9. Wang Z., Sun C., Xi J., Li X. Influence maximization in social graphs based on community structure and node coverage gain //Future Generation Computer Systems. – 2021. – Vol. 118. – Pp. 327-338.
10. Kahr M., Leitner M., Ruthmair M., Sinnl M. Benders decomposition for competitive influence maximization in (social) networks //Omega. – 2021. – Vol. 100. – P. 102264.
11. Zhang Y., Guo J., Yang W., Wu W. Targeted Activation Probability Maximization Problem in Online Social Networks //IEEE Transactions on Network Science and Engineering. – 2021. – Vol. 8. – №. 1. – Pp. 294-304.
12. Vega L., Mendez-Vazquez A., Lopez-Cuevas A. Probabilistic reasoning system for social influence analysis in online social networks //Social Network Analysis and Mining. – 2021. – Vol. 11. – №. 1. – Pp. 1-20.
13. Khlobystova A.O., Tulupyeva T.V., Maksimov A.G., Korepanova A.A. An approach to quantification of relationship types between users based on the frequency of combinations of non-numeric evaluations. // In: Kovalev S., Tarassov V., Snasel V., Sukhanov A. (eds) Proceedings of the Fourth International Scientific Conference “Intelligent Information Technologies for Industry” (IITI’19). IITI 2019. Advances in Intelligent Systems and Computing, Springer, Cham. – 2019. – Vol. 1156. – Pp. 206-213.

УДК 614.8 + 002.6:004.89

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДИКИ СЦЕНАРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ВЕРОЯТНОСТНЫХ РАСЧЕТОВ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭЛЕКТОРАЛЬНЫХ КАМПАНИЙ

***Азаров А.А.**, к.т.н.*
e-mail: artur-azarov@yandex.ru
Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации,
Университет ИТМО
***Суворова А.В.**, к.ф.-м.н.*
e-mail: suvalv@mail.ru
НИУ ВШЭ
***Бродовская Е.В.**, д.пол.н.*
e-mail: brodovskaya@inbox.ru
Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации
Васильева О.В.
e-mail: vasiljevaa@mail.ru
СПбГУ
Азарова В.А.
СПб ФИЦ РАН

1. ВВЕДЕНИЕ

Повсеместная цифровизация современного общества приводит к экспоненциальному росту объемов информации, которая размещается в сети Интернет. Существенный вклад в этот рост имеют социальные сети, распространяющие как традиционный текстовый и графический, так и современный видео контент [4, 5]. Очевидно, что существенная часть контента является прямой или скрытой рекламой, имеющей колоссальное влияние на современную молодежь. В той или иной степени, все области жизни человека затронуты рекламой, размещаемой в социальных сетях. Многие сферы жизни обсуждаются, создаются тематические форумы, группы и сообщества. Одной из таких сфер, вызывающей бурное обсуждение в социальных сетях и, зачастую, имеющую существенный мобилизационный потенциал для офф-лайн

активности, является политика. В преддверии к выборам в Государственную Думу Российской Федерации в 2021 году, огромное внимание как провластного, так и оппозиционного партийного руководства приковано к продвижению интереса своих партий в социальных сетях, а также к мобилизации электоральной поддержки своих партий с помощью социальных сетей.

Одним из методов расчета возможных эффектов от изменения политики работы в группах и сообществах в социальных сетях является сценарное моделирование. Широкое использование этого математического аппарата показывает его сравнительно высокую эффективность. Так, методы сценарного моделирования используются при моделировании социально-экономических и государственных процессов, а также оценке различных проектов в этой области [2, 8-14]. Кроме того, такого рода имитационное моделирование используется как основа разработки стратегии противодействия инсайдерской угрозе информационной безопасности [7]. Наконец, методы сценарного моделирования нашли своё применение и в политическом поле. Там, с помощью этих методов происходит оценка проведения политики нейтралитета в Европе, в том числе с учетом вероятности дальнейшего расширения НАТО на восток [6]. А также они используются для оценки информационных угроз воздействия различных методов политической манипуляции, влияющих на социальное развитие страны. Методы сценарного моделирования, в этом случае, используются для оценки возможных альтернативных вариантов их реализации в интернет-пространстве [3, 1].

В статье представлено применение методов сценарного моделирования для оценки потенциала масштабирования электоральной поддержки политических партий посредством цифровых коммуникаций (сообществ в социальных сетях).

2. ОПИСАНИЕ МОДЕЛЕЙ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В СЦЕНАРНОМ МОДЕЛИРОВАНИИ

Для оценки потенциала масштабирования электоральной поддержки политических партий посредством цифровых коммуникаций (сообществ в социальных сетях) всего было рассмотрено 13 политических партий, при этом с учетом слияния партии «Справедливая Россия» с партиями «За правду» и «Патриотами России» необходимо было рассмотреть 15 политический партий. Для удобства моделирования все партии были рассмотрены как самостоятельные единицы, так как различные метрические показатели партийных сообществ в социальных сетях имели существенные различия. Вместе с

тем, было проведено моделирование и по «объединенной» партии «Справедливая Россия», при этом, в зависимости от целесообразности тех или иных действий, какие-то метрические показатели партий усреднялись, а какие-то суммировались

Для оценки развития электоральной поддержки, в первую очередь, необходимо провести оценку тех сообществ, которые существуют в социальных сетях и осуществляют прямую поддержку политических партий. Как правило, рассматривались сообщества, созданные партийными функционерами. Для этого были отобраны сообщества в трех основных социальных сетях: ВКонтакте, Одноклассники, Facebook.

Для первичного анализа метрических показателей групп в социальных сетях рассматривались следующие элементы:

- количество участников;
- показатель «ботовости» сообщества;
- интенсивность информационного потока;
- равномерность информационного потока;
- количество лайков и репостов новостей.

Дополнительно необходимо отметить, что показатели «ботовости» сообщества рассчитывались по 3 различным методикам. Затем в моделирование включалось среднее значение ботовости для каждого сообщества, рассчитанное по всем трем методикам. Первые две использованные методики – это встроенные методы расчета «ботовости» сообществ, реализованные в библиотеках, с помощью которых осуществлялось подключение к API социальных сетей. Третья методика была разработана авторами настоящего исследования. Данная методика заключается в следующем. Любому пользователю, состоящему в сообществе, присваивается изначальная оценка «веса», равная 0. Затем происходит расчет дополнительных параметров и, в качестве итоговой оценки, применяется формула: если $b - h > 5$, где b – расчетный показатель «ботовости» аккаунта, а h – расчетный показатель «человечности» (нефейковости) аккаунта, то профиль относится к ботовым, если условие не выполняется, то к реальному человеку.

Показатель b рассчитывается по формуле: $b = k_1 + k_2 + k_3 + k_4$, где: k_1 – аккаунт удален – +20; k_2 – аккаунт забанен – +10; k_3 – на аккаунте содержится запись, что пользователь последний раз был больше полугода назад – +2; k_4 – на аккаунте не указан город – + 0,5.

Показатель h рассчитывается по следующей формуле $h = k_1 + k_2 + k_3$, где: k_1 – у аккаунта заменен id – +2; k_2 – аккаунт

верифицирован – +20; k_3 – на аккаунте указаны ссылки на другие сети – +1-5 (в зависимости количества указанных на странице социальных сетей).

Далее для анализа сообществ используется показатель «чистое количество пользователей», который рассчитывается как разница между выявленным в ходе первичного анализа количеством пользователей и усредненным показателем ботовости сообщества. Таким образом, рассчитываются только, предположительно, действующие участники сообщества, что позволяет сделать вывод о реальном охвате аудитории данным конкретным сообществом.

При рассмотрении показателей динамики информационного потока рассматриваются два показателя это его интенсивность и равномерность. Интенсивность – среднее количество опубликованных сообщений за период, то есть это отношение $\frac{m}{d}$, где m – общее количество сообщений, d – общий временной период. В представленном исследовании, при анализе сообществ, рассматривались месячные периоды.

Равномерность информационного потока – более сложный показатель. Он показывает, что цифровые акторы, то есть модераторы группы, лидеры общественного мнения или другой тип активных пользователей, систематически и на постоянной основе генерируют поток сообщений. В данном случае используется значение, рассчитывающееся следующим образом: $\frac{\frac{m_1}{d_1}\frac{d_2}{m_2}+\frac{m_2}{d_2}\frac{d_3}{m_3}+\ldots+\frac{m_{n-1}}{d_{n-1}}\frac{d_n}{m_n}}{n}$, m_i – количество сообщений за i период, d_i – i промежуток времени. Логично использовать равные промежутки времени, соответственно $d_1 = d_2 = \ldots = d_n$. В этом случае приведенная выше формула приобретает вид $\frac{\frac{m_1}{m_2}+\frac{m_2}{m_3}+\ldots+\frac{m_{n-1}}{m_n}}{n}$. В числителе стоит сумма значений приращений количества сообщений в каждом периоде, затем применяется среднее значение приращений. Очевидно, что в случае, если данный показатель по своему значению стремится к 1, то поток может рассматриваться как равномерный.

После расчета всех указанных выше показателей для всех трёх социальных сетей, была построена сценарная модель развития он-лайн политической активности партий. Особо отметим, что сценарная модель

должна учитывать возможности изменения сценариев развития всех 15 партий.

Каждый сценарный план должен содержать ежемесячное описание динамики прироста показателей частоты публикаций, количества пользователей и активности пользователей, которая оценивается через количество лайков и репостов новостей. Затем выводятся обобщенные показатели, которые показывают пронозируемый электоральный потенциал партий и оценку их результатов на выборах.

Для реализации указанного функционала был разработан имитационный стенд на языке Java. Очевидным представляется допущение, что руководство партийных групп в социальных сетях в преддверии выборов изменит публикационную политику тем или иным способов. Вероятнее всего, будет повышена динамика информационного потока. Кроме того, можно ожидать, что новости такого рода сообществ будут дополнительно размещаться в дружественных сообществах. Так или иначе, обе этих инициативы будут влиять, в том числе, и на охват аудитории. Что в числовом выражении отразиться на количестве просмотров, лайков, комментариев и репостов размещаемых новостей.

Для реализации данного допущения в имитационном стенде были использованы случайные величины, имеющие нормальное распределение. При этом, для разных партий были выбраны разные показатели математического ожидания и дисперсии, основанные на экспертных заключениях о возможностях тех или иных партий. Так, были выбраны следующие показатели для моделирования:

- Для крупных парламентских партий были, к которым были отнесены «Единая Россия», «КПРФ», «ЛДПР», «Справедливая Россия», «Яблоко», «Парнас» были выбраны случайные величины, имеющие нормальное распределение с математическим ожиданием равным 40 и дисперсией, равной 5.
- Для новых партий и партий, имеющих среднюю степень вовлеченности в политические процессы государства, к которым были отнесены «Новые люди», «За правду», «Зеленая альтернатива» были выбраны случайные величины, имеющие нормальное распределение с математическим ожиданием равным 30 и дисперсией, равной 5.
- Для партий, существующих уже долгое время и отличающихся низкой степенью вовлеченности в политические процессы государства, к которым были отнесены «Партия прямой демократии», «Коммунисты России», «Родина», «Партия пенсионеров», «Патриоты России», «Партия Роста» были выбраны случайные величины, имеющие нормальное распределение с математическим ожиданием равным 20 и дисперсией, равной 5.

После формирования случайного распределения политик продолжения работы администраторов партийных групп реализуется сценарное моделирование, рассчитывающее параметры частоты размещения новостей, количества активной аудитории, которая будет привлечена в группу, а также конечный показатель роста количества пользователей в сообществах. При этом подразумевается, что эти показатели изменяются от месяца к месяцу, а горизонт планирования в представленном сценарном моделировании составляет 7 месяцев (до октября 2021 года).

Такого рода имитационное моделирование программно реализуется 100 раз, после чего происходит усреднение полученных показателей. По результатам этой работы происходит корректировка значений, учитывающая различное количество сторонников тех или иных партий, которые не участвуют в социально-медийной повестке партий, то есть не имеют аккаунтов в социальных сетях и, соответственно не состоят в сообщества, отнесенных к тем или иным партиям.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В качестве итогов общего имитационного моделирования выводятся ожидаемые результаты партий на сентябрьских выборах. При этом необходимо принять во внимание тот факт, что в системе учитывается явка, которая была организована на выборах 2016 года, а также прозрачность процедуры голосования и подсчета его итогов.

Исходя из описанного выше сценарного моделирования, результаты, которые могут быть получены на разработанном стенде, могут различаться в десятых долях процента. При одном из проведенных экспериментов был получен следующий результат моделирования.

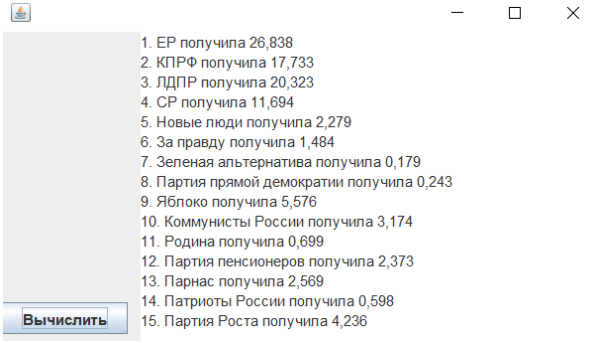


Рис.1. Результаты моделирования для 15 партий

В табличном виде результаты будут иметь следующее представление.

Таблица 1. Результаты моделирования для 15 партий

Партия	Ожидаемый результат партии (среднее)
ЕР	26,84%
КПРФ	17,73%
ЛДПР	20,32%
СР	11,69%
Новые люди	2,28%
За правду	1,48%
Зеленая альтернатива	0,18%
Партия прямой демократии	0,24%
Яблоко	5,58%
Коммунисты России	3,17%
Родина	0,7%
Партия пенсионеров	2,37%
Парнас	2,57%
Патриоты России	0,6%
Партия Роста	4,24%

При проведении опытов, при которых рассматривается «объединенная» партия «Справедливая Россия», то есть партия «Справедливая Россия», полученная после слияния партии «Справедливая Россия» с партиями «За Правду» и «Патриотами России», при сценарном моделировании будут получены следующие результаты.

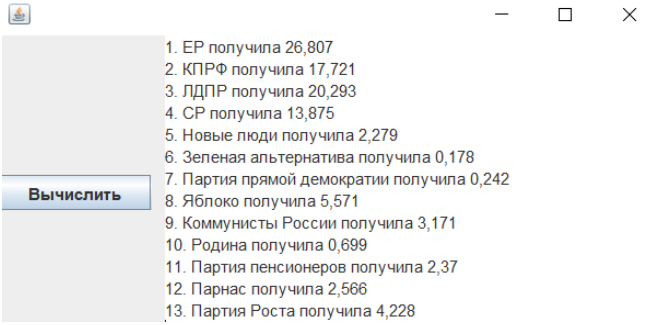


Рис.2. Результаты моделирования для «объединенной» партии

В табличном виде результаты будут иметь следующее представление.

Таблица 2. Результаты моделирования при «объединении» партий

Партия	Ожидаемый результат партии (среднее)
ЕР	26,81%
КПРФ	17,72%
ЛДПР	20,29%
СР	13,88%
Новые люди	2,28%
Зеленая альтернатива	0,18%
Партия прямой демократии	0,24%
Яблоко	5,57%
Коммунисты России	3,17%
Родина	0,7%
Партия пенсионеров	2,37%
Парнас	2,57%
Партия Роста	4,23%

Таким образом, мы видим, что при сценарном моделировании «объединенная» партия «Справедливая Россия» получит несколько больший отклик избирателей, чем три партии могли получить по отдельности.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенный пример использования математических методов сценарного моделирования демонстрирует широкие возможности данной методологии. Кроме того, представленный тип имитационного моделирования позволяет применять существенно более сложную модель расчетов результатов электоральной активности, чем была представлена в данном исследовании. Таким образом, развитием представленного исследования будет усложнение расчетных моделей и учет большего количества параметров в ней.

Литература

1. Azarov A.A., Vasileva O.V., Tulupyeva T.V. Randomized General Indices for Evaluating Damage through Malefactor Social Engineering Attacks // RCAI-2019 17th Russian Conference on Artificial Intelligence. Ulyanovsk. 2019. P. 218-225.
2. Абрамов В.И. Совершенствование политики государственных закупок в развитии наукоградов: агент-ориентированное моделирование и сценарный анализ // Актуальные проблемы экономики и права. Т. 12 (1). С. 5-18. 2018.
3. Борщенко В.В. Сценарное моделирование информационно-политических угроз в интернет-пространстве // Евразийская интеграция: экономика, право, политика. №1 (31). 2020. С. 72-77.

4. Бродовская Е.В., Домбровская А.Ю., Пырма Р.В., Азаров А.А. Готовность современной российской молодежи к реализации гражданской и политической активности в цифровой среде // Власть. 2019. № 01(27). С. 91-95.
5. Бродовская Е.В., Домбровская А.Ю., Пырма Р.В., Азаров А.А., Синяков А.В. Влияние цифровых коммуникаций на формирование профессиональной культуры российской молодежи: результаты комплексного прикладного исследования // Мониторинг общественного мнения: экономические и социальные перемены. - 2019. № 1. С. 229-251.
6. Иванова Т.А. Сценарное моделирование политики нейтралитета в Европе // ГосРег: государственное регулирование общественных отношений. №3(29). 2019. С. 16-19.
7. Казакова И.И. Математическое и информационное обеспечение системы сценарного моделирования действий инсайдера // COLLEGIUM LINGUISTICUM – 2017. Материалы ежегодной конференции студенческого научного общества МГЛУ. 2017. С. 448-454.
8. Ксенофонтов Д.М. Сценарное моделирование эпидемиологических эффектов экономической политики // Научные труды: Институт народнохозяйственного прогнозирования РАН. №18. 2020. С. 542-565.
9. Наумов И.В. Сценарное моделирование бюджетного процесса в региональной системе // Развитие территориальных социально-экономических систем: вопросы теории и практики. Сборник научных статей XV Международной научно-практической конференции молодых учёных. 2017. С. 184-187.
10. Наумов И.В. Методологические принципы сценарного моделирования матрицы движения финансовых потоков между институциональными секторами в регионе // Развитие территориальных социально-экономических систем: вопросы теории и практики. Сборник научных статей XIV Международной научно-практической конференции молодых учёных. 2016. С. 257-260.
11. Писарева О.М. Вопросы адаптации математического инструментария сценарного моделирования в цифровой среде многоуровневого стратегического управления // Управленческие науки. Т.9. №3. 2019. С. 17-27.
12. Подгорская С.В., Подвесовский А.Г., Исаев Р.А., Тарасов А.С., Бахматова Г.А. Моделирование сценарного развития сельских территорий на основе нечеткой когнитивной модели // Проблемы управления. №5. 2019. С. 49-59.
13. Русина А.Н., Карпычева О.В. Моделирование сценарных условий прогнозирования кадровой потребности экономики региона // Т. 4. №4. 2017. С. 309–322.
14. Тарасова О.В. Двухуровневое сценарное моделирование при оценке проектов регионального развития // Моделирование и прогнозирование социо-эколого-экономического развития региона. Материалы Всероссийской молодежной школы-конференции с международным участием. 2016. С. 159-167.

УДК 004.8

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ НАХОЖДЕНИЯ ТЕКСТОВ ЭКСТРЕМИСТСКОЙ НАПРАВЛЕННОСТИ*

***Мошкин В.С.**, к.т.н.*
e-mail: v.moshkin@ulstu.ru
Фадеев Д.О.
e-mail: zloizvyk@gmail.com
***Ярушкина Н.Г.**, д.т.н.*
e-mail: jng@ulstu.ru
УлГТУ

1. ВВЕДЕНИЕ

В последнее время участились случаи привлечения пользователей социальных сетей к уголовной и административной ответственности за публикуемую (post) и распространяемую (repost) информацию, носящую характер экстремизма или терроризма.

Актуальность работы обусловлена ужесточением российского законодательства в области распространения информации в сети Internet и социальных сетях. При этом пользователь социальной сети зачастую не имеет верного представления о том, что его текстовое сообщение может являться нелегальным с точки зрения законодательства о борьбе с экстремизмом, терроризмом и прочими правонарушениями.

В связи с этим актуальной является задача разработки интеллектуальных алгоритмов автоматической проверки текстовых сообщений пользователя в социальной сети на наличие материалов, запрещенных к опубликованию (в частности, экстремистской направленности).

2. АЛГОРИТМ НАХОЖДЕНИЯ ТЕКСТОВ ЭКСТРЕМИСТСКОЙ НАПРАВЛЕННОСТИ

В рамках данного исследования был разработан алгоритм решения поставленной задачи. Данный алгоритм включает следующие этапы:

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проекты № 19-47-730003 и 18-47-732007

1. Предобработка текстовых сообщений, извлекаемых из социальных сетей.

Предобработка включает проведение графематического и морфологического анализа, а также лемматизацию слов с использованием грамматического словаря системы Lucene [1].

2. Поверхностная классификация на основе тезауруса опасных фраз и высказываний.

Для решения этой задачи был разработан алгоритм, работающий на сравнении слов. Так как на вход алгоритма лемматизации поступает слово, а выходом служит набор слов, то появилась проблема сравнивания фразы из текста с ключевой фразой так, чтобы список всех лемм слова последовательно сравнивался со списком всех лемм ключевого слова и переходил к сравниванию следующих лемм слова в тексте и фразе.

При полном переборе происходит быстрое разрастание сравнивания вариантов лемм. Например, предложение «В ближайшем будущем все будет более технологичным» показано на рис.1.

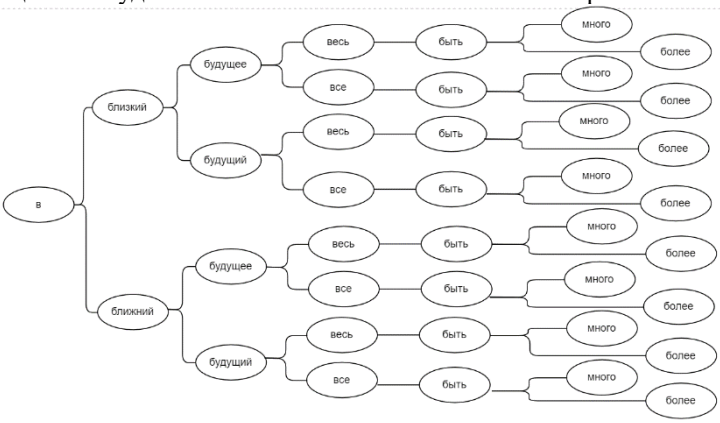


Рис.1. Пример синтаксического дерева предложения

В результате получается не одно предложение для проверки, а шестнадцать. А чтобы проверить наличие лемматизированной фразы нужно хранить подобное дерево в базе ключевых фраз и проверять каждое ответвление дерева фразы с каждым ответвлением дерева текста.

Разработанный алгоритм разбивает предложение на узлы. В каждом узле хранится список лемм для сравнения. Ключевые фразы тоже разбиваются на узлы. Затем первый узел текста сравнивается с первым узлом ключевой фразы.

Сравнение происходит вычитанием списка лемм узла ключевой фразы от списка лемм узла текста. Если размер списка остался прежним – совпадения нет и алгоритм переходит ко второму узлу текста и сравнивает его с первым узлом ключевой фразы. При совпадении алгоритм одновременно переходит к следующим узлам текста и ключевой фразы.

Достижение конца ключевой фразы означает полное совпадение, а значит ее наличие в тексте. Таким образом, не происходит ветвление как лемматизированного текста, так и ключевой фразы. Остается принцип работы посимвольного сравнение текста, который обхватывает все возможные варианты форм слов. Схема узлового представления лемматизированного текста показана на рис.2.

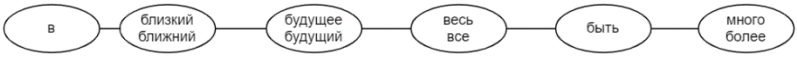


Рис.2. Схема узлового представления предложения

При совпадении ключевой фразы с отрывком весь текст считается опасным и помечается соответствующим флагом. Такой подход позволяет отделить наиболее безопасные посты от подозрительных. Подозрительным постом в данном исследовании считается пост с наличием опасной фразы или ее форм.

Результатом данного этапа является набор предложений и коротких текстов, которые предварительно помечены опасными.

3. Классификация текстов методом наивного байесовского классификатора.

Была выбрана модель «мешок слов». Согласно данной модели, любое текстовое сообщение представляется в виде множества слов и словосочетаний [2]. По наличию в тексте определенных слов, неявно соответствующих классу, происходит классификация.

Вероятность отнесения текста d_i к классу k определяется следующей моделью:

$$P(k|d_i) = \frac{P(d_i|k)*P(k)}{P(d_i)},$$

где $P(d_i|k)$ представляет собой вероятность нахождения документ d_i во множестве документов k; $P(k)$ предполагает безусловную вероятность класса k в обучающей выборке; $P(d_i)$ – безусловная вероятность текста d_i в корпусе текстов обучающей выборки [3].

Наиболее вероятный класс для текста определяется, используя оценку апостериорного максимума:

$$k_{map} = \arg\max_{k \in K} \frac{P(d_i|k) * P(k)}{P(d_i)}.$$

Поскольку $P(d_i) = const$ в рамках корпуса текстов и учитывая, что

$$P(d_i|k) \approx P(w_1|k) * P(w_2|k) * \ldots * P(w_n \mid k) = \prod_{s=1}^{n} P(w_s \mid k),$$

получаем:

$$k_{map} = \arg\max_{k \in K} \left[P(k) * \prod_{s=1}^{n} P(w_s \mid k) \right].$$

В последнем выражении $P(w_s|k)$ предполагает вероятность нахождения слова/словосочетания w_s в текстах k [4]. Отсюда:

$$k_{map} = \arg\max_{k \in K} \left[\log P(k) + \sum_{s=1}^{n} \log P(w_s \mid k) \right].$$

3. РЕАЛИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ НАХОЖДЕНИЯ ТЕКСТОВ ЭКСТРЕМИСТСКОЙ НАПРАВЛЕННОСТИ

Для реализации предложенного алгоритма был разработан модуль классификации текста на языке программирования python, представляющий из себя отдельный REST сервис.

Общая архитектура системы представлена на рис.3:

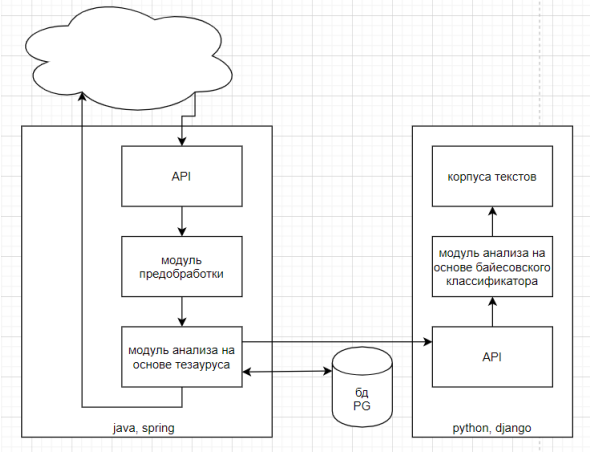


Рис.3. Архитектура системы классификации текста

Для обучения наивного байесовского классификатора были использованы размеченные тексты, полученные в предыдущих исследованиях. Из них было сформировано два корпуса текстов,

190 документов опасных постов и 820 документов подозрительных постов. Разделение на обучающую и тестовую выборку составило 9 к 1 соответственно.

В результате экспериментов были получены следующие результаты:

- Точность классификатора на тестовой выборке составила чуть более 84%.
- В ходе нагрузочного тестирования время ожидания при 100 запросах изменилось с 17 секунд до 28. Увеличение времени обработки одного запроса увеличилось на 0,11 секунд, что является приемлемым.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная в рамках исследования система является набором микросервисов. Она позволяет осуществлять трехэтапную классификацию текстов. Была повышена точность классификации без значительного увеличения времени обработки, что позволит реализовать дополнительные этапы проверки для уточнения результатов определения класса текстового ресурса.

Литература

1. Э.Д. Павлыгин, А.Г. Подлобошников, Р.А. Савинов, Н.Г. Ярушкина, А.М. Наместников, А.А. Филиппов, А.А. Романов, В.С. Мошкин, Г.Ю. Гуськов, М.С. Григоричева Разработка программного комплекса для интеллектуального анализа социальных медиа. – Автоматизация процессов управления-2019. – № 2 (56). – С. 23–36. doi: 10.35752/1991-2927-2019-2-56-23-36
2. Онтологический и нечеткий анализ слабоструктурированных информационных ресурсов / Т.В. Афанасьева, В.С. Мошкин, А.М. Наместников, И.А. Тимина, Н.Г. Ярушкина ; под науч. ред. Н.Г. Ярушкиной. – Ульяновск: УлГТУ, 2016. – 130 с.
3. П.Д. Ермаков, Р.В. Федянин. Исследование методов машинного обучения в задаче автоматического определения тональности текстов на естественном языке. – Москва: МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2015, С.600-614.
4. Р.Г. Галимов. Основы алгоритмов машинного обучения – обучение с учителем. – Уральский государственный экономический университет, 2017, С. 807-809.

СЕКЦИЯ 3 | НЕКЛАССИЧЕСКИЕ, ГИБРИДНЫЕ И СИНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

УДК 004.8

К ВОПРОСУ ИНТЕГРАЦИИ МОДЕЛЕЙ РЕШЕНИЯ И ОБЪЯСНЯЮЩЕЙ: ВЛИЯНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕМЕНТОВ НЕЙРОСЕТИ НА ВЫБОР РЕШЕНИЯ

***Павлов А.В.**, д.ф.-м.н.*
e-mail: pavlov@phoi.ifmo.ru; avpavlov@itmo.ru
Университет ИТМО

1. ВВЕДЕНИЕ

Внедрение систем искусственного интеллекта (ИИ) в практику актуализировало вопрос их интеллектуальной непрозрачности и, как следствие, объяснения принимаемых ими решений. В первую очередь это касается нейросетей (НС), как систем типа «черный ящик», и тех областей их применения, в которых цена ошибки недопустимо велика. Ответом на этот вызов стала концепция объяснимого ИИ (ОИИ).

Условно можно выделить два подхода к объяснению.

Первый, и на сегодня основной, направлен на извлечение из НС, формализацию и вербализацию аргументов [1-5]. Объяснение здесь – ответы на ряд вопросов, первый из которых: «Почему принято именно это решение?» [2], основной метод – построение объясняющей модели (ОМ), как метамодели для модели самого решения [1]. Этот подход лежит в русле доминирующей на сегодня тенденции развития НС в сторону всё большей формализации и «вскрытия черного ящика».

Второй подход фокусируется на вопросе – почему в одинаковых условиях, при одних и тех же логике и аргументах, заключения разных

лиц, принимающих решения (ЛПР), отличаются? Ответ на этот вопрос требует учета в ОМ индивидуальных особенностей ЛПР. Этот подход весьма условно можно определить, как возвращение на исходные для НС парадигмы позиции биологической мотивированности.

Необходимо также различать ситуации отсутствия или наличия личной заинтересованности ЛПР в решении. Если в первом случае возможно абстрагирование от «человеческого фактора», то во втором индивидуальные особенности суть важны и должны быть включены в модель для описания «нерациональности» решений [6] и учета таких, различающихся от ЛПР к ЛПР, атрибутов человека, как свобода [7] и нравственность [8]. Тем самым учет индивидуальных особенностей НС ЛПР перспективен в плане интеграции ОМ и модели решения.

Нерациональность выше в кавычках, ибо под ней понималось несоответствие результатов экспериментов теориям, считавшимися «правильными» – классической вероятности и булевой логике. Пример тому – нарушение классической формулы полной вероятности при дизъюнции несовместных событий [6, 9-13], инициировавшее новый виток обсуждений гипотезы о квантовой природе мозга, психики и сознания [12-17]. Но на сегодня «квантовый мозг» – лишь абдуктивная гипотеза [18]. В [19] показано, что этот феномен имеет классические НС механизмы, не требующие обращения к квантовой физике.

В данном докладе, в развитие [19], показано, что учет в модели решения индивидуальных характеристик НС ЛПР – нелинейности чувствительности синаптических контактов, передаточных функций сеноров и трактов – придает модели решения объяснительную силу, т.к. объясняет отличия решений разных ЛПР в одинаковых условиях.

2. ПОДХОД К ПРОБЛЕМЕ

Рассмотрим нарушение классической формулы полной вероятности для дизъюнкции несовместных событий [6, 9-13] на модели некооперативной игры «Дилемма заключенного» (ДЗ). В ДЗ два злоумышленника А и В допрашиваются в полиции по отдельности, у каждого есть выбор: *C* (cooperate) – молчать или *D* (defect) – предать. *C* и *D* составляют полный набор альтернатив. Повлиять на решение подельника игрок не может, а таблица выигрышей такова:

- $C^A C^B$ – оба молчат и оба получают небольшие сроки;
- $C^A D^B$ – В отпускают, а молчащий А получает по максимуму;
- $D^A C^B$ – по аналогии с предыдущим;
- $D^A D^B$ – оба игрока предают и оба получают средние сроки.

Игроку В предлагалось принять решение в трех ситуациях:

- а. – ему сообщают, что игрок А молчит (C^A);

- б. – ему сообщают, что игрок А предал его (D^{A});
- в. – решение другого игрока ему неизвестно.

В рамках нашей задачи ДЗ актуальна, поскольку имеет нравственный аспект. Вероятности решения игрока В «предать» в зависимости от условий по результатам экспериментов дали порядок

$$\Pr\left(D^{\text{B}}\left|D^{\text{A}}\right.\right) > \Pr\left(D^{\text{B}}\left|C^{\text{A}}\right.\right) > \Pr\left(D^{\text{B}}\right). \quad (1)$$

Но согласно классической формуле безусловной вероятности

$$\Pr\left(D^{\text{B}}\right) = \Pr\left(D^{\text{B}}\left|D^{\text{A}}\right.\right)\Pr\left(D^{\text{A}}\right) + \Pr\left(D^{\text{B}}\left|C^{\text{A}}\right.\right)\Pr\left(C^{\text{A}}\right), \quad (2)$$

несовместные события должны дать: $\Pr(D^{\text{B}}) \in [\Pr(D^{\text{B}}|D^{\text{A}}), \Pr(D^{\text{B}}|C^{\text{A}})]$.

Ключевые моменты нашего подхода к проблеме следующие.

1. В работах [6, 9-13] экспериментальные значения условных вероятностей принимались как данность и искались причины выхода полной вероятности $\Pr(D^{\text{B}})$ из задаваемого (2) интервала вероятностей условных. Изменим взгляд на проблему – примем первый и последний члены в (1) как данность и найдем НС механизм, обеспечивающий попадание вероятности $\Pr(D^{\text{B}}|C^{\text{A}})$ в диапазон $[\Pr(D^{\text{B}}|D^{\text{A}}), \Pr(D^{\text{B}})]$.

2. В квантовой физике вероятность события $\sigma(x,y)$ в точке с координатами (x,y) определяется по правилу Борна как скалярное произведение его амплитуды вероятности $\psi_\sigma(x,y)$

$$\Pr\left(\sigma(x,y)\right) = \left\langle \psi_\sigma(x,y), \psi_\sigma(x,y) \right\rangle . \quad (3)$$

Таким образом, вероятность есть квадратичная мера на алгебре событий и по определению (3) математически строго эквивалентна интенсивности (мощности) как квадратичной мере на алгебре, порождаемой процессом, устройством. В алгебре, порождаемой НС, операндами являются нейронные ансамбли (НА), т.е. применительно к НС реализации речь идет о мощности НА, представляющего решение.

3. В [16] как обязательный для учета в модели атрибут принятия решения $D^{\text{B}}|C^{\text{A}}$ человеком отмечен когнитивный диссонанс, а в ДЗ – принятие решения на самых первых итерациях его редуцирования.

В этой связи рамках нашего подхода отметим, что условие C^{A} противоречит оцениваемой альтернативе D^{B}, а для оценок $\Pr(D^{\text{B}}|D^{\text{A}})$ и $\Pr(D^{\text{B}})$ такого противоречия нет. Это означает, что оценкам $\Pr(D^{\text{B}}|D^{\text{A}})$ и $\Pr(D^{\text{B}})$ адекватна монотонная логика «Modus Ponens»: «предать – выгодно» или, что логически эквивалентно, «молчать – невыгодно». Но решение $D^{\text{B}}|C^{\text{A}}$, принимаемое в состоянии диссонанса, описывается уже логикой с исключением: «предать – выгодно, если подельник не молчит». Логику с исключением порождает данная на рис.1 НС с весами связей, формируемыми в пространстве Фурье: двухслойная НС

$L^1 \rightarrow W^1 \rightarrow L^2$ строит монотонную логику, матрица весов W^2 хранит фурье-дуальное правилу монотонной логики правило исключения [20].

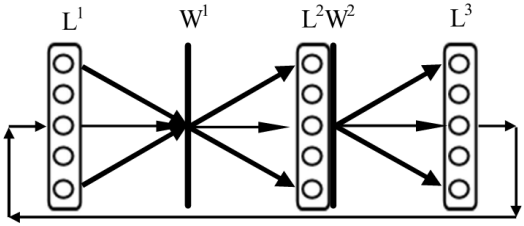


Рис.1. Трехслойная НС резонансной архитектуры: *L* – нейронные слои, *W* – матрицы весов связей

Для реализации логики с исключением НА из слоя исключения L^3 вновь подается во входной слой L^1 для корректировки с учетом исключения ранее построенной по правилу монотонной логики оценки – НС имеет кольцевую архитектуру, необходимую также и для реализации когнитивного диссонанса [21, 22].

4. Логика игры связывает две лингвистические переменные (ЛП): «вариант решения» и «оценка решения» отображением из бинарной шкалы вариантов решения (альтернатив) на шкалу оценок

$$\{C, D\} \rightarrow \{L, H\} \ , \tag{4}$$

где *L* – низкая оценка (невыгодно), *H* – высокая (выгодно).

Для достижения максимального диапазона оценок НС обучается правилом «молчать – невыгодно», т.е. парой НА $C \rightarrow L$, матрица весов:

$$\mathrm{W}^1\left(\nu_x, \nu_y\right) = \Lambda^1\left(\mathfrak{F}\left(\mathrm{C}(x, y)\right)\right)^* , \tag{5}$$

где цифра в верхнем индексе – номер слоя или матрицы, Λ^1 – оператор чувствительности синапсов, F – оператор преобразования Фурье, * – комплексное сопряжение. Тогда отклик НС в L^2 на НА $\mathrm{In}(x,y)$ в слое L^1

$$\mathrm{Out}^{2(\mathrm{In},\mathrm{C})}(\zeta, \eta) = \left[\mathrm{In}(x, y) \otimes \mathrm{C}^{\Lambda^1}(x, y)\right], \tag{6}$$

где $\otimes$ – символ операции корреляции, верхний индекс Λ^1 указывает на фильтрацию эталонного НА матрицей весов W^1. Амплитуда глобального максимума функции автокорреляции (ГМ АКФ) есть скалярное произведение, т.е. квадратичная мера (3).

Мера должна удовлетворять аксиоме монотонного неубывания. Если порядок значений ЛП связан с порядком в пространстве Фурье таким образом:

$$\begin{aligned} D \mathrm{f}\ C &\Leftrightarrow \nu_\alpha^{\mathrm{D}} \le \nu_\alpha^{\mathrm{C}} \\ H \mathrm{f}\ L &\Leftrightarrow \nu_\alpha^{\mathrm{H}} \le \nu_\alpha^{\mathrm{L}} \end{aligned} , \tag{7}$$

где f – символ отношения предпочтения, ν_α – частота спектра амплитуд по уровню α, то эта аксиома имеет силу не для амплитуды ГМ АКФ, а для однозначно связанного с ним обратной зависимостью радиуса корреляции r:

$$D \, \mathrm{f} \; C \Leftrightarrow \nu_\alpha^{\mathrm{D}} \le \nu_\alpha^{\mathrm{C}} \Leftrightarrow r_\beta^{\mathrm{D}} \ge r_\beta^{\mathrm{C}} \; . \qquad (8)$$

Поэтому в качестве меры на алгебре игры используем радиус ГМ АКФ r и далее: $r^{\mathrm{D}} \equiv \Pr(D)$, $r^{\mathrm{D}|\mathrm{C}} \equiv \Pr(D|C)$, $r^{\mathrm{C}|\mathrm{D}} \equiv \Pr(C|D)$.

НА, представляющие смыслы разных значений одной ЛП, должны иметь как нечто общее, так и отличия. Представим название ЛП общим для всех её значений спектром фаз НА, а значения – отличающимися спектрами амплитуд. Примем для всех значений ЛП одну модель спектра и, следуя (8), будем различать их величиной ν_α.

3. МОДЕЛЬ

Для построения логики с исключением двухслойная НС, реализующая правило «молчать – невыгодно», дополняется слоем исключения L^3 и матрицей весов W^2, хранящей правило исключения из основного правила: «если подельник не молчит». Отрицание – частный случай операции, задающей дуальность, поэтому смысл значения «не молчит» представлен НА $\mathrm{F}(\mathrm{C}(x,y))$, т.е. матрица весов исключения W^2

$$\mathrm{W}^2(\zeta,\eta) = \Lambda^2\left(\left(\mathrm{Out}^{2(\mathrm{D,C})}(\zeta,\eta)\right)^* \mathcal{F}\left(\mathrm{C}(x,y)\right)\right), \qquad (9)$$

где F – задающий дуальность определяющих операций оператор преобразования Фурье, цифра в верхнем индексе – номер слоя.

Оценку предъявленного во входном слое L^1 варианта решения на i-ой итерации представляет НА, формируемый НС в слое L^2

$$\mathrm{Out}_i^{2(\mathrm{In,C})}(\zeta,\eta) = \\ = \mathcal{F}\left(\mathrm{Out}_{i-1}^{2(\mathrm{In,C})}(\zeta,\eta)\right) \otimes \mathcal{F}\left(\mathrm{Out}^{\Lambda^2 2(\mathrm{D,C})}(\zeta,\eta)\right) \otimes \mathrm{C}^{\Lambda^1}(x,y) * \mathrm{C}^{\Lambda^2}(x,y) \; . \qquad (10)$$

Из (10) видно, что на каждой итерации имеет место инверсия порядка оценок относительно порядка, имевшегося на предыдущей.

На первой итерация дается оценка информации о решении подельника. Если «подельник молчит», то НС строит в слое L^2 отклик

$$\mathrm{Out}_1^{2(\mathrm{C,C})}(\zeta,\eta) = \\ = \mathrm{C}^{\Lambda^2}(x,y) * \mathcal{F}\left(\mathrm{Out}^{2(\mathrm{C,C})}(\zeta,\eta)\right) \otimes \mathcal{F}\left(\mathrm{Out}^{\Lambda^2 2(\mathrm{D,C})}(\zeta,\eta)\right) \otimes \mathrm{C}^{\Lambda^1}(x,y) \; , \qquad (11)$$

а если «подельник предал», то

$$\mathrm{Out}_1^{2(\mathrm{D,C})}(\zeta,\eta)=$$
$$=\mathrm{C}^{\Lambda^2}(x,y)*\mathfrak{F}\left(\mathrm{Out}^{2(\mathrm{D,C})}(\zeta,\eta)\right)\otimes\mathfrak{F}\left(\mathrm{Out}^{\Lambda^2 2(\mathrm{D,C})}(\zeta,\eta)\right)\otimes\mathrm{C}^{\Lambda^1}(x,y). \quad (12)$$

Имеем порядок оценок $r_1^{\mathrm{C}|\mathrm{C}} > r_1^{\mathrm{D}|\mathrm{C}}$, инверсный относительно того, что дает на нулевой итерации монотонная логика $r^{\mathrm{C}} < r^{\mathrm{D}}$.

На второй итерации игрок оценивает уже собственный выбор:

$$\mathrm{Out}_2^{2(\mathrm{C,C})}(\zeta,\eta)=$$
$$=\mathrm{C}^{\Lambda^2}(x,y)*\mathfrak{F}\left(\mathrm{Out}_1^{2(\mathrm{D,C})}(\zeta,\eta)\right)\otimes\mathfrak{F}\left(\mathrm{Out}^{\Lambda^2 2(\mathrm{D,C})}(\zeta,\eta)\right)\otimes\mathrm{C}^{\Lambda^1}(x,y) \quad (13)$$

для варианта «молчать», и для альтернативы «предать подельника»:

$$\mathrm{Out}_2^{2(\mathrm{D,C})}(\zeta,\eta)=$$
$$=\mathrm{C}^{\Lambda^2}(x,y)*\mathfrak{F}\left(\mathrm{Out}_1^{2(\mathrm{D,C})}(\zeta,\eta)\right)\otimes\mathfrak{F}\left(\mathrm{Out}^{\Lambda^2 2(\mathrm{D,C})}(\zeta,\eta)\right)\otimes\mathrm{C}^{\Lambda^1}(x,y). \quad (14)$$

Нас интересуют условия получения экспериментально наблюдавшегося [6, 9-13] нарушения классической формулы полной вероятности, то есть порядка $r_2^{\mathrm{D}|\mathrm{C}}>r^{\mathrm{D}}$ вместо классического $r_2^{\mathrm{D}|\mathrm{C}}<r^{\mathrm{D}}$. Эти условия нас интересуют в плане учета в модели индивидуальных особенностей НС – нелинейности чувствительности синаптических контактов, ведущей к фильтрации эталонных НА при записи правила вывода в память, и фильтрации входных образов (оцениваемых альтернатив) на сенсорах и сенсорных трактах, т.е. в слое L^1.

Введем меру различия игроком альтернатив. Согласно (7) примем такой мерой отношение радиусов спектров амплитуд НА, представляющих оцениваемые альтернативы *D* и *C*:

$$V=\frac{\nu_\alpha^{\mathrm{C}}}{\nu_\alpha^{\mathrm{D}}} \quad (15)$$

Из (14) видно, что при V=1 всегда имеет место наблюдавшийся в экспериментах [6, 9-13] порядок $r_2^{\mathrm{D}|\mathrm{C}}>r^{\mathrm{D}}$. Согласно (8) оценка r^{D}, даваемая правилом монотонной логики, монотонно растет с ростом V, а оценка $r_2^{\mathrm{D}|\mathrm{C}}$ согласно (14) антитонна по V, по крайней мере, при небольших значениях последней. Таким образом, если существует V^{Cross} – правая граница диапазона, в котором имеет место $r_2^{\mathrm{D}|\mathrm{C}}>r^{\mathrm{D}}$, то она определяется из условия $r_2^{\mathrm{D}|\mathrm{C}}\left(V^{Cross}\right)=r_0^{\mathrm{D}}\left(V^{Cross}\right)$, что эквивалентно

$$\mathrm{Out}^{2(\mathrm{D,C})}(\zeta,\mu)=\mathrm{Out}_2^{2(\mathrm{D,C})}(\zeta,\eta). \quad (16)$$

Для упрощения выражений и без потери общности примем, что НА описываются функциями с разделяющимися переменными, а также «удобную», но адекватную реальности модель спектров амплитуд и

фильтров на матрице весов W^1 – функцию Гаусса. Тогда из условия (16) (громоздкие выкладки опустим) получаем

$$V^{Cross} = \sqrt{\left(1+\frac{1}{2}\left(V_F\right)^2\right) M \sqrt{\frac{2}{\left(2\pi\right)^2\left(r^{ACFGMP}\right)^4}+1}-\frac{1}{2}\left(V_F\right)^2} \quad , \qquad (17)$$

где $V_F = \frac{\nu_{0.606}}{\nu_F}$ – параметр низкочастотного фильтра (НЧФ) в слое L^1 или матрице W^1, $\nu_{0.606}$ и ν_F – параметры спектра амплитуд эталонного НА «молчать» (без фильтрации) и фильтра, соответственно, r^{ACFGMP} – радиус ГМ АКФ эталонного НА «молчать» с учетом дополнительной НЧФ вследствие нелинейной чувствительности синаптических контактов, $M = \frac{\zeta}{\nu}$ – коэффициент, связывающий пространственную ζ и частотную ν координаты.

При отсутствии дополнительной фильтрации ($\nu_F \to \infty$, V=0) и достачно больших M получаем приемлемую для практических целей удобную аппроксимирующую формулу

$$V^{Cross} \approx \frac{1}{r^{ACFGMP}} \sqrt{\frac{M}{\sqrt{2}\pi}} \quad . \qquad (18)$$

4. МОДЕЛИРОВАНИЕ

Моделировалась ДЗ на НС, показанной на рис.1. НА, представляющие смыслы альтернативных вариантов решений D(x,y) и C(x,y), моделировались реализациями стационарного случайного процесса с гауссовым спектром амплитуд и случайным, нормально распределенным с дисперсией 2π, спектром фаз. Исследовалась зависимость r – радиуса отклика, формируемого в слое L^2, от меры различения игроком альтернатив V, параметра НЧФ V_F, описывающего фильтрацию, обусловленную нелинейностью чувствительности синаптических контактов при обучении НС основному правилу, и/или фильтрацию в слое L^1. Характристика эталонов представлена r^{ACFGMP}.

Для примера на рис.2 приведены зависимости безусловной и условных оценок рассматриваемых альтернатив от меры их различения V для r^{ACFGMP}=3,1 пкс. без дополнительной фильтрации на нулевой (монотонная логика), первой и второй итерациях редуцирования когнитивного диссонанса на логике с исключением.

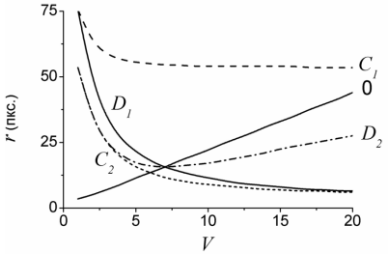


Рис.2. Зависимости оценок вариантов решений от меры их различения *V*: 0 – безусловной оценки «предать» r^{D}; C_i, D_i – условных $r_i^{C|C}$ и $r_i^{D|C}$, соответственно, на *i*-ой итерации без дополнительной фильтрации

На рис.2 в диапазоне $V \in [1, V^{Cross}]$ наблюдается порядок $r_2^{D|C} > r^{D}$, противоречащий классической формуле полной вероятности (2). Такой же порядок оценок наблюдается и при других значениях *r*, но со смещением точки V^{Cross} пересечений кривых 0 и D_i.

Для количественного и наглядного сравнения с ранее опубликованными [6, 9-13] результатами натурных экспериментов на рис.3 даны зависимости отношения безусловной и условной оценок

$$\Omega(V) = \frac{r^{D}}{r_2^{D|C}} \tag{19}$$

от меры различения ЛПР альтернатив *V* для ряда значений параметра порядка системы рис.1 r^{ACF} – радиуса ГМ АКФ обобщенного правила, представленного составной матрицей весов $W = W^1 \cdot W^2$, где символ $\cdot$ обозначает алгебраическое произведение [22]. Матрица весов правила исключения (9) записывалась при *V*, задаваемом входным НА.

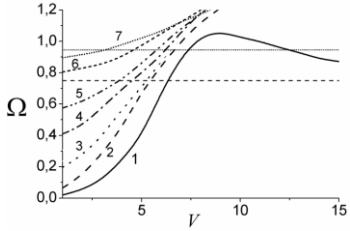


Рис.3. Зависимости отношения Ω от меры *V* различения ЛПР альтернатив для радиусов ГМ АКФ обобщенного правила, хранимого матрицами W^1 и W^2: 1 – r^{ACF}=4.5 пкс., 2 – r^{ACF}=8.5 пкс., 3 – r^{ACF} =9 пкс., 4 – r^{ACF} =13 пкс., 5 – r^{ACF} =16 пкс., 6 – r^{ACF} =23 пкс., 7 – r^{ACF} =30 пкс.; горизонтальными линиями ограничен диапазон значений Ω, полученных при социологических опросах [6, 9-13]

На рис.4 представлены теоретические (18) и экспериментальные зависимости правой границы V^{Cross} диапазона меры различения игроком альтернатив, в котором наблюдается нарушение классической формулы полной вероятности, от радиуса АКФ эталонных НА r^{ACFGMP} (с учетом фильтрации) и параметра низкочастотного фильтра V_F.

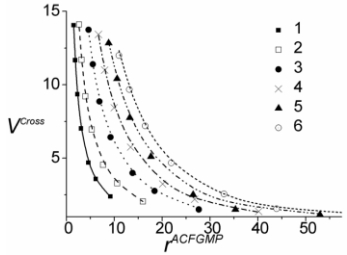


Рис.4. Зависимости V^{Cross} от радиуса АКФ правила монотонной логики r^{ACFGMP} для значений параметра дополнительной фильтрации в слое L^1: 1 – V_F=0 (без фильтрации); 2 – V_F=2; 3 – V_F=4; 4 – V_F=6; 5 – V_F=8; 6 – V_F=10; точки – результаты моделирования, линии – теоретические зависимости согласно (17)

5. ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные результаты позволяют связать индивидуальные характеристики НС ЛПР с тем, какую из альтернатив выбирает ЛПР и, тем самым, выдвинуть гипотезу как попытку ответа на вопрос, сформулированный во введении: «Почему в одинаковых условиях, при одних и тех же аргументах, решения разных ЛПР отличаются?».

В ДЗ игрок выбирает альтернативу в ситуации «в», исходя из логики: «предать – выгодно». В рамках этой логики чем лучше он различает альтернативы «молчать» и «предать», т.е. чем выше оценка V, отражающая его индивидуальные способности к различению альтернатив, тем выше вероятность того, что он примет решение предать – эту очевидную зависимость иллюстрирует кривая 0 на рис.2.

В ситуации «а», то есть при наличии информации о молчании подельника, вероятность решения «предать» может быть выше, чем при отсутствии такой информации. Почему? Чем это определяется? Ситуация одна, логика одна, аргументы одни, а решения разных ЛПР – разные. Ответ следует из представленных результатов.

Точка равновесия V^{Cross}, к которой в итоге сходится процесс редуцирования диссонанса [20-22], и которая является правой границей диапазона [1, V^{Cross}] нарушения классической формулы полной вероятности, определяется индивидуальными особенностями НС ЛПР: мерой различения альтернатив V, нелинейностью чувствительности

синаптических контактов, обуславливающей фильтрацию эталонного образа при обучении сети, и/или низкочастотной фильтрацией в сенсорном слое L^1. Две последние особенности сугубо аппаратные – это передаточные характеристики НС ЛПР, которые могут могут быть измерены извне «черного ящика» и, согласно (17), включены в модель принятия решения.

Рис.3 и рис.4 наглядно иллюстрируют, что диапазон нарушения классической формулы полной вероятности [1, V^{Cross}] тем шире, чем меньше радиус ГМ АКФ правила монотонной логики r^{ACFGMP}. Правило монотонной логики есть актуальный в данной ситуации фрагмент внутренней картины мира (ВКМ), радиус корреляции оценивает среднюю длину внутренних связей во ВКМ – чем эти связи короче, тем сильнее ЛПР фокусируется на частностях, тем слабее представлены в его ВКМ общие связи и закономерности. Образно говоря, с уменьшением радиуса корреляции ЛПР перестает за деревьями видеть лес. Этот момент определяется личной историей жизни ЛПР, тем, на каких образах он учился, какие образы сформировали его ВКМ.

Индивидуальные особенности НС как материального носителя логики принятия решения учитывает дополнительная низкочастотная фильтрация, ведущая к увеличению радиуса АКФ ВКМ сравнительно с вариантом линейной записи матрицы весов связей. Рис.4. наглядно показывает, что с усилением НЧФ, т.е. с увеличением радиуса АКФ, точка равновесия V^{Cross} смещается влево, диапазон нарушения [1, V^{Cross}] сужается. Эта зависимость имеет тот же механизм – низкочастотная фильтрация ослабляет короткие связи в нейронном ансамбле, репрезентирующем воспринимаемую информацию, увеличивая удельный вес дальних связей и, тем самым, увеличивая степень общности представлений ЛПР о мире.

Рис.3 показывает, что существует определенный диапазон значений оценки V, общий для разных социумов [6, 9-13]. Возможно, что этот факт отражает наличие некоторой общности норм морали.

Решение в игре ДЗ имеет ярко выраженный нравственный аспект. В то же время такиой атрибут, как нравственность, в точных ануках практически не затрагивается. Возможно, что представленные результаты дают подход к моделированию и учету этого атрибута человека, оказывающемуся критически важным в некоторых ситуациях принятия решения, в системах искусственного интеллекта.

Таким образом, представленные результаты позволяют получить ответ на вопрос: «почему при одинаковых аргументах и в одинаковых условиях это лицо приняло такое решение, а другое – другое?» благодаря тому, что:

а) связывают оценку принимаемого решения с особенностями внутренней картины мира ЛПР;

б) позволяют придать самой модели принятия решения объяснительную силу без необходимости построения отдельной объясняющей модели, вводя в неё аппаратные, т.е. измеримые передаточные характеристики нейросети ЛПР, как материального носителя его логики принятия решения, при сохранении принципа «черного ящика», т.е. без необходимости его взлома.

Литература

1. Уткин Л.В., Мелдо А.А., Ковалев М.С., Касимов Э.М. Обзор методов объяснения и интерпретации принятия решений в интеллектуальных системах диагностики онкологических заболеваний // Искусственный интеллект и принятие решений. – 2020. – № 4. – С.55-65. DOI: 10.14357/20718594200406
2. Аверкин А.Н. Объяснительный искусственный интеллект – преодоление разрыва между коннекционистким и символьным подходами в ИИ // II Школа молодых ученых «Высокопроизводительные платформы для цифровой экономики и научных проектов класса мегасайенс». 17-18.11.2020. РЭУ им. Г.В. Плеханова. [Электронный ресурс]. – URL: https://www.rea.ru/ru/org/managements/unitscires/Laboratorija-Oblachnykh-tekhnologijj-i-analitiki-Bolshikh-dannykh/Documents/АверкинАН.pdf
3. Langer M., Oster D., Speith T., et.al. What do we want from Explainable Artificial Intelligence (XAI)? – A stakeholder perspective on XAI and a conceptual model guiding interdisciplinary XAI research // Artificial Intelligence. – 2021. – V.296. – Art.103473. DOI: 10.1016/j.artint.2021.103473
4. Samek W., Montavon G., Lapuschkin S., et.al. Explaining Deep Neural Networks and Beyond: A Review of Methods and Applications // Proc.of IEEE. – 2021. – V.109. – №3. – P.247-278. DOI: 10.1109/JPROC.2021.3060483
5. Kovalev M.S., Utkin L.V. A robust algorithm for explaining unreliable machine learning survival models using the Kolmogorov–Smirnov bounds // Neural Networks. – 2020. – V.132. – P. 1-18 DOI: 0.1016/j.neunet.2020.08.007
6. Tversky A, Shafir E. The disjunction effect in choice under uncertainty // Psychological Science. – 1992. – Vol. 3, №5. – P. 305-309; DOI: 10.1111/j.1467-9280.1992.tb00678.x
7. Иваницкий А.М. Детерминизм и свобода выбора в работе мозга // Журнал высшей нервной деятельности. – 2015. –Т.65. – №4. – с. 503-512.
8. Cervantes S., Lopez S., Cervantes L-A. Toward ethical cognitive architectures for the development of artificial moral agents // Cognitive Systems Research. – 2020. – V.64. – p.117-125. DOI: 10.1016/j.cogsys.2020.08.010
9. Broekaert, J B., Busemeyer J. R., Pothos E. M. The Disjunction Effect in two-stage simulated gambles. An experimental study and comparison of a heuristic logistic, Markov and quantum-like model // Cognitive Psychology. – 2020. – Vol. 117. – Article 101262; DOI: 10.1016/j.cogpsych.2019.101262

10. Crosson R. The disjunction effect and reason-based choice in games // Organizational Behavior and Human Decision Processes. 1999. – Vol. 80. – P. 118-133. DOI:10.1006/obhd.1999.2846
11. Li S., Taplin J. Examining whether there is a disjunction effect in Prisoner's Dilemma games // China Journal of Psychology. – 2002. – Vol.44. – P. 25-46. http://hdl.handle.net/2440/3240
12. Busemeyer J. Matthew R. M. Wang Z. A. Quantum game theory explanation of disjunction effects // Proc. of the 28th Ann. Conf. of the Cognition Science Society, eds.: R. Sun, N. Miyake Mahwah, NJ: Erlbaum. – 2006. – P. 131-135.
13. Hristova E., Grinberg M. Disjunction effect in prisoner's dilemma: evidences from an eye-tracking study // Proceedings of the 30th Annual Conference of the Cognition Science Society. Washington, DC. – 2008. – P. 1225-1230.
14. Adams B., Petruccione F. Quantum effects in the brain: A review. // AVS Quantum Science 2020; 2: 022901-1–15. DOI: 10.1116/1.5135170
15. Менский М. Б. Концепция сознания в контексте квантовой механики // Успехи физических наук. – 2005. – Т.175, №4. – С. 413-435. DOI: 10.3367/UFNr.0175.200504c.0413
16. Trueblood J. S., Pothos E. M., Busemeyer J. R. Quantum probability theory as a common framework for reasoning and similarity // Frontiers in Psychology, 11 April 2014; DOI: 10.3389/fpsyg.2014.00322
17. Pothos E. M., Busemeyer J. R. A quantum probability explanation for violations of 'rational' decision theory // Proc.s of the Royal Society Biological Sciences. – 2009. – Vol. 279. – P.2171-2178. DOI: 10.1098/rspb.2009.0121
18. Жёлтиков, А. М. Критика квантового разума: измерение, сознание, отложенный выбор и утраченная когерентность // Успехи физических наук. – 2018. – Т. 188, № 10. – С. 1119-1128. DOI: 10.3367/UFNr.2017.06.038155
19. Павлов А.В. К вопросу классических механизмов квантово-подобных когнитивных феноменов: дилемма заключенного // Гибридные и синергетические интеллектуальные системы: материалы V Всероссийской Поспеловской конференции с международным участием (Зеленоградск, 18-20 мая 2020г.) – 2020. – С. 334-342.
20. Павлов А.В. Алгебра фурье-дуальных операций: логика с исключением // Искусственный интеллект и принятие решений. – 2012. – №3. – С.26-38.
21. Павлов А.В. Логика с исключением на алгебре фурье-дуальных операций: нейросетевой механизм редуцирования когнитивного диссонанса // Научно-технический вестник инф. технологий, механики и оптики. – 2014. – Т. 89, № 1. – С.17-25. – URL: https://ntv.ifmo.ru/file/article/8316.pdf
22. Павлов А.В. Голографическая память с пополнением противоречивой информацией: влияние ослабления низких частот на устойчивость отклика // Компьютерная оптика. – 2020. – Т. 44, № 5. – С. 728-736. – DOI: 10.18287/2412-6179-CO-668.

УДК 007:681.518.2

О СООТНОШЕНИИ ЛОГИЧЕСКОГО И ИНТУИТИВНОГО В ЕСТЕСТВЕННОМ ЯЗЫКЕ*

***Фоминых И.Б.**, д.т.н.*
e-mail: igborfomin@mail.ru
НИУ «МЭИ»

1. ВВЕДЕНИЕ

Можно утверждать, что функционирование языка протекает как постоянное взаимодействие двух уровней человеческой психики – логического и интуитивного: для формирования представлений язык достаточно часто использует логические операции, такие как конъюнкция (И), дизъюнкция (ИЛИ), отрицание и утверждение. В случае утверждения язык обращается как бы сразу к обоим уровням психики, и тогда конфликт между ними принимает конкретную форму. Часто этот конфликт разрешается именно в пользу интуитивного уровня. Рассмотрение этого конфликта начнем с вопроса: почему в естественном языке утверждения используются чаще отрицания, а конъюнкции – чаще дизъюнкций? Достаточно, например, обратиться к частотному словарю русского языка, чтобы убедиться, что союз И встречается приблизительно в 20 раз чаще, чем ИЛИ.

Известно, что с чисто логической точки зрения указанные операции – утверждение и отрицание, конъюнкции и дизъюнкция – являются совершенно равноправными, «двойственными», что отражается в симметрии законов математической логики относительно этих операций. Почему эта симметрия нарушается в естественном языке? По нашему мнению, причина заключается в информационной асимметрии этих операций, т.е. утверждение и конъюнкция, как правило, информативнее, а значит предпочтительнее как средства формировании представлении, чем отрицание и дизъюнкции. Более того и утверждение, и конъюнкция несут положительную информацию, а отрицание и дизъюнкция, как правило, – отрицательную.

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проекты № 20-57-00015, 19-07-00123, 18-29-03088

2. НЕЭФФЕКТИВНОСТЬ «ЧИСТОГО» ОТРИЦАНИЯ

Отрицательноеть дизъюнкции достаточно очевидна. Пусть, например, некий Свидетель дорожного происшествия сообщил: «тот автомобиль был красным». А потом с сомнением добавил: «или желтым». Ясно, что этим «ИЛИ» он расширил множество описываемых объектов, увеличил неопределенность своего сообщения и уменьшил содержащуюся в нем информацию. Сложнее обстоит дело с отрицанием. В отдельных случаях отрицание признака («не красный») может указывать на более узкое множество объектов, чем утверждение («красный»). И, следовательно, уменьшать неопределенность, нести положительную информацию по сравнению с утверждением. В этом случае интуиция и логика действуют, так сказать, «заодно» и потому желаемый результат благополучно достигается. Однако, как правило, дело обстоит иначе: наличие признака является более редкой ситуацией, чем его отсутствие. Так, если возьмем признак «красный» и посмотрим вокруг себя, то найдем, вероятно, с десяток предметов, обладающих этим признаком, и гораздо больше – обладающих противоположным признаком «не красный». По этой причине множество истинности для отрицания признака, как правило, больше, чем для самого признака, так что «чистое» отрицание признака ведет к расширению множества и уменьшению информации.

Отметим, что многие отрицательные словесные обороты по мере их употребления в соответствующем контексте постепенно наполняются конкретным содержанием и перестают восприниматься как отрицательные, начинают обозначать нечто положительное и определенное. Такие слова, как «неуклюжий», «невзрачный», «нестерпимо» и т.п., создают вполне конкретные представления (в отличие, например, от «не красный», «не круглый»). Синтаксически эта потеря отрицательной окраски часто выражается в том, что частица НЕ сливается в одно целое с отрицаемым словом и перестает восприниматься как отрицательная. Если отнять эту частицу НЕ, совершить некое, отрицание отрицания – чаще всего получится слово либо совсем бессмысленное (типа «уклюжий», «взрачный»), либо выражающее представление размытое, неопределенное, т.е. обычно свойственное отрицанию (типа «стерпимо»). Для того, чтобы отрицание стало информативно положительным и психологически возможным, необходимо, чтобы оно было «направленным», т.е. не «центробежным», а «центростремительным», не отталкивающим, а притягивающим. Только в этом случае оно будет сопровождаться положительными эмоциями и не вызовет противодействия со стороны интуитивного уровня. Логически это означает, что дополнение отрицаемого множества должно иметь достаточно малый объем, т.е. альтернативой отрицаемому представлению

должно быть представление достаточно конкретное. Например, вместо «Тот автомобиль был не красным» следует сказать; «Тот автомобиль был не красным, а фиолетовым». Поскольку фиолетовый цвет для автомобиля более редкий, чем красный, то неопределенность уменьшается, и информация возрастает. По сути дела, здесь уже не чистое отрицание, а отрицание вместе с конъюнкцией: «НЕ красный И фиолетовый» (союз «и» логически эквивалентен связке И).

Однако и «чистое» отрицание можно в определенных условиях использовать для передачи информации и формирования представлений. Просто такое отрицание должно быть ***подготовлено*** контекстом – в том смысле, что дополнение отрицаемого множества должно быть «урезано» другими сообщениями до объема ***меньшего,*** чем у самого отрицаемого множества. В атом случае отрицание будет означать переход к множеству меньшего объема и будет нести положительную информацию. Так, фраза «тот автомобиль был не красный» может принести положительную информацию, если ранее другой свидетель сказал: «Тот автомобиль был красным или фиолетовым». Отрицание красного цвета вынуждает теперь рассматривать не все ***некрасные*** автомобили, а только фиолетовые, что уменьшает неопределенность и несет положительную информацию. Однако и в этом случае отрицание уже нельзя рассматривать как чистое.

Неэффективность чистого отрицания достаточно хорошо известна из повседневной практики. Так, бесполезно разубеждать человека в чем-то, если не можете предложить ему конкретной положительной альтернативы: отрицая его собственное (обычно конкретное!) представление, вы только вводите его в некую абстракцию (в обширную область неопределенности), где его вниманию не за что зацепиться. Известно и обратное: если у человека нет еще собственных определенных представлений (как, например, у ребенка), то ему трудно отвергнуть чужие, навязываемые представления, он становится легко внушаемым. На это указывал ещё Т.Манн в своей новелле «Марио и волшебник» [1]. Он писал о человеке, который не желал поддаться гипнотизеру и все же не смог устоять перед ним, потому что не смог противопоставить ему ничего позитивного: «Насколько я понимаю, этот господин потерпел поражение из-за того, что стоял на позиции чистого отрицания. Видимо, одним только отрицанием душа жить не может, не желать сделать что-то — этим жизнь не заполнишь; чего-то не желать и вообще ничего больше не желать, а значит, все-таки сделать то, чего от тебя требуют».

Приведем еще несколько примеров, показывающих неэффективность чистого отрицания. Педагогика хорошо знает, что бесполезно просто запрещать ребенку нечто – лучше предложить ему другую конкретную деятельность. По этой же причине психотерапевт

избегает отрицания в формулах внушения, вместо этого он старается создать у больного альтернативное положительное представление. Известно также, что при некоторых нарушениях психической деятельности (например, деперсонализации.) для больного становится затруднительным понимание отрицательных словесных формул – именно потому, что за ними обычно не стоит никакого чувственно осязаемого конкретного образа.

Слушая призывы медиков «не курить», можно только поражаться неумелости и бессилию этой пропаганды. И неудивительно: за ней стоит одно голое отрицание, противостоит же ей, сознаем мы это или нет, яркий и конкретный образ «настоящего парня», эффектно раскуривающего сигарету. И бесполезно взывать здесь к логике и рассудку, быть может лучше обратиться к чувственному образу, изобразив супермена, эффектно выбрасывающего пачку сигарет.

То же можно сказатьть о пьянстве и прочих человеческих пороках: часто они привлекательны именно потому, что наделены ярким, конкретным образом, тогда как их противником выступает добродетельное, но абстрактное Нечто.

В книге «Слово живое и мертвое» Н.Галь [2], используя свой опыт редактора и переводчика, приводит ряд рекомендаций, как сделать неуклюжие и бесцветные обороты речи более яркими и выразительными. И часто эти рекомендации состоят в замене отрицательной словесной формы на утвердительную. Вот несколько примеров:

Оригинал:	**Редакция:**
– он должен немедленно ее увидеть	– надо сейчас же ее увидеть
– Вы нам вовсе не нужны!	– обойдемся без Вас!
– дело не терпит промедления	– дело наше спешное
– мы не можем допустить, чтобы Вы пошли на это не будучи осведомлены…	– ведь это такой опрометчивый шаг, мы обязаны Вас предупредить…
– будучи нетрезв…	– подвыпив…

Достаточно представить образы, которые встают за этими фразами, чтобы убедиться, что выражения, стоящие в правом столбце, как правило, создают более определенные, яркие и конкретные представления.

Итак, отрицание лишь в редких случаях способно создать у человека представление об описываемом предмете. Если написать «он был не красный, не круглый, не...» – и образ расплывется в нечто неопределенное. Более того, поскольку в словесной формуле отрицания признака назван и сам признак («не красный» содержит «...красный»),

то в представлении останется именно он. Дело обстоит как в известном анекдоте: если вам прикажут ***не думать*** о белом медведе, то именно образ белого медведя и начнет преследовать вас. Причина по- видимому в том, что отрицательная словесная формула («не красный») изначально двузначна, содержит как позитивное представление («красный»), так и его отрицание и на интуитивном уровне выбирается именно первое представление, как более информативное.

3. ИРОНИЯ

Способность интуиции выбирать представление, обратное тому, на которую формально указывает логика, лежит в основе такого приема, как ***ирония.*** Изобретение иронии приписывают Сократу. Именно он ставил в тупик почтенных афинских граждан непривычными выражениями, вроде следующих:

- О, это чрезвычайно глубоко! (в ответ на явную глупость).
- Да вы сама честность! (отпетому мошеннику).
- Ах, как вы любезны! (в ответ на откровенное хамство).

Эффект состоит в том, что на формальном уровне здесь не к чему придраться, но контекст ситуации таков, что на интуитивном уровне создается представление, обратное формальному. Интуиция слушателя ***сама*** выбирает обидный для него смысл, так что не на кого взвалить вину за это; как говорится, «бьют и плакать не велят».

Ирония в чем-то сходна с «эзоповым языком», когда высказыванию придается нарочитая двумысленность в расчете на то, что читатель и цензор поймут его по-разному из-за различия исходных представлений. Однако там различные смыслы принадлежат ***разным*** субъектам, но ***одному*** – интуитивному – уровню; здесь же. напротив, разные смыслы относятся *к* ***разным*** уровням, но принадлежат ***одному*** субъекту. Кроме того, в эзоповом языке разные смыслы необязательно противоположны, не обязательно отрицают друг друга, в иронии же это отрицание является правилом. Когда Н.Г.Чернышевский пишет «Более всех ***любили*** мы ***... доброго и честного*** Коцебу, пострадавшего за ***правду,*** которую так ***безрассудно*** отвергло ***суетное*** немецкое юношество», то цензуре не к чему придраться. Но в контексте той эпохи осведомленный читатель все выделенные слова поймет с точностью до наоборот. «Иногда, – пишет К.И.Чуковский, – в этой иронии не слышалось даже иронической интонации. Черное демонстративно называлось белым, в твердом расчете на то, что читатель прочтет как надо. Цензура была не вправе наложить на все подобные утверждения вето, так как формально они вполне отвечали требованиям и установкам властей» [3].

Однако чаще ирония специально маркируется (чтобы не поняли буквально): особым «ироническим» тоном, мимикой (подмигиванием и пр.), использованием необычных – нарочито архаичных («пиит», «пристанище») или, наоборот, новомодных слов, подчеркнутой экспрессией («Ах!», «О!», «Да-да!»), преувеличенным восхвалением явно недостойного предмета и т.п.

Отметим также, что ирония – это сугубо рефлексивный, языковой феномен, требующий взаимодействия двух уровней – интуитивного и логического [4]. Поэтому она свойственна, главным образом, литературе и в других видах искусств становится возможной только когда они прибегают к помощи слова. Например, художник дает картине название, противоположное его содержанию. Таковы «Апофеоз войны» Верещагина или «Тройка» Перова.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Интуиция и логика, бесознательное и сознательное постоянно привлекают внимание исследователей. Обычно логику определяют, как мышление с помощью понятий, а интуицию – как мышление посредством образов [5]. В работе предпринята попытка проанализировать, как эти категории проявляются в естественном языке. Следует заметить также, что отмеченная выше двойственность обычного естественного языка (в том числе двузначность отрицательных словесных формул) является одной из причин того, что так называемый «технический» язык (юридический, научный, канцелярский, не говоря уже о формальных языках математики и логики) стихийно старается избегать образности. Для этого языка характерны точные термины, за которыми стоят понятия с четко очерченными границами, использование здесь образов только мешает.

Литература

1. Манн Т. Собр. соч. в 10 томах, т. 5,8. – М.: Художественная литература, t960.
2. Галь Н. Слово живое и мертвое. – М.: Книга, 1975. -192с.
3. Чуковский К.И. Живой как жизнь. – М.: Мол. гвардия, 1962. 176с.
4. Голицын Г.А. Информация – логика – поэзия. // Число и мысль, вып. 7. – М.: Знание, 1984, с. 9-32.
5. Голицын Г.А., Фоминых И.Б. О моделировании интуиции на ЭВМ// В материалах. семинара «Динамические интеллектуальные системы в управлении и моделировании», М.: ЦДРЗ ,1996.

УДК 004.827

СРАВНЕНИЕ МОДЕЛИ ПЯТЕН С ДРУГИМИ МОДЕЛЯМИ КАЧЕСТВЕННЫХ ДАННЫХ И РАЗМЫТЫХ ОБЪЕКТОВ*

Симонов Н.А.
e-mail: nsimonov@ftian.ru
Физико-технологический институт им. К.А. Валиева РАН

1. ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на заметные успехи искусственного интеллекта (ИИ), особенно в области глубокого обучения, задача создания интеллекта, приближенного к человеческому уровню, оказалась намного сложнее, чем ожидалось. Например, Garry Marcus [1, 2] утверждает, что до сих пор успехи ИИ были достигнуты в закрытых системах с фиксированными наборами правил, и эти подходы слишком узки для достижения подлинного интеллекта. Авторы отмечают, что глубокое обучение пока не решило проблему гибкости и надежности ИИ, несмотря на огромные ресурсы, которые были вложены в него. Matthew Stewart [3] также перечисляет ограничения сетей глубокого обучения ИИ: «Они кодируют корреляцию, а не причинно-следственную связь или онтологические отношения; не кодируют объекты или пространственные отношения между объектами; работают только с очень узкими < задачами > и не подходят для высокоуровневых символьных рассуждений...». Francois Chollet [4] пишет, что «хотя мы можем разрабатывать системы < ИИ >, которые отлично справляются с конкретными задачами, они < являются > ненадежными, нуждающимися в большом объеме данных, неспособными разобраться в ситуациях, которые незначительно отклоняются от их обучающих данных или предположения их создателей, и не могут приспособиться к новым задачам без значительного участия исследователей-людей». По словам команды исследователей искусственного интеллекта Facebook [5], «Растущее количество свидетельств показывает, что современные модели учатся использовать статистические шаблоны в

* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, грант № 0066-2019-0003

наборах данных ... вместо того, чтобы узнавать значение гибким и обобщаемым способом, как это делают люди».

Автором предлагается принципиально новый подход для создания алгоритмов ИИ и нейронных сетей нового поколения, основанный на математической модели пятен [6]. Аппарат пятен предполагается адекватным для моделирования знаний и мышления в форме, близкой к человеческому интеллекту, который оперирует образами, по своей природе являющимися качественными и приближенными. Человек также способен делать выводы, используя неполные сведения.

Основная идея, положенная в основу теории пятен, это то, что интеграция большого массива даже малозначимых сведений, может дать четкое представление об интересующем объекте. В пределе синтез качественной информации может привести к выявлению даже количественных данных об объекте исследования. Это представление находится в полном согласии с пониманием процесса человеческого познания и анализа, в частности работы археологов, палеонтологов, историков, следователей-криминалистов и аналитиков.

Пятно – это нечеткая (размытая) геометрическая модель, соответствующая пространственной фигуре неопределенной формы. Важным обстоятельством является то, что пятна, в отличие от регионов [7-13], предназначены для моделирования не только размытых геометрических фигур, но и смысловых образов, свойств или признаков (attributes) объектов [6].

По определению, пятно изначально имеет неизвестную форму, а также неизвестны и свойства окружающего его пространства. Указанные сведения могут быть выявлены только из данных об элементарных отношениях пятна с другими, «известными» пятнами. Тем не менее, рассматриваемый подход позволяет получать даже точную информацию о предмете исследования, используя и обрабатывая неточные или качественные данные о его связях с множеством других, известных объектов. Это становится возможным при учете и обработке данных о взаимных связях между этими известными объектами. Четкие геометрические фигуры в рассматриваемой теории представляют предельный случай пятен бесконечно большой четкости [6].

Предложенная теория оказалась идеологически близкой исследованиям в области качественных пространственных представлений и рассуждений (мереотопологии) [7-13], идея которых была заложена Уайтхедом в 1929 г. [7]. С другой стороны, основные концепции модели пятен также близки к теории грубых

множеств [14-16], анализ формальных понятий (АФП) [16-19] и теории нечетких множеств [20]. Более того, предложенная модель хорошо согласуется с идеологией Granular Computing [21-23]. Близкие идеи лежат и в основе модели мягких множеств [24-26]. Например, мягкое множество рассматриваются как «объект <, который> задается только своими приближениями, а самого точного описания объекта, вообще говоря, нет.» [11].

Несмотря на близость идей указанных теорий предлагаемая модель имеет существенно иную основу. Пятно не определяется на базе множества или нечеткого множества, а является изначально нечетким объектом с элементарными пространственными свойствами. Тем не менее, наличие упомянутых близких математических моделей позволяет сравнивать, изучать и применять некоторые их идеи и подходы.

2. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ МОДЕЛИ ПЯТЕН

Элементарные отношения пятен a, b обозначаются символом $\langle a|b\rangle$ и описываются с помощью 2x2 матриц, составленной из логических связей между пятнами и их окружениями $\bar{a}$ и $\bar{b}$ [6]:

$$\langle a|b\rangle \equiv \begin{bmatrix} ab & a\bar{b} \\ \bar{a}b & \bar{a}\bar{b} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Определенные таким образом логические матрицы, которые в дальнейшем, будем называть L4 числами, в принципе позволяют различать 16 различных элементарных логических отношений между пятнами. Примеры описания элементарных отношений с помощью L4 чисел показаны в таблице 1.

Следует заметить для сравнения что в области исчисления связи регионов (RCC) существует два подхода: RCC-5 и RCC-8, в которых определены 5 и 8 отношений между регионами, соответственно.

Для отображения пятна на группе других пятен вводится понятие базиса пятен, на котором проектируется образ пятна. Например, отображение пятна X на базисе $\{b_i\}$ можно представить в виде вектора $\boldsymbol{x}$ с $L4$ координатами ($L4$ вектор), соответствующим элементарным логическим отношениям его с базисными пятнами $\{b_i\}$:

$$\boldsymbol{x} = [x_1;\ x_2; \dots, x_n], \qquad \text{где } x_i = \langle X|b_i\rangle \quad (2)$$

Пятна называются неразличимыми относительно некоторого базиса, если их образы на этом базисе совпадают.

Таблица 1. Пример элементарных логических отношений пятен a и b [6]

Логические отношения:	$\langle a\|b\rangle$
Пересечение, $a >< b$	$\begin{bmatrix}1 & 1\\ 1 & 1\end{bmatrix}$
Раздельность, $a <> b$	$\begin{bmatrix}0 & 1\\ 1 & 1\end{bmatrix}$
Включение, $a > b$	$\begin{bmatrix}1 & 1\\ 0 & 1\end{bmatrix}$
Включение, $a < b$	$\begin{bmatrix}1 & 0\\ 1 & 1\end{bmatrix}$
Неразличимость, $\equiv$	$\begin{bmatrix}1 & 0\\ 0 & 1\end{bmatrix}$

Ортогональными пятнами называются пятна, которые находятся в отношении раздельности.

Базис пятен называется атомарным, если входящие в него пятна могут находиться только в отношениях раздельности или неразличимости друг с другом, а для других пятен – только в отношениях раздельности, включения или неразличимости. Следует заметить, что атомарный базис аналогичен точкам или элементам множества.

Для пятен X и Y, представленных в виде $L4$ векторов $\boldsymbol{x}, \boldsymbol{y}$, определяются два вида векторного произведения.

а) Скалярное произведение, в результате которого получается $L4$ число z:

$$z = \boldsymbol{x} \cdot \boldsymbol{y} \equiv x_1 \otimes y_1 + x_2 \otimes y_2 + \cdots + x_n \otimes y_n.$$

б) Почленное (Адамара) произведение, в результате которого получается L4 вектор $\boldsymbol{z}$:

$$\boldsymbol{z} = \boldsymbol{x} \odot \boldsymbol{y} \equiv [x_1 \otimes y_1; x_2 \otimes y_2; \dots; x_n \otimes y_n].$$

Здесь оператор $\otimes$ соответствует произведению двух $L4$ чисел, правила для которого необходимо определить. В общем случае, определение операции произведения $L4$ чисел нетривиально, но наиболее просто эти правила можно получить для случая атомарного базиса. Допустим, $A = \{u_i\}$ – атомарный базис и $\alpha_i = \langle a|u_i\rangle$, $\beta_i = \langle b|u_i\rangle$.

$$\alpha_i \otimes \beta_i \equiv \langle a|b\rangle_{u_i} = \begin{bmatrix} au_i \cdot bu_i & au_i \cdot \tilde{b}u_i \\ \tilde{a}u_i \cdot bu_i & \tilde{a}u_i \cdot \tilde{b}u_i \end{bmatrix} \quad (3)$$

Следующим шагом является введение $L4$ матриц и определение операции произведения $L4$ матрицы и вектора, которое делается по аналогии с числовыми матрицами и векторами [6]. Смысл введенного

произведения $L4$ матрицы и вектора заключается в пересчете образа пятна с одного базиса на другой, а также оно может соответствовать перемещению, вращению или деформации пятна в пространстве пятен.

3. СРАВНЕНИЕ КОНЦЕПЦИЙ ПЯТЕН И ДРУГИХ ТЕОРИЙ

Существующие модели нечеткости основаны на принципе сглаживания или размывания границ четких множеств, включая четкие пространственные регионы. Это относится к нечетким множествам, грубым множествам, мягким множествам и egg-yolk модели размытых регионов в области RCC. В модели пятен предлагается обратный путь, когда изначально пятно представляет собой объект с максимально расплывчатой формой, но его четкость можно увеличить, обрабатывая качественные данные об элементарных отношениях рассматриваемого пятна с множеством других, базовых пятен.

Качественно связь моделей пятен и нечетких множеств можно представить в виде диаграммы Эйлера-Венна (см. [6], рис.1). При этом функцию принадлежности для элементов нечеткого множества, в принципе, можно определить, как отношение мер частей пересечения элемента и множества к мере целого элемента. Как отмечалось в [6] для пятна можно ввести квази-меру, которую определить, как количество атомарных пятен, расположенных внутри рассматриваемого пятна или его частей.

Четкие пространственные объекты, включая точки, следует рассматривать как предельный случай пятен бесконечно-большой четкости. Для определения таких четких объектов требуется бесконечно-большое количество данных об их элементарных отношениях с другими четкими объектами. Если имеется только конечная информация о четкой фигуре, то ее образ можно представить в виде пятна, ограниченное «разрешение» которого определяется количеством качественных данных. При этом одно такое пятно будет соответствовать бесконечному множеству четких фигур, которые имеют те же элементарные отношения с базовыми фигурами и поэтому неразличимы с этим пятном по имеющейся информации.

Близкие идеи лежат в основе модели мягких множеств [24-26]. Если сравнивать с моделью пятен, то мягкому множеству можно поставить в соответствие одно пятно, а множество подмножеств мягкого множества аналогично семейству отображений пятна на различных базисах пятен. Интересно также, что определение двух эквивалентных мягких множества ([26], Определение 1.3) имеет

аналогию с определением неразличимости двух пятен по отношению к одному базису пятен.

Как отмечалось во Введении, пятна могут быть моделями не только размытых геометрических фигур, но и смысловых образов или признаков (attributes). Поэтому такие модели как грубые множества или АФП могут быть представлены с помощью пятен как отображение элементов множества (или объектов в АФП) на множестве базисных пятен, которые соответствуют признакам (атрибутам). При этом вопрос грануляции элементов множества определяется естественным образом.

В работах [9-13] рассматривались отношения между регионами точечно-множественных топологических пространств. Формализация отношений между регионами (или «топологических отношений», «отношений регионов») в работах [9], [10] дано с использованием таблиц или векторов Булевых величин, в то время как в работах Cohn [11-13] определения этих отношений даны с помощью логических выражений. В работе [9] определены отношения в виде ряда непустых или пустых пересечений между внутренними точками или точками на поверхности двух регионов, так называемая модель 4-пересечений. В работе [10], выражение (1), рассмотрена расширенная модель 9-пересечений в виде 3x3 таблицы, где включена информация о пересечениях с внешними точками регионов. В работе [13] использовался аналогичный подход, где отношения раздельности, пересечения, включения и др. кодировались с помощью тройки Булевых величин (см. [13], Таблица 1).

В случае пятен необходимо использовать 2x2 таблицы Булевых величин, так как свойство пространства нам не задается, как это имеет место для 3-х мерного пространства в случае RCC. Кроме того, определения элементарных отношений в [13] ТП разные. Например, отношение пересечения в [13] задается Булевой тройкой (0,0,0), а в ТП Булевой таблицей [1, 1; 1, 1]. В отличие от таблиц моделей 4-пересечений [9] и 9-пересечений [10] в определении 2x2 таблицы в модели пятен не используется информация о пресечениях их граничных точек, так как граничные точки не определяются по причине, указанной выше.

Теория яичного желтка (egg-yolk theory) [11] представляет модель размытого региона в виде яйца, где существуют внутренние точки региона (желток) и размытая, «объемная» граница (белок). В этом случае для двух размытых регионов авторами [11] рассматриваются все 46 возможных отношений между их внутренними и граничными частями. В принципе, эта модель представляет структуру, аналогичную приближению грубого множества с помощью четких множеств [14-15].

В последнем случае роль желтка играет нижнее приближение, роль белка – граничный регион, а роль всего яйца – верхнее приближение грубого множества. Заметим, что в обоих моделях, размытому множеству можно поставить в соответствие бесконечное или конечное количество четких множеств, которые неразличимы с нечетким множеством.

В отличие от регионов в RCC, для пятна изначально не определены понятия внутренних и граничных точек, или двумерной границы, так как эти понятия соответствуют информации предельно высокого порядка. Однако по аналогии с рассмотренными теориями можно определить понятие границы как некоторого граничного региона, который формируется совокупностью пересечений рассматриваемого пятна с базисными пятнами, как это будет продемонстрировано в следующем разделе.

Аналогии между понятиями пятен и грубых множеств [14-17] отображены в таблице 2.

Таблица 2. Соответствия между концепциями грубых множеств и пятен

Понятия грубых множеств	Понятия модели пятен
элементы универсума	атомарный базис
гранулы	пятна
атрибут	базисное пятно
значения атрибута	L4 числа
граничная область	граница
приближение снизу	внутренняя область
приближение сверху	внутренняя область + граница

Вообще, гранулы в области исследований *Granular Computing* определяются как подмножества, элементы которых неразличимы, что «зависит от имеющихся знаний» [22]. Заметим, что этот подход аналогичен концепции пятен. Сравнение других аспектов концепций пятен и гранул позволяет сделать общий вывод о том, что обе модели очень близки идеологически. Например, в работе [23] рассматриваются три основных свойства гранул:

- внутренние свойства, отражающие взаимодействие элементов внутри гранулы;
- внешние свойства, раскрывающие его взаимодействие с другими гранулами;
- контекстные свойства, показывающие относительное существование гранулы в конкретной среде».

Легко понять, что первое свойство здесь совпадает с понятием отношений между частями пятна, а второе и последнее – с понятием отношений между пятном и пятнами его окружения.

Следующие утверждения в той же статье одинаково справедливы и для концепции пятен.

«Гранула рассматривается как совокупность отдельных элементов, характеризующихся своими внутренними свойствами, и как единое целое, характеризующееся своими внешними свойствами. Существование гранулы имеет смысл только в определенном контексте. Элементы гранулы могут быть гранулами, а гранула также может быть элементом другой гранулы».

Определения гранулированных видов и сопоставлений, соединяющих гранулы в [23], соответствуют изображениям пятна на разных базисах пятен. Понятия преобразования гранулярности и операторы вычисления могут быть реализованы путем преобразования вектора $L4$ пятна с помощью произведения с матрицей $L4$. Аппарат $L4$ векторов и матриц помогает решать другие проблемы гранулярных вычислений [23], такие как

- изображение / описание гранул и зернистых структур;
- качественная / количественная характеристика гранул и зернистых структур».

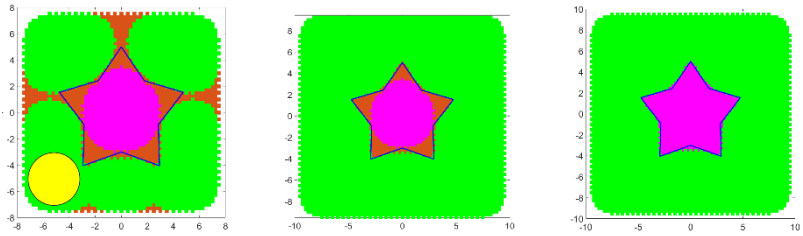
4. ПРИМЕР РЕКОНСТРУКЦИИ ФОРМЫ ФИГУРЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КАЧЕСТВЕННЫХ ДАННЫХ

Автором разработан аппарат обработки качественных данных об элементарных отношениях пятен с пятнами базиса, который позволяет получать отображения пятен на базисе пересечений пятен. Очевидно, что если пятна исходного базиса пересекаются, то использование базиса пересечений пятен позволяет получить изображение с лучшем разрешением, чем непосредственное изображение на исходных базисных пятнах. Учитывая, что четкие геометрические фигуры являются предельным случаем пятен, удобно проводить тестирование полученного аппарата на четких двумерных фигурах. Для этого решалась задача о реконструкции формы четкой фигуры на базе информации об ее элементарных отношениях с базисом других четких фигур.

На рис.1 показаны результаты реконструкции звезды, когда использовались только качественные данные об ее элементарных отношениях с множеством кругов. Круги диаметром 3 единицы были периодически расположены на плоскости в районе звезды. Все фигуры отображались на пикселях размером 0,1, которые играли роль атомарного базиса. Здесь розовым цветом обозначены пиксели, которые соответствуют

внутренней области, коричневым цветом – пиксели, расположенные на границе отображения, а зеленым – пиксели, расположенные вне изображения звезды.

Рис.1(а) соответствует случаю, когда период расположения кругов равнялся 1, и мы видим искажение изображения, которое объясняется недостатком информации для аккуратной реконструкции. На рис.1(б), (в) период расположения кругов был уменьшен до 0,5, что позволило увеличить четкость изображения.



(а) (б) (в)

Рис.1. Пример реконструкции звезды с использованием качественных данных об ее элементарных отношениях с множеством базовых фигур (пример – базовый круг на рис. 1(а))

На рис.1(б) видно, что полученное изображение имеет размытую границу, которая соответствует тому, что пиксели на границе пересекаются с изображением звезды.

На рис.1(в) показан результат применения дополнительного алгоритма реконструкции, который позволил убрать размытую границу на изображении реконструкции.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данная работа посвящена сравнению концепции новой математической модели пятен с другими теориями, которые применяются для моделирования и обработки качественных или неполных данных, а также – размытых пространственных фигур. Показано близость идей предлагаемой модели с другими известными теориями: грубых множеств, АФП, нечетких множеств и мягких множеств. Предлагаемая модель также хорошо согласуется с идеологией Granular Computing и является гибкой, так как она не базируется на точечно-множественной модели пространства и позволяет отображать не только размытые пространственные объекты, но и смысловые образы, а также качественные данные, включая свойства и признаки.

Литература

1. Marcus G. and Davis E. Rebooting AI: Building artificial intelligence we can trust. Vintage, 2019.
2. Marcus G. The next decade in ai: four steps towards robust artificial intelligence. arXiv preprint arXiv:2002.06177, 2020.
3. Stewart M. The Limitations of Machine Learning, Towards Data Science, Jul 29, 2019.
4. Chollet F. On the Measure of Intelligence// cs.AI, 2019.
5. Nie Y., Williams A., Dinan E., Bansal M., Weston J., & Kiela D. Adversarial NLI: A New Benchmark for Natural Language Understanding// cs.CL, 2019.
6. Симонов Н. А. Концепция пятен для задач искусственного интеллекта и алгоритмов нейроморфных систем. // Микроэлектроника. – 2020. – Т. 49. № 6, -С. 459-473.
7. Whitehead A.N. Process and reality: An essay in cosmology. Cambridge: Cambridge University Press, 1929.
8. Clarke B.L. A calculus of individuals based on connection// Notre Dame Journal of Formal Logic. – 1981. – Vol. 22. P. 204-218.
9. Egenhofer M.J. and Franzosa R. Point-set topological spatial relations// International Journal of Geographical Information Systems. -1991. – No. 5. P. 161-174.
10. Egenhofer M.J. and Franzosa R. On the equivalence of topological relations// International Journal of Geographical Information Systems. – 1995. – No 9. P. 133-152.
11. Cohn A.G. and Gotts N.M. The ‘Egg–Yolk’ representation of regions with indeterminate boundaries// Geographic Objects with Indeterminate Boundaries, GISDATA Series, Vol. 2, eds. P.A. Burrough and A.U. Frank. (Taylor & Francis). – 1996. P. 171–187.
12. Cohn A.G., Bennett B., Gooday J.M., and Gotts N. RCC: a calculus for region based qualitative spatial reasoning// GeoInformatica. – 1997. -Vol. 1. – No. 3. – P. 275-316.
13. Stell J.G. Part and complement: Fundamental concepts in spatial relations// Annals of Mathematics and Artificial Intelligence. – 2004. – No 41. – P. 1-17.
14. Pawlak Z. Rough sets// International Journal of Computer and Information Sciences. – 1982. – No. 11. -P. 341-356.
15. Pawlak Z. Rough set theory and its applications to data analysis// Cybernetics and Systems. – 1998. – Vol. 29. – No. 7. – P. 661-688.
16. Yao Y.Y. Rough set approximations: A concept analysis point of view// Computational Intelligence; Ishibuchi, H. Ed. – 2015. – Vol. I. Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS). P. 282-296.
17. Wille R. Restructuring lattice theory: An approach based on hierarchies of concepts// Ordered Sets. Rival, I. Ed.; Reidel: Dordrecht, Netherland. – 1982. – P. 445-470.
18. Ganter B., Wille R. Formal Concept Analysis: Mathematical Foundations. – New York, US: Springer , 1999.

19. Wille R. Formal Concept Analysis as Mathematical Theory of Concepts and Concept Hierarchies// Formal Concept Analysis, LNAI 3626; Ganter, B. et al. Eds.; Springer-Verlag: Berlin, Heidelberg. – 2005. – P. 1-33.
20. Zadeh L.A. Fuzzy sets// Inf. Control. – 1965. – Vol. 8. – No 3. P. 338-35.
21. Zadeh L.A. Towards a theory of fuzzy information granulation and its centrality in human reasoning and fuzzy logic// Fuzzy Sets Syst. – 1997. – No. 19. – P. 111-127.
22. Yao Y.Y. Information granulation and rough set approximation// International Journal of Intelligent Systems. – 2001. – Vol. 16. – No. 1. P. 87-104.
23. Yao J.T., Vasilakos A.V., and Pedrycz W. Granular Computing: Perspectives and Challenges// IEEE Trans. on Cybernetics. – 2013. – Vol. 43. – No. 6. – P. 1977- 1989.
24. Molodtsov D. Soft set theory—first results// Computers & Mathematics with Applications. – 1999. – Vol. 37. No. 4-5. P. 19-31.
25. Молодцов Д. А. Теория мягких множеств. – М.: УРСС, 2004.
26. Молодцов Д. А. Структура мягких множеств// Нечеткие системы и мягкие вычисления. – 2017. – Т. 12. – №1. С. 5-18.

УДК 004.8

ПРОСТРАНСТВЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕСУРСОВ, СОБЫТИЙ И СИТУАЦИЙ В СЛОЖНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ МЕТОДАМИ И ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫМИ СРЕДСТВАМИ КОГНИТИВНОЙ СЕМИОТИКИ И ГЕОИНФОРМАТИКИ*

Колесников А.В., *д.т.н.*
e-mail: avkolesnikov@yandex.ru
ИФМНиИТ БФУ им. И. Канта
Румовская С.Б., *к.т.н.*
e-mail: sophiyabr@gmail.com
Калининградский филиал ФИЦ ИУ РАН
Солдатов С.А., *к.т.н.*
e-mail: ssacompany@mail.ru
ООО МТС ИТ
Ясинский Э.В.
e-mail: ejasinski96@gmail.com
ИФМНиИТ БФУ им. И. Канта

1. ВВЕДЕНИЕ

Развитие математики в XVII – XIX вв. продемонстрировало тот факт, что математические понятия непосредственно не соотносятся с реальностью, а скорее конструируются самим разумом, чем извлекаются из опыта абстрагированием [1]. Хорошо согласовываясь с физическими науками, где выполняется принцип аддитивности, математика остановилась перед онтологическим барьером законов системных и гуманитарных наук, где такой принцип нарушается из-за эмерджентности (синергичности, некомпозициональности) сложных систем, в частности электроэнергетических (ЭЭС).

Применительно к оперативно-диспетчерскому управлению (ОДУ) антропогенными и гетерогенными ЭЭС, где электростатические и электродинамические процессы в силовых элементах, тесно увязаны с информационным обменом в устройствах

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19–07–00208

релейной защиты и противоаварийной автоматики, коллективной деятельностью людей, влиянием основных элементов природной среды, космических, ионосферных и атмосферных воздействий, онтологический барьер преодолевается переходом к «интеллектуальной системе управления», в субъекте которой есть «автоматический партнер» – гибридная система над разнообразием математических моделей расчета параметров режима и эвристических моделей в триаде «Пространство-Время-Знание»: имитационных статистических моделей, экспертных, нечетких, прецедентных и геоинформационных систем, искусственных нейронных сетей и генетических алгоритмов. Это означает, что онтологический барьер преодолевается на принципах разработки гибридных интеллектуальных систем (ГиИС) [2]: нет и не может быть одного-единственного, окончательно разработанного метода для объяснения или решения сложной, неоднородной задачи; тем не менее существует некоторое подмножество уже разработанного множества методов и моделей (гетерогенное модельное поле – ГМП), которое может быть использовано для ситуативного синтеза метода (модели) ее решения.

Необходимый элемент познания и деятельности, особенно оперативной, профессионально-технической, отраженный в ГМП – представления о пространственных и пространственно-временных свойствах и отношениях [3]. Степень обобщенности и схематизации пространственного образа зависит от характера пространственных свойств отражаемых ресурсов, задач деятельности, а также от умения человека-оператора воспроизводить пространственные свойства ресурсов в виде рисунка, чертежа, схемы, символической записи и т. п.

В когнитивно-ориентированной двухзвенной модели процесса поддержки принятия решений методами и инструментальными средствами ГиИС пространственные представления кодируются в схематизированной (предметно-изобразительной) и символической (предикативной) записи.

Настоящая работа посвящена пространственному моделированию и предметно-изобразительному кодированию статических и динамических отношений «ресурс-ресурс» на примере ГМП оперативно-диспетчерского района региональной ЭЭС. Пространственные отношения – базовые для семантических отношений: временных (предполагающих смену событий), обусловленности и др. в моделях-элементах ГМП [4].

2. ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ ЗНАНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЕ, КОГНИТИВНАЯ СЕМИОТИКА ГЕТЕРОГЕННОГО МОДЕЛЬНОГО ПОЛЯ

Человек-оператор действует в реальном пространстве, образное, психологическое отражение которого – пространственное знание [5] когнитивной базы [4], изучается лингвистикой, топологией, геометрией и математической логикой, проявляется в информационном соответствии пространственных образов и их расположения.

Сложность пространственных знаний характеризуют составляющие: конфигурационная, позиционная и взаимного положения ресурсов, формирующиеся на отношениях форм, координат и взаимного расположения. Морфологическое знание использует отношения формы. Позиционное – отношения объекта и начала координат. Взаимное статическое и динамическое пространственное знание в группе объектов описывает ситуацию и использует топологические и теоретико-множественные отношения.

Пространственное моделирование [6] территориально распределенных ресурсов и энергопотоков ЭЭС выполняется методами и средствами ГиИС визуального управления [7], когнитивной семиотики, геоинформатики и геоинформационных систем [12].

Знаковое пространственное моделирование (карты, схемы, графики, чертежи, планы, графы, формулы и др.) – объект изучения когнитивной семиотики [13, 14], – междисциплинарной науки, включающей методы исследования синтеза и анализа смыслов, значений, знаковых структур, процессов понимания знаков и познания мира посредством знаковых систем, что позволит осуществить «концептуальную интеграцию» когнитивного и семиотического моделирования. Термин «когнитивная семиотика» введен в 90-х г. XIX в. Томасом Даддезио (Th. C. Daddesio, «On Minds and Symbols: The Relevance of Cognitive Science for Semiotics»), а в России впервые использован В.В. Рыковым [13-18].

Когнитивная семиотика в науке о гибридизации – интегратор познания посредством: 1) математики (др.-греч. μάθημάτικά – учение, наука) – искусства измерения вещей; 2) морфологии (от др.-греч. μορφ «форма» + λγος «учение») – искусства выявления отношений и их конфигураций; 3) семиотики (др.-греч. σημεῖον – знак; признак»), искусства передачи смыслов [19]. Методы и средства когнитивной семиотики, таким образом составляют методологию и технологию разработки гетерогенного модельного поля ГиИС, над которым для возникшей проблемной ситуации, всякий раз заново синтезируется многомодельная семиотическая система как метод решения сложной,

неоднородной оперативно-диспетчерской задачи. Одно из средств когнитивной семиотики – изографы.

3. ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В КОГНИТИВНЫХ ГИБРИДНЫХ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

Если интерпретировать высказывание французского математика А. Вейля, что за душу каждого математика борются ангел топологии и дьявол абстрактной алгебры, через призму мышления в терминах математики, морфологии и семиотики к пространственному моделированию ЭЭС и электроустановок, то все публикации по данной тематике условно отнесем к: 1) «топологическим» (геоситуационное направление, пространственные ресурсы, модели и действия с пространственно-координированными данными); 2) «алгебраическим» (логико-лингвистическое направление, псевдофизические логики пространства и времени, модели и действия с математическими символами).

Логико-лингвистическое направление пространственного моделирования по отношению к ЭЭС скорее общетеоретическое и представлено псевдофизическими логиками Д.А. Поспелова и пространственной логикой В.Я. Цветкова (геометрической, топологической, теоретико-множественной и образной) [5, 20-22].

В лингвистике значимые результаты по пространственным отношениям и способам их выражения формами имени получены М.В. Всеволодовой и Е.Ю. Владимирским [23], конкретизировавшими проблемы семантики и способов выражения обстоятельственных отношений в русском языке. Пространственные отношения – соположение в пространстве ресурса, действия (события), признака и некоторого пространственного ориентира – локума (пространство или ресурс, относительно которого определяется местонахождение ресурса, действия, признака и характер их взаимоотношений: статический, динамический). Современная лингвистика понимает локативность как семантическую категорию, языковую интерпретацию мыслительной категории пространства, и как средства языка, взаимодействующие при выражении пространственных отношений [4]. В рамках локативной категориальной ситуации рассматриваются отношения ресурса и его окружения, выражаемые в конкретном высказывании. Предложно-падежные конструкции выражают семантику локативности и ресурс-локализатор, а локативная категориальная ситуация описывается известными ориентирами, и человек-оператор, чувственно

не воспринимающий ситуацию, может образно представить расположение или передвижение ресурса в его окружении [24].

Видным представителем логики отношений был С.И. Поварин, различавшего суждения о принадлежности (отношения определения, $S - P$) и суждения, выражающие отношения пространства, времени, величины, причинности, родства и др., т.е. суждения об отношениях (aRb) [25]. Псевдофизические логики [26] – дедуктивные системы, логики отношений-переменных, отображающие не объективный физический мир, а его субъективное восприятие человеком. Псевдофизические логики на топологических и метрических шкалах включают модель представлений о пространстве и времени [21].

Пространственную логику [22, 27] В.Я. Цветков связывает с пространственным анализом и с логическими рассуждениями в геоинформатике, и различает геометрическую, топологическую, теоретико-множественную и образную логики.

Геоситуационное направление геоинформатики и геоматики представлено в электроэнергетике геоинформационными системами: ГИС ОАО «МОЭСК» [28, 29]; федеральная государственная информационная система о состоянии и прогнозе развития топливно-энергетического комплекса ГИС ТЭК [30], ГИС развивающихся электрических сетей ElecNet [31], ГИС «Россети» [32], ГИС мониторинга электросетевого комплекса для ПАО «МРСК Юга» (ПАО «Россети Юг» [33-37]. Решены вопросы стандартизации инфраструктуры пространственных данных (например, ГОСТ Р 58570—2019, ГОСТ Р 58571–2019). Организован Федеральный НТЦ геодезии, картографии и инфраструктуры пространственных данных [38], а 17.09.2020 г. запущен в тестовом режиме Калининградский региональный портал пространственных данных [39].

Важный аспект использования методов и моделей ГИС для разработки ГМП автоматического партнера – научить оперативных работников мыслить пространственно для организации эффективного информационного обеспечения технического обслуживания и ремонта ЛЭП и электроустановок. Важнейший плюс от внедрения ГИС для электросетевых компаний – возможность моделирования аварийных ситуаций – отражение на ситуационных экранах последовательности событий при аварии, учитывая метеоусловия, а также локативно и, учитывая конфигурации зданий и сооружений [29].

Карта – абстракция, схема, модель пространственных явлений, наиболее удачный графический инструмент для передачи пространственной информации в ГМП [8] Отображение

пространственных явлений в КГиИС предполагает разработку и включение в её гетерогенное модельное поле [40] еще одного класса моделей – геомоделей, еще одного класса переменных – визуальной переменной (фр. variables visuelles, англ. visual variables) графической семиологии Ж. Бертена [41], а автономный базис необходимо пополнить методами и технологиями ГИС.

Геоинформационная модель (геомодель) в ГМП ГиИС ЭЭС – симбиоз двух моделей данных, лежащих в основе представления пространственной и семантической, атрибутивной информации о ресурсах в реляционных СУБД [37]: $G = \{O_l, O_e, T(O_e), M\}$, где O_l – ресурсы-территории на электронной карте (природная среда, транспортные сети, районирование, зонирование, земельные участки, административно-территориальное деление, поселения и др.); O_e – ресурсы энергетики (антропогенные силовые ресурсы, потребители электроэнергии, оперативно-выездные бригады электромонтеров; специальный автотранспорт, устройства и оборудование оперативно-выездных бригад; приборы и устройства технической диагностики; системы и устройства релейной защиты; системы и устройства противоаварийной автоматики); $T(O_e)$ – топологические отношения (внутрислойные и межслойные) энергоресурсов, локализованных на ресурсах-территориях; M – метаданные, структура атрибутивной информации и цифровой модели местности [42]. Теоретическая основа геомоделей – алгебраическая топология и теория графов [10].

Основа пространственного моделирования в ГИС – базовый растровый слой (подложка) и слои электронной векторной карты, над которыми строятся композиции посредством оверлейных операций наложения: объединение, совмещение для отдельной области, пространственная и тематическая проблемно-ориентированная выборка. ГИС обеспечивает сбор, хранение, обработку, анализ и отображение пространственно-координированных данных, а также получение на их основе новой информации и знаний. Характерная тенденция последнего времени – стремительное расширение возможностей оперативной актуализации геоданных, и рост объема открытой пространственной информации: проекты OpenStreetMap, VMap0, VMap1, космические снимки с детальностью 10 – 30 м LANDSAT и SENTINEL, цифровые модели рельефа SRTM и ASTER GDEM. Основной компонент ГИС в ЭЭС – цифровые пространственные данные о местности, территории, энергоресурсах, их словесно-вербальные описания, цифровые изображения, цифровые карты и др. Пространственные данные локативно-координатно

привязаны к поверхности Земли посредством математических моделей, а также системы координат, например, WGS-1984 и Pulkovo1942.

4. ПРЕДМЕТНО-ИЗОБРАЗИТЕЛЬНОЕ КОДИРОВАНИЕ СТАТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ И ПРОСТРАНСТВЕННОЙ СТРУКТУРЫ

Семантическая категория локативности – разновидность функционально-семантического поля, в составе которого выделяются статическая и динамическая локализации субъекта и перемещение объекта субъектом [43]. В русском языке выделяются статические, в том числе пространственно-временные и динамические отношения [23]. Гордоновское мировоззрение «о протекающих транзактах» – абстрактных динамических объектах, характеризующихся пространственно-временной локацией и свойствами – положило начало быстрому восприятию процессов взаимодействия и спустя 60 лет служит верой и правдой идеям визуального мышления [44].

Рассмотрение природных и природно-антропогенных объектов, установок, приборов, транспорта, человеческого фактора – как ресурсов оперативного визуального мышления в ЭЭС неизбежно различает и создает впечатление неподвижности, устойчивости, спокойствия, стабильности, равновесия статичности одних ресурсов (от греч. statos – смысл стоящего, неподвижного, уверенного, спокойного, остановившегося, их называют статическими ресурсами) и зрительное впечатление движения, скорости, изменения и времени (от греч. dynamis – потенция движения, dinamikos – смысл силового, движущегося, мобильного, энергичного, их называют динамическими ресурсами).

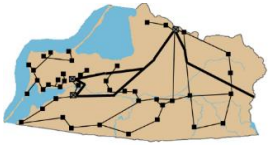
Первые относительно устойчивы в местоположение (расположении) относительно друг друга и системы координат. Вторые перемещаются относительно статичных и друг друга, а их местоположение актуально в пространственном окружении. В любом случае словесно-вербальные и предметно-изобразительные коды моделей-элементов ГМП должны отвечать на вопрос: «Где находится ресурс?», имея в виду: 1) место или область нахождения ресурса; 2) расположение ресурса в природной окружающей среде; 3) положение ресурса относительно других статичных ресурсов [45]. Эти аспекты связаны друг с другом и на практике они, обычно, не отличаются.

Место (англ. region, place) – часть пространства, занимаемого ресурсом в его естественном окружении. Физическое место показывается в связи с его природными характеристиками и

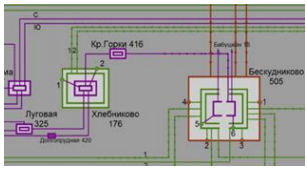
ближайшим окружением (рис.1а), а формализованное – демонстрирует техническую ясность (рис.1 б-г).

а)

б)



в)



г)

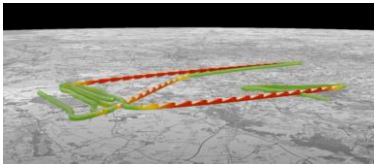
Рис.1. Предметно-изобразительные представления статических ресурсов и пространственной структуры

На рис.1 изображены представления о: физическом месте «Калининградская область (КОБ) РФ» – а); границах административных районов КОБ РФ и деления энергосистемы на «западную» и «восточную» – б); о электросетях КОБ РФ (жирная линия – 330 кВ, тонкая линия – 110 кВ; расположение показано условно-приближенно) – в); пример отображения плана (конфигурации, топологии) электроподстанций в зависимости от коммутационного состояния систем шин и трансформаторных связей [46] – г).

Расположение (англ. location) – пространственное отношение между ресурсом и его окружением, также ресурсом. В графическом изображении ресурс-среда выступает как система отсчета для ресурса, размеры которого обычно минимальны, чтобы внимание сосредотачивалось на месте его расположения. Родственные (связанные) расположения показывают пространственные характеристики сходных элементов ресурса, относительно общей среды. Расположение составных частей ресурса, принято называть планом (рис. 1г). Расположение: маршрута – ресурсы, изображаемые линиями и схемой направлений относительно окружения; сети (дорожной, электрической) – обобщенная схема (маршрутов, остановочных пунктов, станций, электроподстанций, генерации и потребителей) в отношении к их окружению (рис.1в). Статические

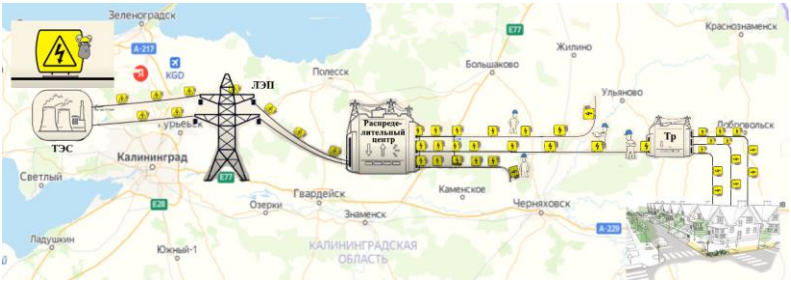
ресурсы могут быть формализованы, символизированы или поданы описательно. Расположение области (рис. 1б) показывает место ресурса в конкретном отношении к детальной географической или политической системе отсчета.

Расположение движения отображает перемещение ресурса по маршрутно-стационарной сети в отношении к ее окружению. Могут быть показаны как маршрут движения, так и его качество, и количество. Необходима визуальная дифференциация между формой активного движения динамических ресурсов и пассивной, статичной сетевой структурой, через которую оно проходит (рис.2).



а)

б)



в)

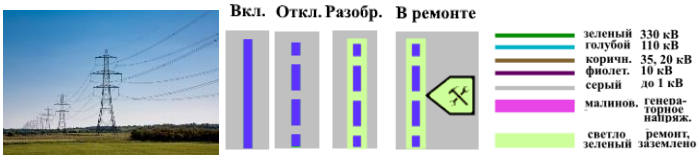
Рис.2. Расположение движения

На рис.2 изображены: интерактивная динамическая 3D-визуализация данных о геопривязанных перемещениях пассажирских самолетов и визуальный анализ их траекторий в зоне диспетчеров аэропортов [47] – а); динамическая 2D-визуализация геопривязанного перемещения пассажирских автобусов в районе пл. Победы г. Калининграда РФ в сервисе «Яндекс.карты» (динамический ресурс – автобус обозначен стреловидным символом, а в увеличенном виде показан над ним) [48] – б); геопривязанная условная схема движения энергии электрического тока от источника (ТЭС) к потребителю (динамический ресурс – электроэнергия обозначена бегущим по проводам ЛЭП «электробычком», в увеличенном виде изображенном над ТЭС) – в).

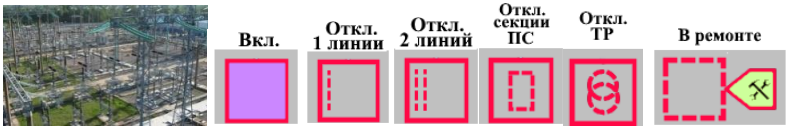
Предметно-изобразительное кодирование статических ресурсов и пространственной структуры в ГМП КГиИС возможно инструментальными средствами ГИС. В этом случае подложка – географическая карта мира OpenStreetMap («открытая карта улиц») со свободной лицензией, над которой надстраиваются слои с изографами [16] статических ресурсов и пространственной структурой ЭЭС. Графический оверлей, как композиция подложки и изографов, рассматривается как пространственная модель статических отношений объекта ОДУ.

Обозначения статических ресурсов и их коммутационных состояний в слоях пространственных моделей ОДУ районом региональной ЭЭС, кодированных изографами, приведены на рис.3.

а)



б)



в)

г)

Рис.3. Обозначение статических ресурсов ОДУ РЭС и их коммутационных состояний на пространственных моделях

На рис.3 изображены фотографии и условные знаки: электростанций – а); воздушных ЛЭП – б); распределительных электроподстанций – в); потребителя электроэнергии – г).

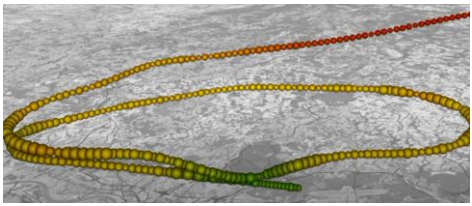
В случае, если оператору понадобится спецификация когнитивного образа статического ресурса, достаточно указать на его знак (рис.3), и в соотнесенной с ним табличке отобразится изограф многоролевого визуального отношения определения ресурса: «ресурс *быть* ресурс ∧ ресурс *иметь* (*свойство*) *имя* именное свойство ∧ ресурс *иметь (свойство) параметр* параметр ∧ ресурс *иметь* (*свойство*) *характеристику* характеристика ∧ ресурс *быть предназначенным для* действие ∧ ресурс *иметь* (*режим*) *состояние* состояние ∧ ресурс *иметь в составе* ресурс».

5. ПРЕДМЕТНО-ИЗОБРАЗИТЕЛЬНОЕ КОДИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ, СОБЫТИЙ И СИТУАЦИЙ

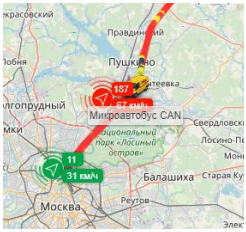
Основной динамический ресурс ОДУ РЭС ЭЭС – не видимая энергия движущегося электромагнитного поля, характеризующаяся напряжением (вольты), частотой (герцы) и мощностью (ватты). В образной форме энергию «несет» электромагнитная волна, и мчится она от источника (электростанции) к потребителю в пространстве, окружающем провод ЛЭП со скоростью света вдоль проводов, а не в проводах. Последние только направляют поток энергии электромагнитного поля. Поэтому провода ЛЭП с током – не «трубы» с текущей по ним энергией, а скорее «рельсы», направляющие энергопоток (рис.2в). Однако в РЭС ЭЭС есть и другие динамические ресурсы со значительно меньшими, и поэтому визуально наблюдаемыми скоростями перемещения в пространстве: мобильные генераторные установки, оперативно-выездные бригады ремонтников, их устройства и оборудование, специальный автотранспорт, комплектующие и расходные электротехнические материалы, приборы и устройства технической диагностики. К «негативным» динамическим ресурсам относятся погодные явления, атмосферные, ионосферные и космические воздействия.

Подход к пространственному моделированию ресурсов с кардинально отличающейся динамикой может быть решен в оппозиции «дискретное–непрерывное» (рис.4).

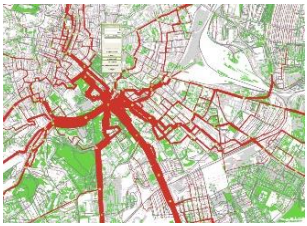
а)



б)



в)



г)

Рис.4. Представление перемещения динамических ресурсов в оппозиции «дискретное–непрерывное»

На рис.4 изображены локативные перемещения самолетов на экране радара диспетчерской службы аэропорта – а); потоковая траектория самолета, привязанная к геомодели – б); изменение положения движущегося автотранспорта на мониторе онлайн-мониторинга диспетчера с анимационными эффектами мигания расходящихся дуг – в); транспортными потоками различной плотности, привязанными к городской геомодели – г)

Потоки энергии электромагнитных волн, распространяющихся в окружающем пространстве ЛЭП, контрастируются и делаются «видимыми» для человека-оператора методом кодирования цветом (рис.3б) и типом линии: сплошная обозначает, что электроэнергия перемещается и состояние ЛЭП – «Включено» («Вкл.»); штриховая обозначает, что электроэнергия не перемещается и состояние ЛЭП – «Отключено» («Откл.»). Аналогичный подход применен и для кодирования знаков ресурсов-истоков, ресурсов-распределителей (преобразователей) и ресурсов потребителей электроэнергии (рис.3а, в, г).

Представление о взаимодействии статических и динамических ресурсов у оперативно-диспетчерского персонала формируется на умозрительных моделях: «событий» и «ситуаций» [49].

Событие по О.Н. Селиверстовой [50] – мгновенное действие с параметрами: фактом, измерением, временем и пространством. Параметр «изменение» включает изменение состояний через проявление ресурсом некоторого свойства во времени, либо изменение количества и качества ресурсов, свойств и отношений. Параметр «время» характеризует события как «временные сущности», организованные, упорядоченные и взаимосвязанные вдоль оси времени. Параметр «пространство» соотносит событийный поток происходящего с пространственными ориентирами, локализует его составные части (рис.5).

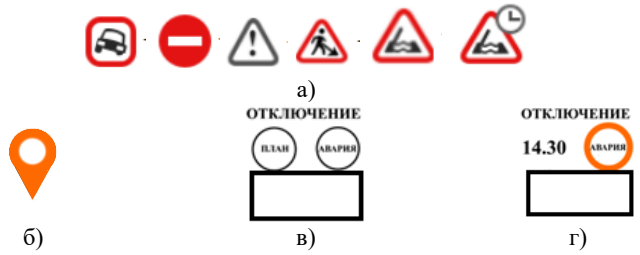


Рис.5. Знаки пространственного моделирования событий (указав на значок, можно увидеть сообщение о событии)

На рис.5 показаны знаки (слева-направо): дорожно-транспортных происшествий, перекрытия движения, прочего, дорожных работ, развода моста, событие «мост будет разведен» в сервисе «Яндекс.карты» – а); отключения электроэнергии на карте отключений портала электросетевых услуг компании «Россети» [51] – б); а также изографы событий «отключение» в когнитивном – в) и оперативном – г) образах Р-ситуации ОДУ РЭС ЭЭС.

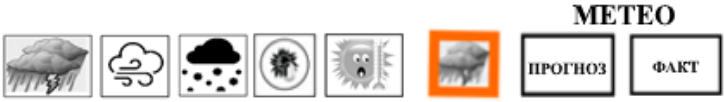
Ситуация (древн. лат. situatio – положение) – сочетание условий и обстоятельств, создающих определенную обстановку, положение [52]. Понятие «ситуация» возникает при взаимодействии субъекта ОДУ РЭС с окружающей действительностью и включает: самого субъекта, окружающую среду и взаимодействия между ними.

Когнитивно-графическое представление ситуации в [53] определяется тройкой $G = < V, D, L >$, где V – множество индикаторов (визуальных сигналов), D – взаимное расположение индикаторов, L – множество уровней иерархии подсистем в наблюдаемом объекте. Визуальный сигнал есть шестерка $v = < Color, Form, Size, Position, Change, Orientation >$.

В контексте развиваемой нами категоризации и концептуализации языка отношений и связей человека-оператора в ОДУ РЭС семантика условий и обстоятельств раскрывается понятием «Р-ситуация».

Р-ситуация (ситуация на ресурсах) – множество пространственных отношений на ресурсах, используемых в производственных операциях, погодная Р-ситуация и события «отключение» (планируемые или аварийные) в текущий момент времени и в контексте пространственной структуры объекта управления.

Погодная Р-ситуация (рис.6в) – предметно-изобразительное представление (прогнозное и фактическое) о взаимодействии «негативных» динамических ресурсов (рис.6а) с ресурсами (динамическими и статическими) на локализованной территории. Рассчитывается по данным Интернет-сервисов и характеризуется шкалой цветовых значений погоды: «зеленый» – не опасна, неблагоприятных явлений не ожидается; «желтый» – потенциально опасна, возможны неблагоприятные явления; «оранжевый» – опасна, вероятны стихийные бедствия, ущерб; «красный» – очень опасна, вероятны крупные разрушения и катастрофы.



а) б) в)

Рис.6. Обозначения «негативных» динамических ресурсов

На рис.6 (слева-направо) воздействие грозовых атмосферных перенапряжений, влияние ветра, гололедно-изморозевых образований, воздействия геомагнитных бурь и аномальной жары – а); оранжевый уровень опасности грозовых атмосферных перенапряжений – б); погодная Р-ситуации – в). Пример фрагмента когнитивного (избыточного) образа Р-ситуации ОДУ РЭС ЭЭС приведен на рис.7.

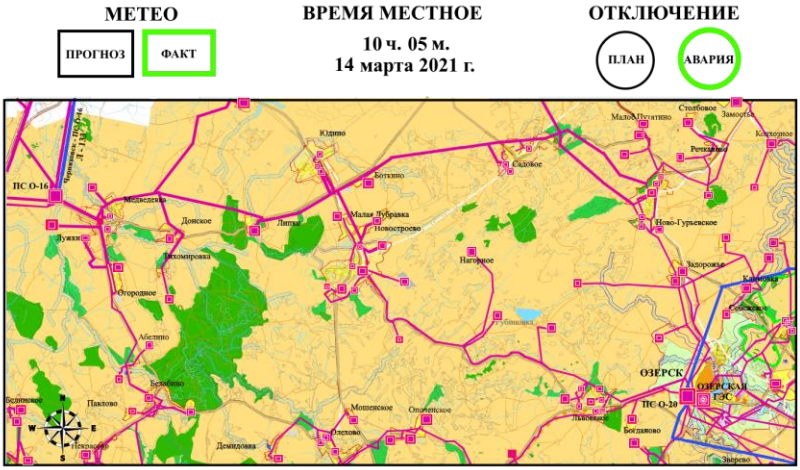
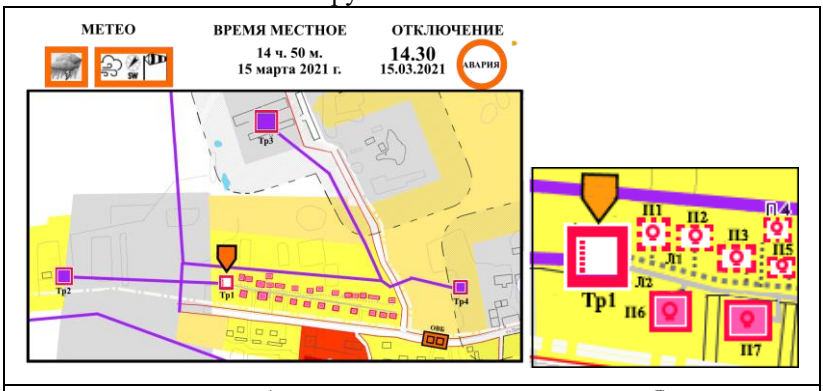


Рис.7. Р-ситуация (фрагмент когнитивного образа) в РЭС ЭЭС, реализованная изографами в графическом редакторе Paint.net v.4.2.15

На рис.7 показан оверлей с подложкой – генеральным планом МО «Озерский городской округ» КОБ РФ (карта планируемого размещения объектов местного назначения, М 1:50 000) [54]; слоем воздушных ЛЭП (110 кВ, 15 кВ, состояния «Вкл.»), подстанций (110/15 кВ; 15/0,4 кВ; состояния «Вкл.»), Озерской ГЭС (состояние «Вкл.»); слоем погодной Р-ситуации (цвет контура «метео по факту» – зеленый, «погода не опасна»); слоем событий «отключение» (плановых, аварийных); слоем местного времени.

Преобладающая часть (80 – 90%) недоотпуска электроэнергии приходится на аварии в электрических сетях [55], которые диспетчеры называют «отключениями». Отключение оной линии ЛЭП приводит к погашению потребителей на ограниченной территории и устраняется путем поиска и выделения поврежденного участка и включением оставшихся сегментов сети от резервных источников. Когда КГиИС, автоматически контролируя режим объекта управления, посредством функционального элемента – нечеткой экспертной системы, обнаружит смещение параметров его состояния из кластера «нормальный режим» в кластер «аварийный режим», человеку-оператору ОДУ РЭС предъявляется оперативный образ Р-ситуации (рис.8). Поскольку автоматическому партнеру известны ресурсы, свойства которых вышли за допустимые интервалы он вычисляет, прежде всего, редуцированный оперативный образ Р-ситуации до фрагмента, содержащего

информацию только о местоположении аварийного ресурса в его естественном ближайшем окружении.



а) б)

Рис.8. Моделирование Р-ситуации (фрагмента оперативного образа) в РЭС ЭЭС, реализованное изографами в графическом редакторе Paint.net v.4.2.15

На рис.8 показан оверлей с подложкой – картой планируемого размещения объектов местного назначения пос. Яблоновка, М 1:2000 – а [54]: слоем воздушных ЛЭП (15 кВ, состояния всех «Вкл.»; 0,4 кВ, состояние Л1 «Откл.», состояние Л2 «Вкл.»); трансформаторных подстанций (Тр2 – Тр4 15/0,4 кВ, состояния «Вкл.», Тр1 – «Откл. 1 линии»); слой потребителей (П1 – 5 и др. на линии Л1 состояние «Откл.», П6, П7 и др. на линии Л2 состояние «Вкл.»); слоем погодной Р-ситуации (грозовые атмосферные перенапряжений, влияние ветра цвет контура «метео по факту» – оранжевый, «погода опасна»); слоем событий «аварийное отключение» (14.30, 15.03.2021); слоем местного времени – 14 ч. 50м., 15 марта 2021 г. На рис.8б представлено увеличенное изображение участка территории, прилегающей к трансформаторной подстанции Тр1.

При этом на изображении оперативного образа Р-ситуации отображаются фигуры-стрелки оперативных действий, указывающие своим острым концом на значки аварийных ресурсов и привязывающие к месту предполагаемые и рекомендуемые человеку-оператору локативные действия-операции. Мигающие контуры стрелок, требуют от оператора одобрения, планирования и организации исполнения. Если оператор соглашается с рекомендациями, указывает на один или несколько (или поочередно все) из мигающих значков, то появляется предметно-изобразительное изображение «стрелки-действия»,

выступающее в этом случае планом предметно-ориентированного действия с уже автоматически частично заполненной частью ролей по отношениям «действие-ресурс» и «действие-свойство». После конструирования предметно-изобразительного знака «действие» схема-сценарий автоматически перекодируется в вербально-предикативное командное высказывание – одну или набор диспетчерских команд, отображаются оператору и передаются по средствам связи исполнителям. Если оператор отвергает рекомендованные автоматическим партнером действия, то он может выбрать предметно-изобразительное представление из имеющихся в библиотеке схем и специфицировать ролевые отношения «вручную».

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Влияние методов и инструментальных средства когнитивной семиотики, геоинформатики, гибридных и синергетических интеллектуальных систем на конструирование и практику автоматизированных систем ОДУ РЭС региональной ЭЭС не удовлетворительно. Два факта контрастируются по мере исследований триады «Пространство-Время-Знание» на примере оперативной работы диспетчеров электрических сетей.

Факт первый: высокая скорость протекания аварийных процессов практически исключает возможность участия человека в управлении аварийными режимами в электросистемах. Поэтому метафорическую роль «пилота» электросетей, транспортирующего изготовленную на электростанции энергию по «рельсам» линий электропередачи в целевую «электророзетку» потребителя, исполняет не человеческий фактор, а пространственно-распределенные локальные автоматы: устройства релейной защиты, противоаварийной автоматики и регуляторы. Это объясняет и ситуацию, когда военные пилоты понимают смысл, и актуальность понятия «образ полета», а в лексиконе энергодиспетчеров таковой отсутствует, а их работа скорее схожа с дирижёром оркестра музыкантов-исполнителей, (добавим) работающим в дистанционном режиме.

Факт второй: успешное «пилотирование» электросетей до настоящего времени – грандиозный успех математики и теории автоматического регулирования XIX, XX вв. Тенденции XXI в.: умные сети электроснабжения, интеллектуальная электроэнергетика, активно-адаптивные сети убедительно показывают, что: 1) математика достигла принципиального предела продвижения к описанию реальности и, можно говорить только о сбережении накопленные ею и автоматикой знаний о «пилотировании» электросетей; 2) математические модели

должны сотрудничать с эвристическими знаниями и накопленным опытом человека-оператора в гибридных и синергетических системах, как в локализованных на цифровых распределительных подстанциях, секционированных линиях электропередачи с использованием интеллектуальной силовой электроники, так и в качестве «автоматических партнеров» оперативных работников для совместного решения задач и проблем управления процессами на доступных человеческому восприятию, обдумыванию и реагированию временных интервалах.

Пространственное моделирование и предметно-изобразительное кодирование средствами когнитивной семиотики и геоинформатики в гибридных интеллектуальных системах делает невидимое при «дирижировании электросетевым оркестром» не просто видимым, а локативно видимым, контрастным соотносительно с расположением статических и динамических ресурсов, наконец ситуативно видимым, что способствует мгновенному пониманию особенностей текущей ситуации и ускоренной выработке оперативных действий с ресурсами по ликвидации возникших изменений и нарушений.

Оппозиция «предметное-оперативное» знание в отображении информации на диспетчерских экранах решается в соотносительности когнитивного (избыточного) и оперативного (лаконичного) образов статических и динамических ресурсов, событий и ситуаций в зависимости от состояния и режима сети и оборудования.

Для пространственного моделирования применяются изографы – расширение теории графов, специфицирующих отношение инцидентности в топологическом, геофизическом и метрическом пространствах, используя теоретико-множественные и предикативные представления.

Литература

1. Перминов В.Я. Математика и реальность: Гносеологические проблемы математизации знания // Вестник МГУ. Серия. 7. – 2014. – № 1. – С. 42-68.
2. Колесников А.В., и др. Методология и технология решения сложных задач методами функциональных гибридных интеллектуальных систем. – М.: ИПИ РАН, 2007.
3. Кондаков И.М. Психология. Иллюстрированный словарь. – СПб.;М.: Прайм-ЕВРОЗНАК. – 2003.
4. Еливанова М.А. Категория локативности и ее выражение в детской речи / Коллект. монография «Семантические категории в детской речи». Отв. Ред. С.Н. Цейтлин. – СПб.: Изд-во «Нестор-История». – 2007. – С. 1-21.
5. Цветков В.Я. Пространственные знания и пространственная логика // Информац. технологии в науке, образов. и управл. – №3. – 2019. – С.17-26.

6. Булгаков С.В. Особенности пространственного моделирования // Вестник МГТУ МИРЭА. – № 2. – Июнь 2014. – Вып. 3. – С.145-155.
7. Колесников А.В. Функциональные гибридные интеллектуальные системы визуального управления // Гибридные и синергетические интеллектуальные системы: материалы IV Всероссийской Поспеловской конференции с межд. – Калининград: Изд-во БФУ им. И. Канта. – 2018. – С.18-81.
8. Де Мерс М.Н. Географические Информационные Системы. Основы / Пер. с англ. – М.: Дата+, 1999.
9. Митчелл Э. Руководство по ГИС анализу. Ч. 1: Пространственные Модели и взаимосвязи / Пер. с англ. А. Ищук, И. Чепуштанова. – Киев: Изд-во ECOMM Co., Стилос, 2000.
10. Берлянт А.М. Теория геоизображений. – М.: ГЕОС, 2006.
11. Основы геоинформатики / под общ. ред. В.С. Тикунова. Кн.1 – М.: Изд. центр «Академия», 2004.
12. Основы геоинформатики / под общ. ред. В.С. Тикунова. Кн. 2 – М.: Изд. центр «Академия», 2004.
13. Валькман Ю.Р., Тарасов В.Б. От онтологий проектирования к когнитивной семиотике // Онтология проектирования. –2018. – Т. 8. – № 1(27). – С. 8-34.
14. Цветков В.Я. Когнитивная семиотика и информационное моделирование // Перспективы Науки и Образования. – № 6(23). – 2016. – С. 17-22.
15. Валькман Ю.Р. О когнитивной семиотике // Интеллектуальный анализ информации. Сб. трудов XII международной конференции им. Т.А. Таран (ИАИ-2012, Киев 16–18 мая 2012 г.). – Киев: Просвіта. – 2012. – С. 19-30.
16. Колесников А.В., Румовская С.Б., Ясинский Э.В. Предметно-изобразительное представление знаний в технической семиотике и искусственном интеллекте: изографы // Гибридные и синергетические системы : материалы V Всероссийской Поспеловской конференции с международным участием / [Электронный ресурс] : научное электронное издание.– Калининград : Изд-во БФУ им. И. Канта. – 2020. – С. 155-218.
17. Осипов Г.С., Чудова Н.В., и др. Знаковая картина мира субъекта поведения. – М.: ФИЗМАТЛИТ. – 2018.
18. Когнитивная машинная графика в системах космического и медицинского назначения / Под общ. Ред. М.Н. Бурдяева. – М.: ЛЕНАРД, 2019.
19. Ильин М.В., Фомин И.В. И смысл, и мера. Семиотика в пространстве современной науки // Политическая наука. – № 3. – 2016. – С.30-46.
20. Поспелов Д.А. Логико-лингвистические модели в системах управления. М.: Энергоатомиздат, 1981.
21. Кандрашина Е.Ю., Литвинцева Л.В., Поспелов Д.А. Представление знаний о времени и пространстве в интеллектуальных системах / Под ред. Д.А. Поспелова. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1989.
22. Цветков В.Я. Пространственная логика в геоинформатике // Вектор ГеоНаук. – № 3(2). – 2020. – С.91-100.
23. Всеволодова М.В., Владимирский Е.Ю. Способы выражения пространственных в современном русском языке. – М.: Изд-во ЛКИ, 2008.

24. Мартынова Е.В. Выражение семантики пространственных отношений детьми с помощью предложно-падежный конструкций // Вестник ЧГПУ. № 4. 2008. – С. 261-272.
25. Асмус В.Ф. Логика. – М.: Изд-во «Гос. полит. литературы», 1947.
26. Поспелов Д.А. Ситуационное управление: теория и практика. – М.: Наука. – Гл. ред. Физ.-мат. Лит, 1986.
27. Шпирко С.В. Применение пространственной логики Д.А. Поспелова в задаче восполнения пространственной информации, содержащейся в средневековых текстах (на примере историко-географического трактата Худуд ал-'алам) // Историческая информатика. № 2–3. 2014. С.94-108.
28. Сайт ГИСПРОЕКТ. ГИС МОЭСК [Электронный ресурс] URL: http://www.gispro.ru/gis-moesk/.
29. Мариничева О. ГИС приходят в сети // Энергетика и промышленность России. – № 12 (248). – Июнь 2014.
30. Портал ГИС ТЕК. [Электронный ресурс] URL: https://gis-tek.ru/.
31. Попова О.М. Построение геоинформационной системы электрических сетей // Вестник ИрГТУ. – №2 (26). – 2006. – С. 101-104.
32. ГИСИНФО. Геоинформационная система "Россети" – надежность и эффективность управления электросетевым комплексом. [Электронный ресурс] URL: https://gisinfo.ru/newspages-news-2133-0.
33. Datum SOFT. ГИС мониторинга электросетевого комплекса для ПАО “МРСК Юга” (ПАО “Россети Юг”). [Электронный ресурс] URL: https://datum-soft.ru/projects/4089/.
34. Рябинин В.В., и др. Визуализация характеристик электрических сетей с помощью бинированных карт // «Вестник ИГЭУ. – Вып 5. – 2014. – С. 1-8.
35. Слюсаренко С.Г., и др. Применение ГИС-технологий в электроэнергетических системах //Тр. международной научно-практической конференции «ГЕОИНФОРМАТИКА-2000», Томск, 12–14 сентября 2000 г. –Томск: Изд-во ТГУ. – 2000. – С. 234-236.
36. Секнин А. ГИС в электроэнергетике. Интеллектуальные энергосистемы. // Информационные системы. – № 1. – 2014. – С.26-29.
37. Трипулина В.В. Моделирование и разработка ГИС-сервисов для задач исследований в области энергетики. // Вычислительные технологии. Т.13, Спец. Выпуск 1. – 2008. – С.78-87.
38. Сайт федерального НТЦ геодезии, картографии и инфраструктуры пространственных данных. [Электр. ресурс] URL: http://cgkipd.ru/.
39. Геопортал Калининградской области. [Электронный ресурс] URL: https://geoportal.gov39.ru/.
40. Колесников А.В. Гибридные интеллектуальные системы. Теория и технология разработки/ Под. ред. А.М. Яшина. СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2001.
41. Bertin J. Semiology of Graphics: diagrams networks maps / translated by W.J. Berg. – New York: Esri Press, 2011.
42. Журкин И.Г., и др. Геоинформационные системы. – М.: КУДИЦ-ПРЕСС, 2009.
43. Саввина С.Л. Средства выражения статической локализации в русском языке // Изв-я государст. пед. ун-та им. А.И. Герцена. – 2008. – С. 237-241.

44. Колесников А.В., Чемерис НА. Visual Event 2.0: язык программирования гибридных интеллектуальных систем и система неоднородного моделирования // Сб. тр. международной НК, посвященной 70-летию основания КГТУ. – Калининград: Изд-во КГТУ. – 2000. – С. 241-243.
45. Боумен У. Графическое представление информации. – М.: Мир, 1971.
46. Штейнбок Л.С. Ситуационная технология отображения информации. – М.: Изд-во «Научные технологии, 2017.
47. Buschmann S., Trapp M. Doller J. Real- Time Visualization of Massive Air-Traffic Trajectories // CW'14: Proceedings of the 2014 International Conference on Cyberworlds Santander, Spain. – Santander: IEEE. – P. 174 -81.
48. Условные обозначения сервиса Yandex [Электронный ресурс] URL: https://yandex.ru/support/maps/concept/map.html.
49. Бир С. Наука управления // Пер. с англ. – М.: «Энергия», 1971.
50. Селиверстова О.Н. Семантические типы предикатов. – М.: Наука, 1982.
51. Портал электросетевых услуг группы компаний «Россети» [Электронный ресурс] URL: https://портал-тп.рф/platform/portal/tehprisEE_about_portal.
52. Академик. Философская энциклопедия. Ситуация. [Электронный ресурс] URL: https://dic.academic.ru/dic.nsf/enc_philosophy/3312/СИТУАЦИЯ.
53. Когнитивная машинная графика в системах космического и медицинского назначения / Под. Общ ред. М.Н. Бурдаева. – М.: ЛЕНАРД, 2019.
54. Генеральные планы муниципальных образований. Озерский городской округ. [Электронный ресурс] URL: https://gov39.ru/vlast/agency/aggradostroenie/genplans/09_ozersk/.
55. Мастерова О.А., Барская А.В. Эксплуатация электроэнергетических систем и сетей: О.А. Мастерова, А.В. Барская. – Томск: ТПУ, 2006.

УДК 621.398

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДОВ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ КЛАСТЕРИЗАЦИИ ДЛЯ ПОИСКА ПРЕЦЕДЕНТОВ*

***Фомина М.В.**, к.т.н.*
e-mail: m_fomina2000@mail.ru
Щербакова В.Н.
*e-mail: tory.*sh*@bk.ru*
ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»

1. ВВЕДЕНИЕ

Современное развитие интеллектуальных систем тесно связано с разработкой интеллектуальных систем поддержки принятия решений реального времени, ИСППР РВ, ориентированных на открытые и динамические предметные области [1, 2]. При этом широко используются такие методы искусственного интеллекта, как правдоподобный вывод и индуктивное формирование понятий.

Одним из методов принятия решений в экспертных системах является вывод на основе прецедентов, или Case Based Reasoning (CBR). Это подход, основанный на использовании и адаптации решения уже известной задачи, для поиска решения новой, неизвестной задачи. Таким образом уже накопленный опыт решения подобных задач используется при поиске решения новых проблем. В основе CBR лежит вывод по аналогии: при поиске решения выполняется поиск и анализ решений, которые были приняты в аналогичных ситуациях в прошлом. Разумеется, такие выводы не являются достоверными и требуют верификации. Проверка корректности умозаключения может являться частью CBR-процесса.

2. CBR ПОДХОД

С точки зрения решения задач, ***рассуждения по прецедентам*** – это метод получения решения путем поиска подобных проблемных ситуаций в памяти, хранящей прошлый опыт решения аналогичных задач, и адаптации найденных решений к новым условиям.

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, гранты №18-29-03088 мк, № 20-57-00015 Бел_а

Рассмотрим основные *преимущества* CBR – подхода.

Прежде всего это легкость приобретения знаний по сравнению с продукционными системами. Создание системы, основанной на правилах, требует таких этапов, как формализация и обобщение экспертных знаний, верификация системы на корректность и полноту. В CBR-системах приобретение знаний происходит путем формального описания случаев из практики.

Следует отметить как возможность работы в предметных областях, которые невозможно полностью понять, объяснить или смоделировать, так и возможность обучения в процессе работы.

Решение может быть получено путем модификации прецедентов, что позволяет уменьшить объем вычислений в сложных предметных областях.

Отметим *недостатки* CBR – подхода.

Метод применим только в областях, где выполняется принцип регулярности и имеет место повторяемость видов задач. Если все время решаются принципиально новые задачи или если решения сходных задач различны, то CBR-метод неприемлем.

Хранение знаний (опыта) без обобщения некомпактно.

Процесс поиска подобных случаев и адаптации решения достаточно сложен.

Одной из проблем, связанных с использованием CBR – подхода, является организация базы прецедентов, основными чертами которой будут наличие удобных средств поиска аналогов среди имеющихся примеров. С этой целью в работе предлагается использовать алгоритмы обобщения совместно с алгоритмами кластеризации множества прецедентов, хранящихся в базе прецедентов [3].

3. МЕТОД ПОИСКА ПРЕЦЕДЕНТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДЕРЕВЬЕВ РЕШЕНИЙ

Достаточно часто для представления прецедентов можно использовать простое параметрическое представление, в этом случае прецедент задан в виде набора параметров с конкретными значениями. С таким набором параметров связано решение, в котором содержится диагноз и рекомендации для лица, принимающего решения (ЛПР): CASE(x_1,…, x_n, R), где x_1, … , x_n – это параметры ситуации, связанной с данным прецедентом; $x_1 \in DOM(x_1)$,…, $x_n \in DOM(x_n)$, n – количество параметров прецедента, $DOM(x_1)$,…, $DOM(x_n)$ – области допустимых значений соответствующих параметров, R – решение и рекомендации ЛПР. Кроме того, в описании прецедента может быть дан результат применения найденного решения и дополнительные комментарии [4].

Выбор конкретного решения из базы прецедентов (БП) выполняется по следующему правилу: среди множества прецедентов, хранящихся в базе прецедентов, ищется пример, наиболее близкий к представленному. Мерой близости является расстояние между векторами параметров $<x_1, x_2, \ldots, x_n>$ прецедента, хранящегося в БП, и предъявленного прецедента, для которого необходимо найти решение. Однако, часто точно определить ближайший к предъявленному прецедент на основе сравнения векторов числовых параметров очень сложно. В случае, когда для описания ситуации используются не только количественные, но и качественные признаки, одним из подходов к поиску решения может стать использование алгоритма построения дерева решений, который является одним из наиболее успешных в задачах обобщения [4].

Наиболее известными методами построения деревьев решений являются методы и алгоритмы ID3, C4.5 [5, 6].

Алгоритм ID3 (Induction of Decision Trees, разработан Р. Куинланом) формирует решающие деревья на основе примеров, представленных в обучающей выборке [5]. Алгоритм C4.5 [6] представляет собой усовершенствованный вариант алгоритма ID3. Алгоритм С 4.5 позволяет работать не только с качественными атрибутами, но также с числовыми; также после построения дерева происходит усечение его ветвей.

Для работы с реальной БД, имеющей большой размер, построение дерева решений может потребовать много времени, но, когда дерево решений окончательно сформировано, классификация новых прецедентов выполняется быстро. Из-за большого объёма БП построенное дерево может быть громоздким, а при его сокращении неизбежно теряется часть информации, описывающей прецедент. Предлагается использовать процедуру предварительной обработки прецедентов в БП по следующему принципу.

Предварительная кластеризация. Предварительная кластеризация объектов осуществляется на основании анализа данных и получения групп схожих объектов. Разбиение на кластеры может выполняться с помощью одного из метрических алгоритмов, таких, как *k*-means, c-means и другие [7, 8]. При этом результатом разбиения должно быть множество кластеров, соизмеримое с количеством решений, представленных в БП. При использовании таких алгоритмов кластеризации, разбиение объектов на кластеры (не менее двух) выполняется итерационно. Признаком завершения работы алгоритма является стабилизация полученного разбиения. [9]

Построение решающих деревьев. Пусть на предыдущем этапе были построены кластеры $M_1, M_2, \ldots, M_p$. Каждый кластер M_i $(i = 1, p)$ представляет собой группу компактно расположенных объектов (при этом возможно, что для некоторых прецедентов, вошедших в кластер, были приняты различные решения R). Построим обучающую выборку $K=K^+ \cup K^-$ где $K^+ \subseteq M_i$ и $K^- \subseteq M_j$ $i \neq j$. При появлении нового прецедента, отсутствующего в базе прецедентов, решающее дерево $Tree_i$, построенное на основе обучающей выборки K, используется для принятия решения R. В результате выполнения данного этапа будет получено множество

$\boldsymbol{TR} = \{ Tree_1, Tree_2, \ldots, Tree_p \}$ деревьев решений. Для построения деревьев решений предлагается использовать алгоритм С 4.5.

Извлечение прецедентов. Каждое дерево решений из ***TR***, построенное алгоритмом С4.5, представляет собой классификатор, который применяется для прецедентов конкретного кластера. Поиск в БП прецедента, наиболее близкого к новой ситуации, выполняется следующим образом. Новая ситуация относится к конкретному кластеру на основании максимальной близости к его центру. Когда кластер определён, дальнейшее решение уточняется с помощью дерева решений, связанного с кластером. В результате будут выбраны прецеденты, приписанные конечной вершине (листу) дерева решений.

4. АЛГОРИТМЫ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ КЛАСТЕРИЗАЦИИ БАЗЫ ПРЕЦЕДЕНТОВ

Исходными данными для работы алгоритмов кластеризации является выборка $\tilde{X}$, которая содержит прецеденты X из БП ($X \in \tilde{X}$, $X = < x_1, \ldots, x_n >$). Объекты этой выборки следует разделить на классы, число и характеристики которых могут быть заранее неизвестны.

В работе сравнивались два алгоритма кластеризации – алгоритм MAXMIN и алгоритм *k*-means (*k*-средних). Оба алгоритма являются итерационными, разделение исходного набора объектов на классы выполняется до тех пор, пока сформированные кластеры не стабилизируются.

Рассмотрим основные особенности данных алгоритмов.

Алгоритм MAXMIN основан на понятии порогового расстояния и подробно описан в [9, 10]. Этот алгоритм кластеризации оттносит каждый объект к одному из классов на основе критерия минимального расстояния от точек-прототипов этих классов (в качестве точек-прототипов первоначально выбираются прецеденты, для которых были приняты различные решения R). В алгоритме MAXMIN окончательным считается разбиение, для которого в каждом классе расстояние от

точки-прототипа до всех объектов этого класса не превышает финального значения порога T.

Отметим основные особенности использования алгоритма кластеризации для работы с прецедентами. В качестве вектора X используется только вектор параметров, описывающих ситуацию. Решение R на этом этапе не рассматривается. Числовые параметры, описывающие ситуацию, могут иметь различную природу, поэтому требуется предварительная нормализация. Для качественных параметров при вычислении расстояния между двумя векторами используются два значения: 0 при полном совпадении, и 1 при несовпадении качественных значений [11].

Важным моментом является также проблема выбора для кластеризации наиболее информативных параметров (признаков) ситуации, описанная в [10].

Характерной чертой алгоритма k средних является заранее определённое число кластеров, на которые надо разделить обучающую выборку. В такой ситуации первоначально выбираются k точек-прототипов, формируются k классов, которые итерационно уточняются. Признаком окончания работы алгоритма здесь будет совпадение разбиений на классы на двух последовательных итерациях. В окончательном разбиении каждый объект из $\widetilde{X}$ должен оказаться ближе к «центру», то есть к прототипу своего класса, чем к прототипу любого другого класса [7, 9]. При проведении эксперимента на различных наборах данных значение k (искомое число кластеров) выбиралось равным (либо кратным) числу классов различных решений, представленных в БП. Так, если все прецеденты в БП относятся к трём возможным классам, значение k выбиралось равным 3 или 6.

5. СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ КЛАСТЕРИЗАЦИИ

Целью программного моделирования изложенных выше методов и алгоритмов было установление того, как предварительная кластеризация БП влияет на точность классификации новых прецедентов и на время выбора наилучшего прецедента (группы прецедентов), наиболее сходного с предъявленным описанием новой, ранее неизвестной ситуации. Для эксперимента были использованы данные из репозитория Калифорнийского университета UCI Repository of Machine Learning Datasets [12].

Перечислим наборы из [12], которые были использованы: AustralianCreditApproval, Fertility, Glass, Heart, Iris, Tic-Tac-Toe, Zoo, Lymphography, UserKnowledgeModeling и другие. Каждый набор

данных рассматривался как база прецедентов, где каждый пример, заданный набором значений признаков, описывает прецедент. Атрибут Class определяет решение *R*, связанное с прецедентом.

Основные этапы эксперимента приведены ниже. На этапе *обучения* C 4.5 был выбран в качестве базового алгоритма. На основе этого алгоритма:

- строилось дерево решений на полной обучающей выборке;
- в алгоритме кластеризации использовались только 2 атрибута, имеющие наибольшую оценку информативности;
- на обучающей выборке формировались кластеры одним из двух методов кластеризации;
- для каждого кластера отдельно было построено дерево решений для классификации примеров.

Выбор ограниченного числа атрибутов для кластеризации БП позволяет избежать образования большого числа (свыше 10) мелких кластеров.

На этапе *тестирования*:

- для прецедента из тестового набора данных находится ближайший кластер;
- если все примеры кластера принадлежат одному классу, решение принимается сразу;
- если прецеденты, вошедшие в кластер, могут принадлежать разным классам, для окончательного решения используется дерево решений, связанное с таким кластером.

Ниже представлена таблица 1, отражающая результаты тестирования.

Главным критерием здесь является точность классификации тестовых примеров. Жирным шрифтом в каждой строке таблицы выделен лучший результат. Из таблицы 1 видно, что не всегда предварительная кластеризация позволяет получить выигрыш за счёт повышения точности классификации. Мы видим, что использование классификатора в виде нескольких деревьев решений позволяет в некоторых случаях повысить точность классификации (например, наборы данных Fertility, Glass, Iris). Для других наборов данных (таких, как Zoo, Lymphography) наблюдалось незначительное снижение точности классификации.

Второй важной характеристикой при поиске подходящего прецедента является скорость принятия решения. Дерево решений, построенное на полной обучающей выборке, то есть на всей БП, неизбежно будет громоздким, многоуровневым. При выполнении предварительной кластеризации формируются группы объектов, и для

каждой такой группы может быть построено дерево решений, существенно более короткое. Во многих случаях выбор кластера однозначно определяет принимаемое решение, либо требуются 1-2 дополнительные проверки.

Таблица 1. Точность классификации тестовых примеров (%) алгоритмом C 4.5

Алгоритм Dataset	MAXMIN	*k-means*	No clustering
Fertility	75,76	81,80	66,67
AustralianCreditApproval	70,04	61,67	81,94
Glass	52,86	67,14	65,71
Heart	60,67	64,04	56,18
Iris	91,84	89,80	85,71
Tic-tac-Toe	84,76	80,95	84,29
Zoo	87,88	84,85	90,91
lymphography	64,58	68,75	72,92
UserKnowledgeModeling	77,65	74,12	89,41

Рассмотрим сравнительные характеристики классификационных моделей, полученных с использованием алгоритма C 4.5 без предварительной кластеризации и с кластеризацией. Кластеризация выполнялась алгоритмами MAXMIN и *k*-means на основе наиболее значимых атрибутов. Число построенных деревьев решений при этом совпадает с числом кластеров. При использовании алгоритма C 4.5 без кластеризации строится *единственное* дерево решений. Деревья сравниваются по количеству конечных вершин и по глубине поиска (количество проверок, необходимых для достижения листа).

Для примера приведём результаты эксперимента для набора данных UserKnowledgeModeling. Набор данных User Knowledge Modeling из репозитория [12] включает 258 примеров, характеризующихся 5 атрибутами (параметрами) и принадлежащих одному из 4 решений (классов): 1 – очень низкий (very low), 2 – низкий (low), 3 – средний (middle) и 4 – высокий (high).

Дерево решений, построенное на *полной* обучающей выборке для этого набора данных, имеет 10 конечных вершин; глубина такого дерева составляет 5 уровней. Определение решения *R* потребует пяти проверок условий.

При выполнении предварительной кластеризации набора UserKnowledgeModeling с помощью алгоритма MAXMIN обучающее

множество было разбито на четыре кластера, каждый из которых содержал примеры, наиболее близкие друг к другу. При этом кластеры 1 и 3 содержат примеры, принадлежащие точно двум из четырёх возможных классов. Все примеры, вошедшие в кластер 2, относятся точно к одному классу. В кластер 4 включены примеры трёх различных классов. Соответственно, в половине случаев для принятия решений потребуется только одна проверка условия, в четверти случаев решение принимается без дополнительных проверок. Наибольшее число дополнительных проверок в полученной классификационной модели составит 2.

При выполнении предварительной кластеризации набора UserKnowledgeModeling с помощью алгоритма *k*-means были сформированы 6 кластеров. Из них три кластера содержали примеры точно одного класса. Соответственно, принятие решений для примеров, отнесенных к таким кластерам, не требует дополнительных проверок. Для других трёх кластеров были построены деревья решений глубиной 2. Соответственно, окончательный выбор решения при отнесении примера к такому кластеру был связан с выполнением одной дополнительной проверки условия.

Аналогичные исследования были выполнены для всех выше перечисленных наборов данных. Во всех случаях предварительная кластеризация давала возможность получить более компактные классификационные модели.

Сравнительных характеристики деревьев решений, полученных в двух вариантах предварительной кластеризации, показали, что использование алгоритмов предварительной кластеризации MAXMIN и *k*-means существенно сокращает количество проверок, необходимых для принятия решения (достижения конечной вершины на дереве решений), что обеспечит ускоренный поиск нужного прецедента в БП. При этом следует заметить, что ни один из двух рассмотренных методов предварительной кластеризации не показал полного преимущества перед другим.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложен метод ускорения поиска прецедентов в БП, за счёт предварительной кластеризации примеров и построения системы классификаторов в виде множества деревьев решений. Результаты программного эксперимента показали, что использование предварительной кластеризации позволяет повысить скорость выбора прецедента в Базе Прецедентов. Два рассмотренных метода кластеризации показали примерно равные возможности по разделению

обучающих выборок на кластеры. В то же время следует отметить, что алгоритм MAXMIN является более гибким при определении оптимального количества кластеров, чем алгоритм *k*-means**.**

Литература

6. Eremeev A., Varshavskiy P. Case-based reasoning method for real-time expert diagnostics systems. // International Journal “Information Theories & Applications”, 2008, Volume 15, Number 2, pp. 119-125
7. Варшавский П.Р., Еремеев А.П. Методы правдоподобных рассуждений на основе аналогий и прецедентов для интеллектуальных систем поддержки принятия решений// Новости искусственного интеллекта. – 2006. – №3. – С. 39-62.
8. Shankar K. Pal, Simon C. K. Shiu. *Foundations of Soft Case-Based Reasoning*. New Jersey: Wiley, 2004, ISBN: 978-0-471-64466-8.
9. Варшавский П.Р., Еремеев А.П. Моделирование рассуждений на основе прецедентов в интеллектуальных системах поддержки принятия решений // Искусственный интеллект и принятие решений. 2009. № 2. С. 45-47
10. Quinlan J.R.: Induction of Decision Trees. Machine Learning **1,** 81-106, 1986
11. Quinlan J.R.: Improved Use of Continuous Attributes in C 4.5. Journal of Artifical Intelligence Research 4, pp.77-90, 1996
12. Loohach R., Garg K. Effect of distance functions on simple k-means clustering problem // International J. of Computer Applications. 2012. V.49, № 6. pp 7-9
13. Pal N.R., Bezdek J.C. On cluster validity for the fuzzy c-means model // IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 1995. V.3, №3. P.370-379
14. Вагин В.Н., Головина Е.Ю., Загорянская А.А., Фомина М.В. Достоверный и правдоподобный вывод в интеллектуальных системах / Под ред. В.Н. Вагина, Д.А. Поспелова. 2-е издание дополненное и исправленное. – М.: Физматлит, 2008. – 712 с.
15. I.I. Astahova, M.V. Fomina and V.N.Shcherbakova Development of Precedents Searching Methods Based on Decision Trees/ Fuzzy Technologies in the Industry – FTI 2018 Proceedings of the II International Scientific and Practical Conference “Fuzzy Technologies in the Industry – FTI 2018” Ulyanovsk, Russia, October 23-25, Vol-2258 2018.
16. Zagoruiko N.G. Methods of recognition based on the function of rival similarity // Pattern recognition and image analysis. 2008. V.18, №1. P. 1-6.
17. C.J. Merz, P.M. Murphy. UCI Repository of Machine Learning Datasets. // Information and Computer Science University of California,” 1998. [Online]. Available: http://archive.ics.uci.edu/ml/.

СЕКЦИЯ 4 | **МЯГКИЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ, ИЗМЕРЕНИЯ И ОЦЕНКИ**

УДК 004.853; 004.855.5

МЕТОД МЯГКОЙ ОЦЕНКИ ДИНАМИКИ МЫСЛИТЕЛЬНОЙ АКТИВНОСТИ ОБУЧАЕМОГО

Филатова Н.Н., *д.т.н.*
e-mail: nfilatova99@mail.ru
Бодрина Н.И.*, к.т.н.*
e-mail: vavilovani@mail.ru
Сидоров К.В.*, к.т.н.*
e-mail: bmisidorov@mail.ru
Воронков М.Е.
e-mail: dzharman@rambler.ru
Клюев П.Д.
e-mail: paul.kluev@gmail.com
ТвГТУ

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время проявляется большой интерес к работам, связанным с косвенным управлением мыслительной активностью обучаемого, путем искусственной стимуляции эмоциональных реакций в продолжении некоторого интервала времени.

Так как обучение проводится дистанционно или самостоятельно с привлечением электронных средств, то вопросы повышения эффективности процессов, связанных с когнитивной активностью обучаемого, приобретают большое значение [1-4]. Влиять на эти процессы без привлечения медикоментозных средств можно с

помощью изменения эмоционального состояния обучаемого. Методики стимуляции эмоций с помощью внешних информационных стимулов достаточно хорошо разработаны. Однако остались не ясными вопросы динамики процесса изменения когнитивной активности после эмоциогенной стимуляции, а также продолжительность повышенного уровня мыслительной активности, который устанавливается после эмоциогенной стимуляции. На эти вопросы мы хотим ответить в этом докладе.

Так как реакция испытуемого на эмоциогенный стимул в каждый момент времени может быть различной, а факторов, влияющих на этот процесс слишком много, то в качестве математического аппарата для описания модели динамики когнитивной активности выбрана теория лингвистических перемнных и нечетких множеств. Это дает возможность создавать модели и алгоритмы управления мыслительной активностью с индивидуальной настройкой.

2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для проведения эксперимента была задействована многоканальная биотехническая система «EEG-Speech+» [9]. Регистрация сигнала ЭЭГ проводилась с использованием электроэнцефалографа «Энцефалан-131-03» по 19 отведениям согласно системе «10-20» с частотой дискретизации 250 Гц. В ходе всего эксперимента велась запись протокола: фиксировались временные отметки событий и все ответы испытуемого.

В экспериментах приняли участие мужчины в возрасте 20-25 лет. Все испытания проводились днём, в комфортной среде, в тихом помещении.

До начала эксперимента испытуемый проходил краткий инструктаж. Дальнейший сценарий эксперимента предполагал выполнение испытуемым блоков когнитивных заданий постоянного объёма и сложности, которые раздены эмоциогенными стимулами различной длительности (рис.1). В качестве когнитивных заданий мы использовали однородные вычислительные операции – умножение двузначного числа на однозначное.

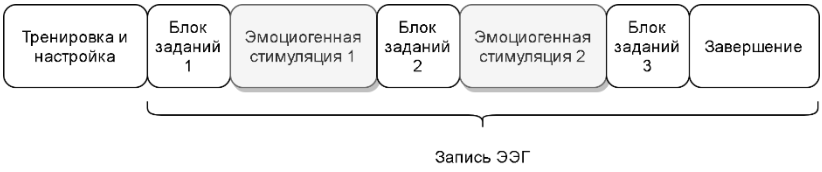


Рис.1. Сценарий эксперимента

На предварительном этапе эксперимента «Тренировка и настройка» испытуемый привыкал к работе, знакомился с заданиями, выбирал для себя стратегию их выполнения. На этом этапе производилась установка электродов, контроль кожного импеданса и общая насторойка канала ЭЭГ для записи.

Этапы с заданиями 1, 2 и 3 были одинаковыми по объёму (по 100 заданий). Задания выводились на экран группами по 10 штук. Испытуемый решал их последовательно и вслух объявлял ответ. К следующему заданию разрешалось переходить после верного ответа. Пропуски заданий были запрещены, время и количество попыток не ограничивались. В ходе выполнения блоков заданий в протоколе эксперимента фиксировались временные отсечки, а также правильность ответов испытуемого [8].

Дважды во время эксперимента между блоками заданий выполнялась эмоциогенная стимуляция. Каждый стимул представлял собой один видеоролик без звука, который предъявлялся испытуемому на экране вместо заданий. Первая стимуляция эмоций длилась 5 минут, вторая – 10 минут. В ходе планирования эксперимента испытуемого опрашивали и подготовили стимулы в соответствии с результатами опроса: тематика стимулов была подобрана так, чтобы вызвать у испытуемого слабые отрицательные эмоции.

На завершающем этапе эксперимента выполнялась запись ЭЭГ в состоянии спокойного бодрствования с открытыми и закрытыми глазами. После эксперимента испытуемый проходил опрос: оценивал свой уровень усталости на протяжении эксперимента и подтверждал наступление эмоциональной реакции на стимулы.

Из каждой записи ЭЭГ были получены 100 безартефактных фрагментов длительностью по 4 секунды. С каждого этапа эксперимента выделено от 3 до 30 фрагментов (в зависисмости от продолжительности этапа).

3. ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ДИНАМИКИ КОГНИТИВНОЙ АКТИВНОСТИ ПОСЛЕ ЭМОЦИОГЕННОЙ СТИМУЛЯЦИИ

Анализ результатов мониторинга ЭЭГ-сигналов при выполнении испытуемым указанных выше блоков вычислительных задач, (а также при восприятии видеофрагментов, вызывающих эмоциональные реакции) позволил выделить отведения с наиболее сильными реакциями на указанные раздражители. Были сформированы группы, объединяющих электроды лобных отведений, центральных и теменных. При выборе электродов мы учитывали также информацию о точках

локализации электродов в работах с технологией tDCS, посвященных стимуляции памяти. Учитывая большое количество артефактов в ЭЭГ-сигналах, регистрируемых в лобных отведениях, для иллюстрации динамики когнитивной активности наиболее информативными оказываются электроды C4-O2, C3-O1, Cz-O2 (центральные) и P4-O2, P3-O1, Pz-O2 (теменные).

Как мы указывали в более ранних работах [5, 6] для иллюстрации изменений в ЭЭГ-сигналах можно использовать спектральные характеристики, а также характеристики аттракторов, реконструированных по сигналам в каждом отведении. Применение совокупности показателей из этих групп приводит к неоднородному базису в задаче анализа ЭЭГ [10]. Это с одной стороны усложняет процедуру анализа, а с другой – увеличивает временные затраты на оценки характеристик ЭЭГ.

При анализе динамики когнитивных процессов, связанных с выполнением однотипных вычислительных операций, для формирования вектора оценок характеристик ЭЭГ мы использовали однородный базис. В качетсве базовой характеристики использована плотность точек аттрактора в окрестностях начала координат [7]. Для оценки этого свойства проекция аттрактора покрывалась сеткой с фиксированным размером ячеек. Определялось число точек аттрактора, попавшие в каждую клетку сетки. Для оценки степени концентрации точек аттрактора определялась сумма точек в четырех центральных ячейках сетки. Этот показатель, определяющий плотность (ν) траекторий аттрактора в близи начала координат, рассчитывался для каждого фрагмента ЭЭГ-сигнала. Продолжительность всех фрагментов одинаковая и равна 1000 отсчетов.

На рис.2 приведена диаграмма изменений этой характеристики для отведений P4-O2 и C4-O2 в процессе всего эксперимента.

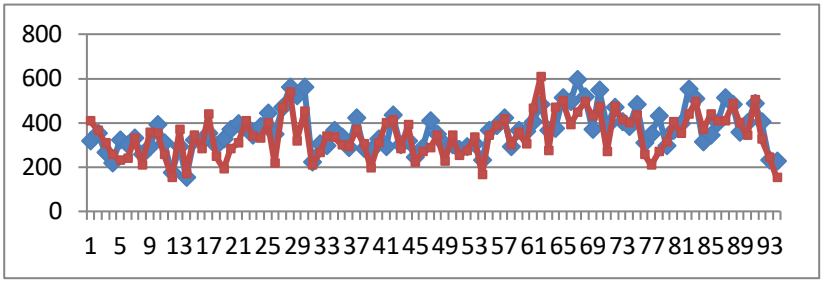


Рис.2. Изменение плотности аттрактора, реконструированного по ЭЭГ-сигналам в отведениях P4-O2 и C4-O2

Скользящее расчетное окно позволило несколько сгладить временные ряды {ν} для выделенных отведений:

$$\nu_{ij} = (\nu_{i-1,j} + \nu_{ij} + \nu_{i+1,j}) / m, \qquad i = \overline{1, p}, \qquad j = \overline{1, m} \qquad (1)$$

где p – число фрагментов в экспериментальной выборке по рассматриваемому отведению; m – число усредняемых отведений.

Объединялись по (1) близкие по уровню ЭЭГ-сигналов отведения: m=3, j=1 для отведения P4-O2, j=2 для отведения C4-O2 и j=3 для отведения Cz-O2, т.е. отведения близкие к затылочным.

Это позволило более наглядно иллюстрировать тренд этих характеристик. На рис.3 приведен график изменения плотности (ν) для отвдения P4-O2 на протяжении всего эксперимента. Для всех этапов эксперимента рассчитаны средние значения этой характеристики (ν).

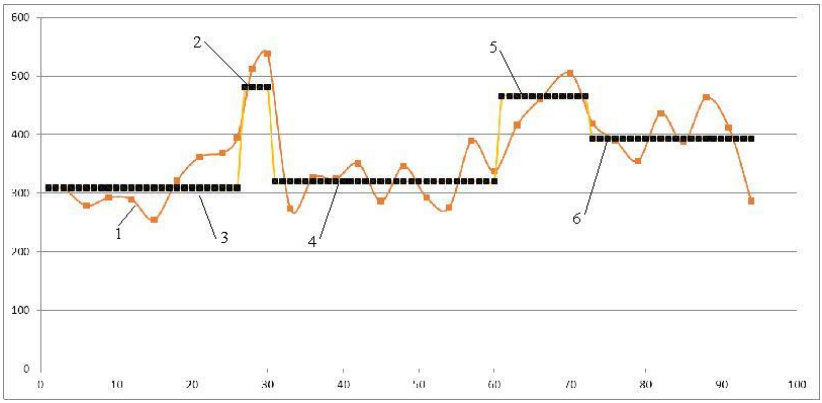


Рис.3. Изменение центральной плотности аттрактора, реконструированного по ЭЭГ-сигналам в отведении P4-O2: 3 – участок до стимуляции, 2 – первая стимуляция, 4 – участок после первой стимуляции, 5 – вторая стимуляция, 6 – участок после второй стимуляции

При анализе результатов экспериментов для оценки значений характеристики аттрактора (плотность точек в центре проекции) мы использовали нечеткие числа. Переход к этому аппарату связан с точностью регистрации сигналов ЭЭГ, а также с ошибками и округлением расчетных значений при формировании фазового портрета и матрицы плотности. В дальнейшем оценку (ν_{ij}) будем рассматривать как нормальное, выпуклое нечеткое число.

Тогда график изменения центральной плотности аттрактора для каждого отведения примет вид полосы с верхней и нижней границами этих чисел (рис.4).

Приведенные диаграммы (рис.3, рис.4) наглядно иллюстрируют влияние длительности стимуляции на уровень (ν) и, следовательно, на уровень когнитивной активности. Средняя плотность на последнем (6) этапе (следовательно, и когнитивная активность) на 23% больше этой оценки после первой стимуляции (этап 4), продолжительность которой на 40% меньше, чем второй.

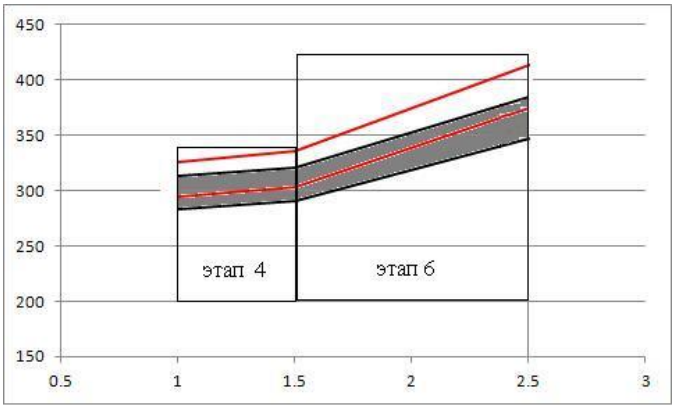


Рис.4. Изменение центральной плотности аттрактора после первой стимуляции (этап 4) и после второй стимуляции (этап 6): красные линии – для отведения P4, черные – для отведения C4

4. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕЧЕТКИХ МНОЖЕСТВ ДЛЯ ОПИСАНИЯ МОДЕЛИ ДИНАМИКИ КА

Как показано в работе [5] для отображения динамики определенного вида когнитивной активности можно использовать некоторую совокупность характеристик ЭЭГ-сигналов ($X(t)$):

$$\bigcup_{j=1}^{m} X_j(t) => \bigcup_{i=1}^{r} \Phi_i(t) => K(A) \qquad (2)$$

где r – число характеристик, m- число фрагментов ЭЭГ-сигналов.

Характеристика $\Phi_i(t)$ включается в состав модели, если при изменении когнитивной активности она изменяется в том же направлении. Учитывая размерность электроэнцефалограммы для построения вектора $\Phi(t)$ надо использовать 6 групп характеристик. Тогда для построения модели, иллюстрирующей динамику

когнитивной активности, и использовании однородного базиса получаем:

- f_1 – центральная плотность аттрактора, реконструированного по ЭЭГ-сигналу в отведении Cz,
- f_2 – центральная плотность аттрактора, реконструированного по ЭЭГ-сигналу в отведении P4,
- и т.д. f_3, f_4, f_5, f_6 – центральная плотность аттрактора, реконструированного по ЭЭГ-сигналу в отведении P3, C4, C3, Pz соответственно.

Сравнение этих характеристик на всех этапах эксперимента иллюстрирует близкие значения в отдельных группах.

Для построения модели динамики усредняем характеристики, найденные по отведениям P4-O2, C4-O2, Cz-O2, т.к. оценки (f_i) представлены нечеткими числами, используются формулы для операций с нечеткими числами.

Для каждого признака (f_i) формируется соответствующая лингвистическая переменная ($ЛП_i$) и определяются нечеткие множества возможных значений.

- [*y1*:: *ЛП1*] – лингвистическая переменная «плотность в центре аттрактора, реконструированного по ЭЭГ-сигналу в отведении Pz»;
- [*y2*:: *ЛП2*] – лингвистическая переменная «плотность в центре аттрактора, реконструированного по ЭЭГ-сигналу в отведении P4»;
- [*y3*, *y4*, *y5*, *y6*:: *ЛП3*, *ЛП4*, *ЛП5*, *ЛП6*] – аналогичные лингвистические переменные «плотность в центре аттрактора», реконструированного по ЭЭГ-сигналу в отведениях P3, Cz, C4, C3.

Взаимосвязь значений базовых переменных (f_i) и соответствующих им значений лингвистических переменных ($ЛП_i$) выполняется с помощью специально построенных функций принадлежностей (ФП), отражающих мнения экспертов и результаты исследований (рис.5).

На рис.5 показан переход от расчетных оценок признаков (v_{ij}) к соответствующим нечетким числам ($\tilde{v}_{ij}$), а затем к значениям лингвистической переменной.

Для построения модели когнитивной активности в работе [10] было предложено использовать лингвистические переменные, характеризующие отдельные характеристики аттракторов, реконструированных по ЭЭГ-сигналам:

$$МКА = <\{y_i, \{TPr1\_j\}, \mu(TPri), i=1,..,6\}>, \quad (6)$$

где $\{TPri\_j\}$ – терм-множество для оценки признака y_i («малый» y_1, «средний» y_2, «выше среднего» y_3, «большой» y_4); $j = 1 \div 4$; μ(TPri) –

функции принадлежности нечетких подмножеств универсального множества оценок Pri.

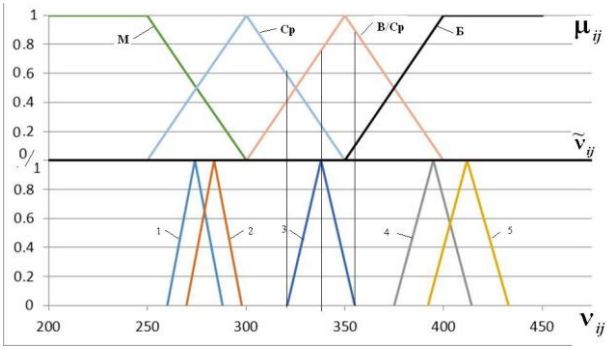


Рис.5. Средние оценки ($\tilde{\nu}_{ij}$) для отдельных этапов: 1- до первой стимуляции, 2 – после первой стимуляции, 3- после второй стимуляции, 4, 5 – первая и вторая стимуляции

Модель (6) настраивается на образцы произвольной длительности с помощью ограничений на универсальное множество оценок признака, характеризующее центральную плотность аттрактора, реконструированного по ЭЭГ-сигналу.

Для описания динамических изменений модель (6) дополнена двумя новыми признаками, характеризующими изменения когнитивной активности во времени. Для оценки этих свойств введены два коэффициента $(\tilde{k}1, \tilde{k}2)$.

Коэффициент $(\tilde{k}1)$ характеризует направление изменения характеристики ($\tilde{\nu}(t)$), а коэффициент $(\tilde{k}2)$ скорость изменения плотности. Оценки коэффициентов определяются по формулам:

$$\tilde{k}1 = \frac{\tilde{del}_{i+1}}{\tilde{del}_i}, \qquad \tilde{del}_i = \tilde{\nu}_{i,j} - \tilde{\nu}_{i-1,j} \tag{7}$$

$$\tilde{k}2 = \tilde{del}_i * \tilde{del}_{i+1} \tag{8}$$

где: $\tilde{del}_i$ – характеризует изменение плотности при переходе от (i-1)-ого этапа измерений к (i)-ому, j- номер отведения при измерении ЭЭГ-сигналов.

Составленные правила позволяют определять принадлежность описания паттернов ЭЭГ-сигналов классам когнитивной активности человека: «низкая активность» (*L1*), «средняя активность» (*L2*) и «активность выше средней» (*L3*). «высокая активность» (*L4*) [10], а также динамику изменения когнитивной активности при переходе с текущего этапа

наблюдений на следующий (таблица 1). Правила формируются по следующему шаблону:

Если «пред_условия», то (*t_r*: лингвистическое высказывание, интерпретирующее ситуацию».

Таблица 1. Предусловия правил

ЕСЛИ (предусловия),				То
$\tilde{d}el_{i-1}$	$\tilde{d}el_i$	$\tilde{k}1$	$\tilde{k}2$	t_r
… > 0	… > 0	… > 1	… > 0	t_1
… < 0	… < 0	… > 1	… > 0	t_2
… > 0	… < 0	… < -1	… < 0	t_3
… > 0	… < 0	… < 1	… > 0	t_4

В таблице 2 приведен фрагмент множества высказываний *{t_r}*, используемых в качестве заключения в правилах интерпретации КА.

Таблица 2. Заключения правил

t_r	Интерпретация ситуации
t_1	Когнитивная активность (КА) на соседних интервалах мониторинга изменяется в одном направлении – возрастает
t_2	Когнитивная активность (КА) на соседних интервалах мониторинга изменяется в одном направлении – убывает
t_3	Когнитивная активность (КА) на соседних интервалах мониторинга изменяется в разных направлениях: на (*i*-1)-ом интервале возрастает, на (*i*)-ом интервале убывает
t_4	Когнитивная активность (КА) на соседних интервалах мониторинга изменяется в одном направлении – возрастает, но на *i*-ом интервале скорость возрастания меньше, чем на (*i*-1)-ом

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Созданные на основе рассмотренных соотношений алгоритмы позволяют обрабатывать последовательность паттернов ЭЭГ-сигналов, зарегистрированных со сдвигом во времени ($(t_2-t_1)>0$) и формировать вербальные заключения о наиболее важных характеристиках когнитивной активности. Дальнейшее направление исследований связано с адаптацией полученных моделей для использования в дистанционных обучающих средах.

Литература

1. Lina Elsherif Ismail, Waldemar Karwowski. Applications of EEG indices for the quantification of human cognitive performance: A systematic review and bibliometric analysis // PLOS ONE December 4. – 2020 https://doi.org/10.1371 journal.pone.0242857
2. Rahman M., Karwowski W., Fafrowicz M., and Hancock P. “Neuroergonomics Applications of Electroencephalography in Physical Activities: A Systematic Review,” // *Front. Hum. Neurosci*. – vol. 13, no. June, – P. 1-21, 2019.
3. A. F. Rabbi et al., «Human Performance Evaluation based on EEG Signal Analysis: A Prospective Review» in In 2009 Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. – 2009. – P. 1879-1882.
4. Borghini G., Astolfi L., Vecchiato G., Mattia D., and Babiloni F., “Measuring neurophysiological signals in aircraft pilots and car drivers for the assessment of mental workload, fatigue and drowsiness,” // *Neurosci.Biobehav. Rev*., vol. 44, –P. 58–75. – 2014. https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2012.10.003 PMID: 23116991
5. Бодрина Н.И., Сидоров К.В., Филатова Н.Н. Модель эмоциогенного стимулятора когнитивной активности //В сборнике: Восемнадцатая Национальная конференция по искусственному интеллекту с международным участием КИИ-2020. Труды конференции. Под ред. В.В. Борисова, О.П. Кузнецова. Москва, 2020. С. 180-187.
6. Филатова Н.Н., Сидоров К.В., Бодрина Н.И., Шемаев П.Д. Изменение свойств временных рядов в процессе когнитивной или эмоциональной активности // В сборнике: Труды Международного научно-технического конгресса "Интеллектуальные системы и информационные технологии – 2019" ("ИС & ИТ-2019", "IS&IT'19"). Научное издание: в 2-х томах. – 2019. – С. 191-198.
7. Филатова Н.Н., Бодрина Н.И., Сидоров К.В., Шемаев П.Д. Управление когнитивной активностью путем эмоциогенной стимуляции // В сборнике: Семнадцатая Национальная конференция по искусственному интеллекту с международным участием. КИИ-2019. Сборник научных трудов: в 2-х томах. – 2019. – С. 240-248.
8. Филатова Н.Н., Сидоров К.В., Бодрина Н.И., Воронков М.Е., Клюев П.С. Мониторинг уровня когнитивной активности обучаемого путем фрагментарного анализа ээг-сигналов // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. – 2019. – Т. 9. – № 4 (33). – С. 8-23.
9. Филатова Н.Н., Сидоров К.В., Шемаев П.Д., Бодрина Н.И., Ребрун И.А. Биотехническая система мониторинга и управления мыслительной активностью с помощью стимуляции эмоций // В сборнике: Нейроинформатика-2018. XX Международная конференция. Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ". – 2018. – С. 231-239.
10. Сидоров К.В., Филатова Н.Н., Шемаев П.Д., Бодрина Н.И. Применение нечетких высказываний для интерпретации влияния эмоций на когнитивную активность человека // Нечеткие системы и мягкие вычисления. – 2018. – Т. 13. – № 2. – С. 147-165.

УДК 004.04

ПРИМЕНЕНИЕ MATLAB ДЛЯ РАБОТЫ С БОЛЬШИМИ ДАННЫМИ НА ПРИМЕРЕ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ ИЗ МИРОВОЙ СЕТИ МАГНИТНЫХ ОБСЕРВАТОРИЙ INTERMAGNET

***Коробейников А.Г.**, д.т.н.*
e-mail: korobeynikov_a_g@mail.ru
СПбФ ИЗМИРАН

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время во всем мире, и, в частности, в России, для работы с большими данными широко применяют развивающуюся технологию Big Data, включающую в себя разнообразный инструментарий, а также различные методы и подходы, применяемые при обработке больших данных при решении различных задач [1].

Инструментарием в данной работу будет система MATLAB, при помощи которой можно решать задачи в различных предметных областях [2-6].

Понятие больших данных не зависит от объема данных. Это связано с экспоненциальным ростом ресурсов компьютеров. Например, на сегодняшний день принято большие данные измерять в терабайтах, а через некороторое время будут измерять в петабайтах. Исходя из этого, в работе под большими данными, понимаются данные, которые не помещаются в память компьютера. Сами данные находятся на сайте https://www.intermagnet.org/imos/imos-list/imos-details-eng.php?iaga_code=SPG. Эти данные получены на входящей в состав СПбФ ИЗМИРАН геомагнитной обсерватории «Санкт-Петербург» (международный IAGA-код SPG), информация из которой поступает в международную сеть ИНТЕРМАГНЕТ (INTERMAGNET – International Real-Time Magnetic Observatory Network) [7].

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В связи с постоянным накоплением данных о геомагнитном поле на геомагнитной обсерватории, развитием технологии Big Data и появлением в MATLAB мощного инструментария для работы с большими данными, встала задача освоения работы с этим инструментарием. Причем необходимо, чтобы обработку и анализ

больших данных мог проводить исследователь, не являющийся высококвалифицированным специалистом в области программирования в системе MATLAB.

3. ПРЕДЛАГАЕМОЕ РЕШЕНИЕ

Для работы с большими данными в представленном ниже тексте показано применение механизма Datastore.

На первом шаге выбираются данные, расположенные на вышеуказанном сайте. В данной работе были выбраны данные за период с 1 января 2020 г. по 31 марта 2012 г. Это текстовые файлы с именами spg20200101qmin.min – spg20210331qmin.min. Найден 441 файл. После этого эти файлы переписываем в директорию, которую предполагаем сделать Current Folder после запуска MATLAB.

Запускаем MATLAB. В последних версиях MATLAB существует очень удобный инструмент под названием «Живой редактор». Для его запуска необходимо перейти на вкладку LIVE EDITOR. После этого набираем команды:

```
clc
clear
Fs=1/60; % Частота дискретизации 1 минута
fileName = 'spg202*.*'; % Имена файлов
files_Datastores = … % Считываем данные в хранилище
fileDatastore(fileName,'ReadFcn',@read_spg_file,'FileExtensions','.min');
SPG_Datastore = readall(files_Datastores);
SPG=[]; % Для удобства работы преобразуем данные в timetable
for k=1 : size(SPG_Datastore,1)
  TT=SPG_Datastore{k};
  TT.DATETIME=datetime(TT.DATETIME,'InputFormat','yyyy-MM-dd
HH:mm:ss.SSS');
  TT=table2timetable(TT);
  TT = removevars(TT,"DOY"); % Удалили столбец с именем DOY
  SPG=[SPG;TT];
end
SPG = sortrows(SPG,"DATETIME");
clearvars TT;
stackedplot(SPG); % Выводим график исходных данных
```

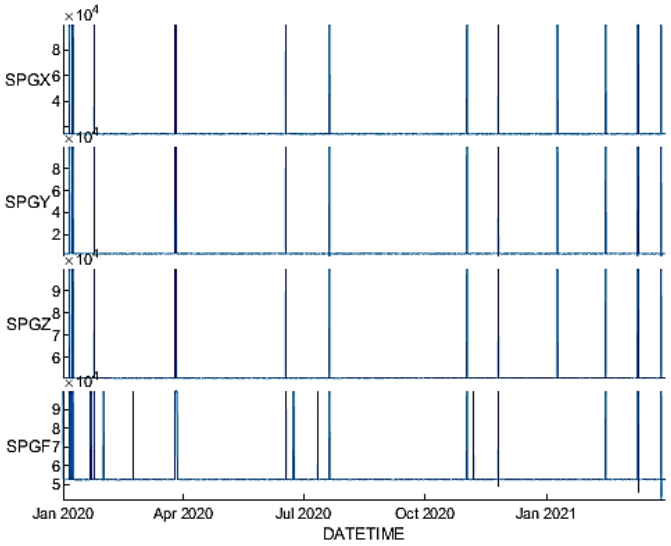


Рис.1. Графики исходных данных

На рис.1 видно, что исходные данные имеют выбросы, появившиеся в силу различных причин. Например, при отключении электричества. Удалим эти выбросы при помощи следующих команд.

```
  SPG{find(SPG.SPGX>0.145*summary(SPG).SPGF.Max), …
["SPGX","SPGY","SPGZ","SPGF"]}=NaN; % Заменяем выбросы
  [SPG,missingIndices1] = fillmissing(SPG,"linear");
  [SPG,outlierIndices] = rmoutliers(SPG,"grubbs",...
    "DataVariables","SPGF");
  [SPG,missingIndices2] = fillmissing(SPG,"linear",...
    "MaxGap",calyears(17),"DataVariables","SPGF");
  clearvars missingIndices1 missingIndices2 outlierIndices;
  % Пропуски заменили линейной интерполяцией
  stackedplot(SPG); % Выводим очищенный график данных
```

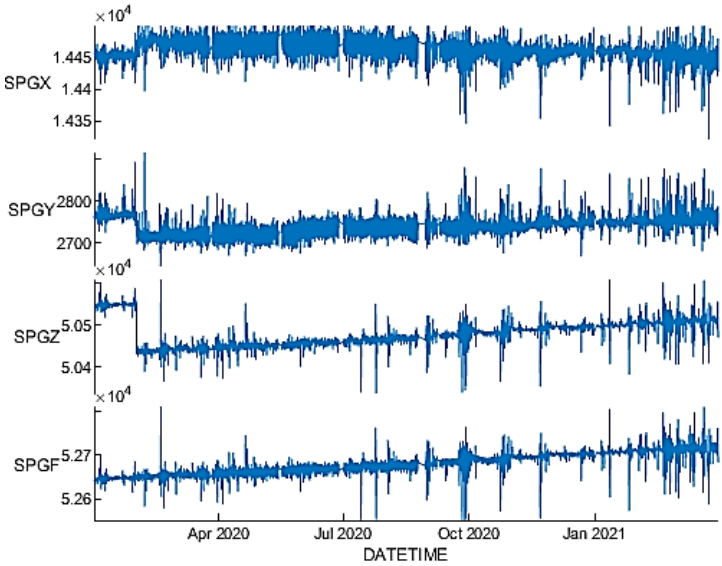


Рис.2. Графики очищенных данных

На рис.2 видно, что в данных отсутствуют выбросы. Дальнейшая работа с данными зависит от поставленной исследователю задаче. Например, можно найти линейные тренды в данных за исследуемый период. Это можно сделать при помощи следующих команд.

```
deg_trend=1; % Тренд – прямая
X_trend=SPG.SPGX-detrend(SPG.SPGX,deg_trend);
Y_trend=SPG.SPGY-detrend(SPG.SPGY,deg_trend);
Z_trend=SPG.SPGZ-detrend(SPG.SPGZ,deg_trend);
F_trend=SPG.SPGF-detrend(SPG.SPGF,deg_trend);
stackedplot(timetable(SPG.DATETIME,X_trend));
% Последовательный вывод графиков X,Y и Z компонент
```

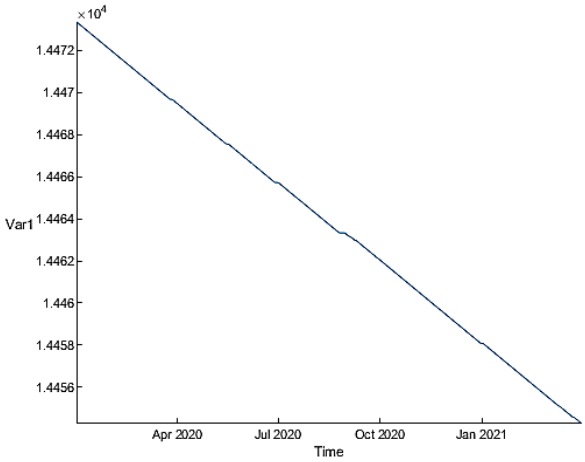


Рис.3. График тренда X – компоненты

```
stackedplot(timetable(SPG.DATETIME,Y_trend));
```

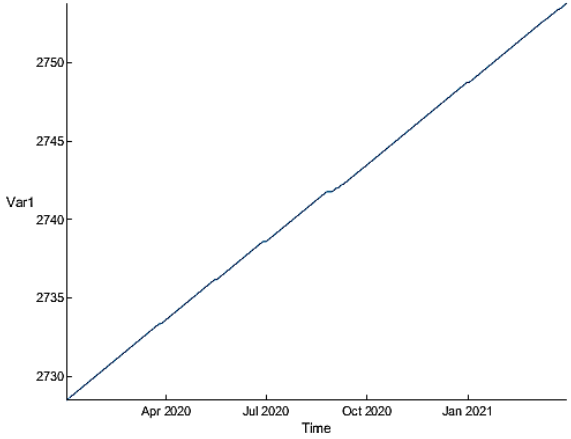


Рис.4. График тренда Y – компоненты

```
stackedplot(timetable(SPG.DATETIME,Z_trend));
```

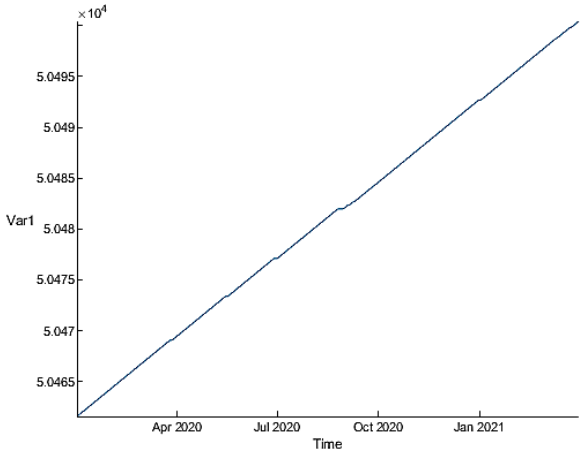


Рис.5. График тренда Z – компоненты

Ниже приведен исходный текст функции чтения файла.

```
  function spg_table = read_spg_file(filename, startRow, endRow)
  if nargin<=2
    startRow = 29;
    endRow = inf;
  end
  formatSpec = '%24s%3f%13f%10f%10f%f%[^\n\r]'; %Формат данных
  fileID = fopen(filename,'r'); % Открытие текстового файла
  dataArray = textscan(fileID, formatSpec, endRow(1)-startRow(1)+1,
'Delimiter', '', 'WhiteSpace', '', 'TextType', 'string', 'HeaderLines',
startRow(1)-1, 'ReturnOnError', false, 'EndOfLine', '\r\n');
  for block=2:length(startRow)
    frewind(fileID);
    dataArrayBlock = textscan(fileID, formatSpec, endRow(block)-
startRow(block)+1, 'Delimiter', '', 'WhiteSpace', '', 'TextType', 'string',
'HeaderLines', startRow(block)-1, 'ReturnOnError', false, 'EndOfLine',
'\r\n');
    for col=1:length(dataArray)
      dataArray{col} = [dataArray{col};dataArrayBlock{col}];
    end
  end
  dataArray{1} = strtrim(dataArray{1});
  fclose(fileID); % Закрытие текстового файла.
  % Создание выходной переменной
```

```
  spg_table = table(dataArray{1:end-1}, 'VariableNames',
{'DATETIME','DOY','SPGX','SPGY','SPGZ','SPGF'});
  end
```

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как видно из представленного исходного текста, MATLAB предоставляет для работы с большими данными достаточно понятный и удобный инструментарий, что позволяет решать различные задачи. Например, представленные на рис.3-рис.5 графики позволяют сделать вывод о существовании перемещения геомагнитного полюса. Для более точного изменения его местоположения необходима дальнейшая работа с данными.

Кроме того, необходимо отметить, что в MATLAB существуют еще инструменты для работы с большими данными. Например, «высокие» массивы (tall array).

Для ускорения расчетов можно использовать параллельные вычисления при помощи worker или графических процессоров.

Литература

1. Макшанов А. В. Большие данные. Big Data : учебник для вузов / А. В. Макшанов, А. Е. Журавлев, Л. Н. Тындыкарь. – Санкт-Петербург : Лань, 2021. – 188 с. ISBN 978-5-8114-6810-2
2. Амос Гилат. MATLAB. Теория и практика. 5-е изд. / Пер. с англ. Смоленцев Н. К. – М.: ДМК Пресс, 2016. – 416 с.: ил. ISBN 978-5-97060-183-9
3. Гришенцев А.Ю., Коробейников А.Г. Разработка модели решения обратной задачи вертикального зондирования ионосферы//Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2011. – № 2 (72). – С. 109-113.
4. Гришенцев А.Ю., Коробейников А.Г. Средства интероперабельности в распределенных геоинформационных системах // Журнал Радиоэлектроники. – № 3. – 2015
5. Гришенцев А.Ю., Коробейников А.Г. Декомпозиция n-мерных цифровых сигналов по базису прямоугольных всплесков//Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2012. – № 4 (80). – С.75-79.
6. Коробейников А.Г., Гришенцев А.Ю., Святкина М.Н. Применение интеллектуальных агентов магнитных измерений для мониторинга объектов железнодорожной инфраструктуры//Кибернетика и программирование. – 2013. – № 3. – С.9-20.
7. Коробейников А.Г. Обработка и анализ данных с российского сегмента мировой сети магнитных обсерваторий ИНТЕРМАГНЕТ //Международный журнал гуманитарных и естественных наук. – 2018. – № 8. – С. 91-98.

УДК 004.896; 681.2.082; 681.518.3

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ПРИ ОБРАБОТКЕ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ДАННЫХ, СВЯЗАННЫХ С ОБНАРУЖЕНИЕМ БЕРЕГОВОГО ЭФФЕКТА В ЕСТЕСТВЕННЫХ ВАРИАЦИЯХ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

***Исмагилов В.С.**, к.физ.-м.н.*
e-mail: ivs@izmiran.spb.ru
***Коробейников А.Г.**, д.т.н.*
e-mail: korobeynikov_a_g@mail.ru
СПбФ ИЗМИРАН

1. ВВЕДЕНИЕ

Береговой эффект в геомагнитных вариациях представляет собой сложное явление, связанное с воздействием геоэлектрической неоднородности в виде моря или океана на поле геомагнитных вариаций и теллурических токов, и проявляющееся на относительно небольшом расстоянии от береговой линии на суше или на море [1]. Первые работы по изучению берегового эффекта были проведены на обсерватории «Мирный» (Антарктида). Было отмечено, что вблизи берега на суше ток направлен под углом 45º к береговой линии, нормальная и вертикальная компоненты магнитного поля характеризуются сильными изменениями. Ток в море поляризован линейно и течет вдоль берега, повторяя конфигурацию последнего [2]. В 70-х гг. XX века появляется ряд работ по изучению берегового эффекта на основе экспериментальных данных геомагнитных обсерваторий и МТЗ. [3]. Во второй половине 60- х гг. для изучения влияния морских токов были выполнены специальные наблюдения сгущенной сетью станций на севере и юге о. Сахалин и о. Итуруп [4]. Анализ выполненных исследований показал, что угасание берегового эффекта при удалении от водной толщи происходит с разной скоростью в разных регионах. Также большой объем экспериментального материала позволил сделать следующие выводы:

Локальные аномальные эффекты, связанные с берегом, затухают на расстоянии в несколько километров. Ввеличина берегового эффекта

зависит от глубины моря, отношения проводимости суши и моря, конфигурации береговой линии. Например, на крымском побережье в 40 км северо-восточнее от г. Черноморска не было обнаружено берегового эффекта в связи с мелководностью моря (максимальная глубина достигала 10 м), низким удельным электрическим сопротивлением суши (2,5-3 Ом·м) и прямолинейностью береговой линии. Тогда как на южном берегу Крыма, характеризующимся высокой скоростью нарастания глубины моря и высокоомным разрезом суши, береговой эффект был отчетливо выражен [5].

Поскольку в геомагнитных вариациях береговой эффект наблюдается, в вариациях электрического поля этот эффект также должен присутствовать. Однако никаких исследований в этом направлении не было сделано, что, вероятнт связано с трудностями исследований электрического поля в прибрежных зонах, приводящих к большим погрешностям при применении магнтотеллурического метода.

Чтобы закрыть этот пробел нами были проведены исследование УНЧ вариаций электрического и магнитного поля в прибрежных зонах Белого (п. Умба), Баренцева (п. Териберка), Охотского моря (Сахалин) и Тихого океана (Камчатка). Проведено 2 многоэлектродных эксперимента в п. Умба и на Камчатке. Регистрация данных во всех экспериментах выполнялась геофизическими станциями GI-MTS-1, расположенными непосредственно на берегу и в точке удаленной на 160 м от берега в лесном массиве. В состав каждой станции входили 3 трехкомпонентных магнитных датчика (Bx, By, Bz) торсионного типа и две горизонтальные теллурические линии длиной ~50 м (Ex, Ey). Ex компонента была направлена ортогонально берегу, Ey компонента – вдоль берега. Регистрируемые данные записывались на флэш-карту с дискретностью 50 Гц. Среднеквадратическая чувствительность магнитных датчиков составляла 2 пТл на частоте 1 Гц, чувствительность электрических датчиков – 0.1 мкВ/м.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

В ходе обработки эксперимeтальных данных, с использованием методов теории искусственного интеллекта и глубокого обучения, системы MFTLAB, был обнаружен «береговой эффект» в величине переменного электрического поля. Результаты представлены ниже на различных графиках [6, 7].

На рис.1 представлены вариации электрического (горизонтальные компоненты Ex и Ey) и магнитного поля типа Pc1.

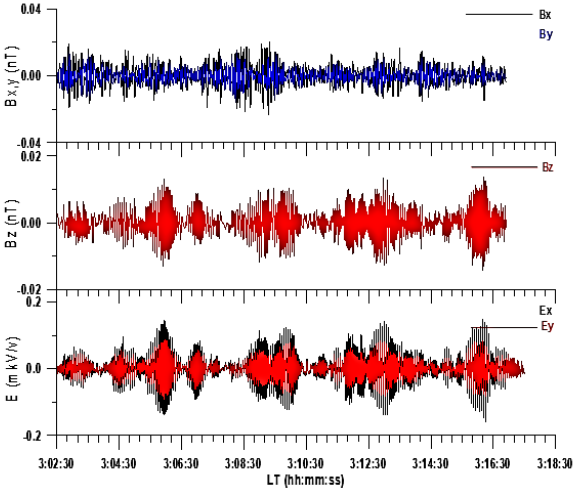


Рис.1. Колебания магнитного и электрического поля типа Pc1. п. Териберка, 16.08.2018 г.

(Bx и By) в диапазоне частот F = 0.1-0.2 Гц. На рис.2. представлен эллипс поляризации электрического поля (Ex – Ey).

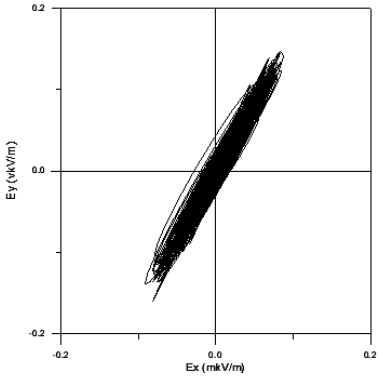


Рис.2. Поляризация горизонтальных компонент эдектрического поля

Данные по электрическому и магнтному полю магнтному полю получены в эксперименте на Баренцевом море (п.Териберка).

На рис.3 видно, что в вариациях электрического поля береговой эффект очень слаб, в то время как в магнитном поле наблюдается серьезное усиление вертикальной компоненты поля.

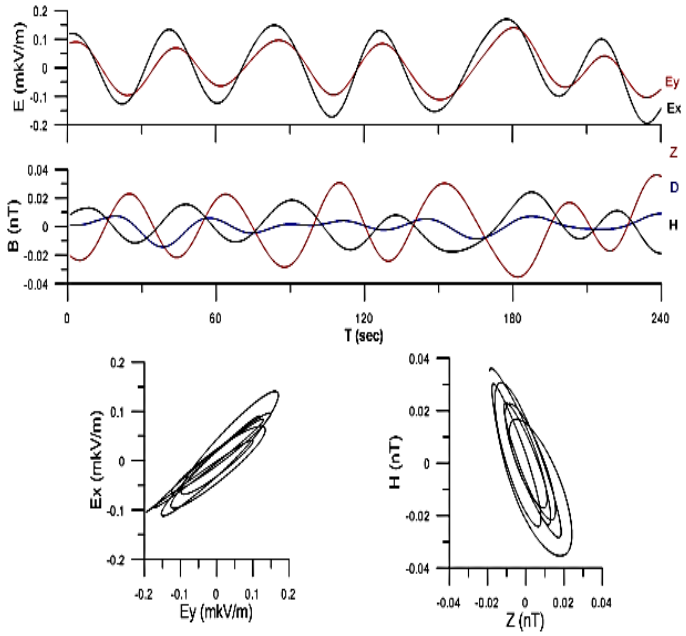


Рис.3. Компоненты вариаций электрического и магнитного поля (верхние панели) типа Pc3 (F=0.1 – 0.033 Гц) и эллипсы поляризации Ex – Ey и H – Z (нижние панели). Териберка, 15.08.2018 г.

На рис.4 на двух верхних панелях представлены вариации электрического (горизонтальные компоненты Ex и Ey) и магнитного поля типа Pc4 (все три компоненты) в более низком диапазоне частот F = 0.01 – 0.033 Гц. На нижних панелях представлены эллипсы поляризации электрического поля (Ex – Ey) и магнитного поля (H – D) и (H – Z). В районе расположения приборов берег – скалистый и величина прилива достигала 5 м.

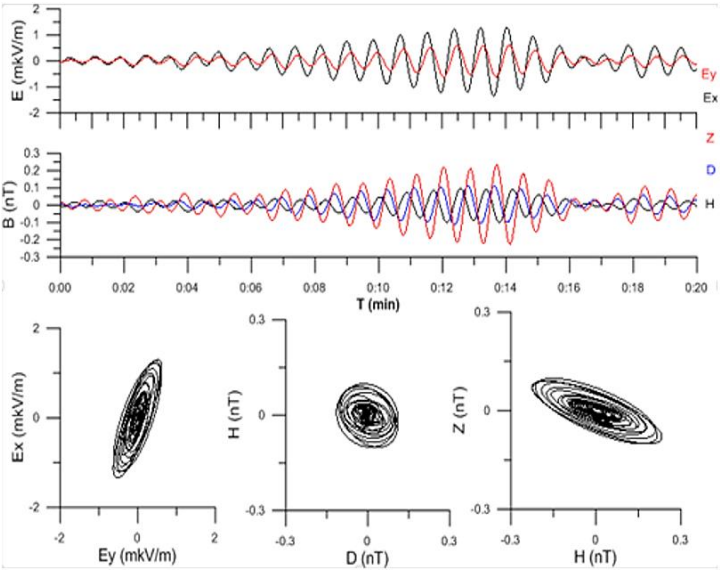


Рис.4. Компоненты вариаций электрического и магнитного поля (верхние панели) типа Pc4 (F=0.01 – 0.033 Гц) и эллипсы поляризации Ex – Ey, Y – D и H – Z (нижние панели) Териберка, 16.08.2018 г.

На рис.4, в отличии от рис.1 и рис.3, видно, что береговой эффект наблюдается и в вариациях электрического поля – Ex компонента существенно больше Ey компоненты, и в вариациях магнитного поля – Z компонента существенно больше H и D компонент. Эффект хорошо заметен в записях электрического и магнитного поля и в эллипсах поляризации.

На рис.5 на двух верхних панелях представлены вариации электрического (горизонтальные компоненты Ex и Ey) и магнитного поля типа Pc3 (все три компоненты) в более низком диапазоне частот F = 0.03 – 0.1 Гц. На нижних панелях представлены эллипсы поляризации электрического поля (Ex – Ey) и магнитного поля (H – D) и (H – Z). Данные по электрическому и магнтному полю получены в эксперименте на Белом море (п.Умба) В районе расположения приборов берег – песчаный и величина прилива составляла ~2 м.

На рис.5 береговой эффект отчетливо наблюдается и в вариациях электрического поля – Ex компонента вдвое превышает Ey компоненту, и в вариациях магнитного поля – Z компонента существенно больше H и D компоненты. Эффект хорошо заметен в эллипсах поляризации.

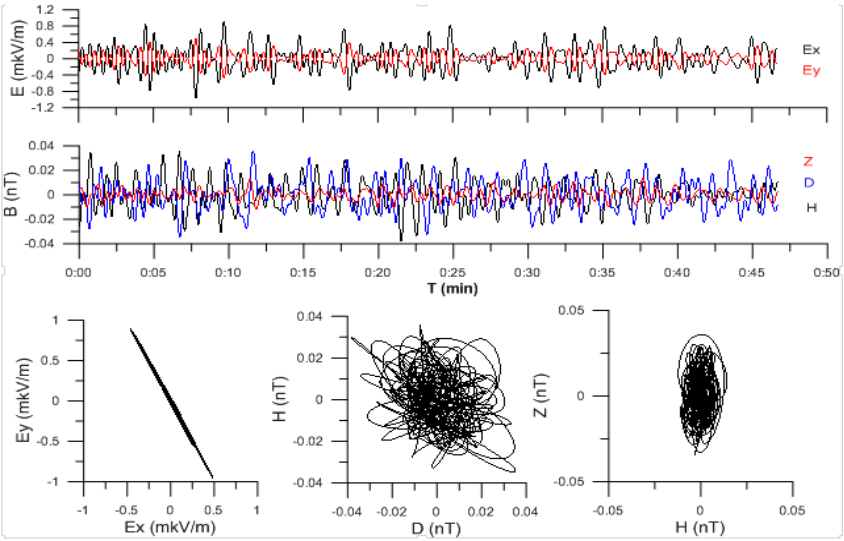


Рис. 5. Компоненты вариаций электрического и магнитного поля (верхние панели) типа Pc3 (0.03 – 0.1 Гц) и эллипсы поляризации Ex – Ey, H – D и H – Z (нижние панели)

На рис.6 представлена зависимость среднеквадратичной величины горизонтальной компоненты естественного переменного электрического поля (пульсации диапазона Pc4) от расстояния до кромки воды. Зависимость строилась по результатам многоэлектродного эксперимента на Белом море 05.07.2019 г. Из рисунка видно, что при удалении от кромки воды на 30 м амплитуда вариаций электрического поля уменьшилась в 1,2 раза, при большей дальности амплитуда уменьшается медленнее, что означает сильную локальность источника вариаций.

Как видно на рис.1-6 величина берегового эффекта зависит от отношения проводимости суши и моря и частоты вариаций – в более длиннопериодных вариациях береговой эффект выражен сильнее.

На рис.7 показана схема изменения концетрации отрицательных электрических зарядов возле береговой линии при смене направления горизонтальной компоненты переменного электрического поля. При изменении направления горизонтальной компоненты электрического поля ортогональной береговой линии соответственно изменяется и концетрация отрицательных электрических зарядов.

Умба, 04.07.2019 г.

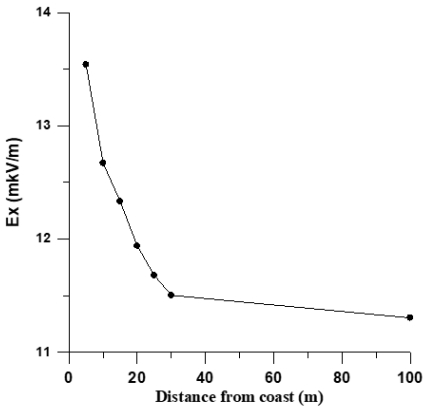


Рис.7. Зависимость среднеквадратичной величины горизонтальной компоненты естественного переменного электрического поля от расстояния до кромки воды

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применяя методы теории искусственного интеллекта и глубокого обучения, был обнаружен «береговой эффект» в величине переменного электрического поля, который заключается в усилении амплитуды вариаций горизонтальной компоненты (ортогональной берегу) вблизи береговой линии. Эффект ослабевает с увеличением расстоянием от моря. «Береговой эффект» в вариациях магнитного поля связан со скачком индукционного тока на береговой линии при падении электромагнитной волны на Земную поверхность. Эффект в вариациях электрического поля связан с изменением плотности электрических зарядов на береговой линии пропорциональной вариациям напряженности электрического поля. Изменение плотности зарядов возникает вследствие изменения величины горизонтальной компоненты электрического поля ортогональной береговой линии претерпевающей скачок на береговой линии, в то время как касательная компонента непрерывна (рис.8). Насыщенный голубой цвет означает повышенную концентрацию отрицательных зарядов.

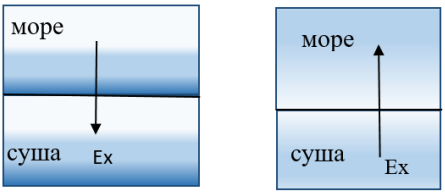


Рис.8. Изменение концентрации отрицательных электрических зарядов возле береговой линии при смене направления горизонтальной компоненты переменного электрического поля

Литература

1. Мардерфельд Б.Е. Береговой эффект в геомагнитных вариациях // М.: Наука. – 1977. – 30 с.
2. Мансуров С.М. О причинах локальности магнитных вариаций в районе Мирного. Инф.бюлл. сов.антаркт.эксп. – 1958. – № 2. – С. 37-41.
3. Никифорова Н.Н, Ахмадулин В.А., Порай-Кошиц А.М., и др. Глубинные магнитотеллурические исследования в Хабаровском крае // Глубинные электромагнитные исследования Дальнего Востока. Владивосток: ДВНЦ АН СССР. – 1980. – С.42-49.
4. Рокитянский И.И. Береговой эффект в вариациях электромагнитного поля Земли // Известия Академии наук СССР. – 1963. – № 12. – С. 1814-1822
5. Ваньян Л.Л., Мардерфельд Б.Е., Родионов А.В. Региональный и локальный береговой эффект в геомагнитных вариациях на островных дугах // Докл. АН СССР. – 1967. – Т.176. – № 4. – С. 820-821.
6. Гришенцев А.Ю., Коробейников А.Г. Разработка модели решения обратной задачи вертикального зондирования ионосферы//Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2011. – № 2 (72). – С. 109-113.
7. Гришенцев А.Ю., Коробейников А. Г. Средства интероперабельности в распределенных геоинформационных системах// Журнал Радиоэлектроники. – № 3. – 2015

УДК 004.8

СИСТЕМА МОНИТОРИНГА И ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ О БЕЗОПАСНОСТИ ДВИЖЕНИЯ ПО АВТОМОБИЛЬНОМУ МОСТУ*

Колтунов С.С.
e-mail: sergeyk94@gmail.com
Королева М.Н.
e-mail: maria.svyatkina@gmail.com
МГТУ им. Н.Э. Баумана

1. ВВЕДЕНИЕ

Развитие современной сети движения автомобильного транспорта предъявляет требования к обеспечению безопасности перемещения, в особенности, по таким ее стратегическим объектам, как мосты. Проблема мониторинга подобных объектов является комплексной и включает в себя следующие задачи: измерение ключевых характеристик самих объектов и их физико-технической среды, а также интерпретация результатов измерений; анализ протекания процессов в наблюдаемых объектах и диагностика их текущих состояний; прогнозирование дальнейшего развития; принятие решения, связанного с эксплуатацией и обеспечением безопасности движения по подобным объектам.

Здесь центральное место занимают различные измерения. Для мостов – это измерения метеорологических показателей (в первую очередь, направление и скорость ветра), определение состояния дорожного полотна, по которому перемещается транспорт, а также прочность опор мостового сооружения.

В свою очередь, система поддержки принятия решений (СППР) должна предоставлять свободный и своевременный доступ водителя к критически важной для него информации, в понятной для него форме, которая позволит обеспечить безопасность его движения.

Здесь центральное место занимают методы интерпретации данных, получаемых системой поддержки принятия решений, а также

* Работа выполнена при финансовой поддержке НИЦ «Курчатовский институт» (приказ № 1055 от 02.07.2020)

технологии, позволяющие пользователю получать знания из любой географической точки.

2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ БАЗОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЛИЯЮЩИХ НА БЕЗОПАСНОСТЬ ДВИЖЕНИЯ ПО МОСТУ

2.1. Основные характеристики внешней среды мостового перехода и средства их измерения

Главными погодными условиями, влияющими на безопасность движения по мосту, являются ветер (его скорость и направление движения относительно объекта), а также состояние проезжей части, по которой движутся автомобили. Для измерения данных параметров применяются соответствующие датчики (анемометр, температурный датчик, датчики состояния поверхности дорожного полотна), которые были подробно рассмотрены нами в [1].

Рассмотрим подробнее главную метеорологическую характеристику для мостового перехода – скорость ветра и связанное с ней ветровое давление.

Ветровое давление и сила ветра. Автомобиль, проезжая по мосту, подвергается воздействию воздушного потока, и, чем выше скорость потока, тем с большей силой автомобиль отклоняется от траектории движения. Основную опасность при движении автомобиля по открытой местности (в том числе по мосту) представляет боковой ветер, действующий перпендикулярно движению машины. При порывистом ветре автомобиль едет зигзагами, смещаясь с траектории движения под воздействием ветра и возвращаясь обратно под управлением водителя, при этом движение автомобиля становится неустойчивым.

При расчете ветровой нагрузки необходимо учитывать, как скорость воздействующего ветра, так и габариты автомобиля, и высоту мостового просвета [2]. Сила ветра может быть рассчитана по формуле (1):

$$F = V^2 \bullet \frac{\rho}{2} \bullet C_x \bullet K_\pi \bullet (1 + \varepsilon \bullet m) \bullet S \ \text{(Н)}, \qquad (1)$$

где V – скорость ветра, характеризующая неупорядоченный стохастический характер пульсаций ветра в приземном слое, позволяющая считать, что распределение пульсаций ветрового потока подчиняется нормальному закону распределения, м/с; ρ – плотность воздуха, зависящая от высоты мостового просвета, температуры, давления и влажности воздуха, кг/м^3; C_x – аэродинамический

коэффициент лобового сопротивления, который показывает степень аэродинамической устойчивости. При сопротивлении боковому ветру этот коэффициент равен 0,75; m – коэффициент пульсации скоростного напора, учитывающий динамические действия порывов ветра, определяющихся климатическими условиями, рельефом местности, высотой расположения объекта; K_n – поправочный коэффициент на возрастание скоростного напора на высоте, определяет неравномерное распределение скорости ветра по вертикали; S – площадь действия ветровой нагрузки, равная площади борта автомобиля; ε – коэффициент динамичности, учитывающий реакцию автомобиля на пульсацию ветра.

Сцепление с дорогой. Сцепные качества дорожного покрытия, зависящие в наибольшей степени от состояния поверхности покрытия, характеризуются величиной коэффициента сцепления k, принимающего значения для асфальта от 0,7 (сухое покрытие) до 0,1 (гололед) [3].

Сцепление колес автомобиля с дорогой влияет на его устойчивость при движении и безопасность маневров. Основная сила, препятствующая смещению машины при воздействии на нее силы ветра, является сила трения скольжения колес по проезжей части (2):

$$F = k \cdot mg \ (H), \qquad (2)$$

где k – коэффициент трения скольжения, зависящий от состояния дорожного полотна; m – масса, кг; g – гравитационная постоянная, $м^3/кг \cdot с^2$.

Можно выделить четыре основные состояния дороги в зависимости от погодных условий: сухая дорога, мокрая дорога, заснеженная дорога (слякоть) и наледь.

2.2. Дополнительные факторы, влияющие на безопасность движения

Ширина полосы дорожного полотна и допустимое смещение автомобиля. Ширина полосы движения, а также габариты самого транспортного средства определяют величину свободного пространства (зазора) между краем полосы или линии разметки и боковой стороной автомобиля. Данный зазор определяет допустимое смещение автомобиля в процессе движения, при котором не создается аварийной ситуации, как для водителя автомобиля, так и для других участников движения. Для большинства исследуемых транспортных мостов ширина полосы движения составляет 3,5–3,75 метров.

Таким образом величина допустимого зазора между автомобилем и краем полосы (рис.1) рассчитывается по формуле (3):

$$Y_{доп} = \frac{(B - Ш)}{2} - C\,, \qquad (3)$$

где B – ширина полосы движения, м; $Ш$ – ширина колеи автомобиля, м; C – минимальная величина приближения к краям полос.

Если возможная величина отклонения превышает рассчитанную допустимую величину, это может привести к выезду автомобиля.

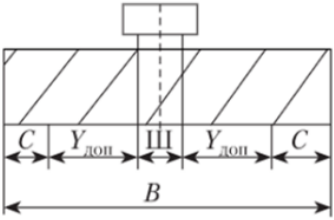


Рис.1. Расчетная схема определения допускаемых отклонений автомобиля $Y_{доп}$ при порывах ветра создает угрозы автомобилисту

Расчет величины выезда автомобиля под воздействием бокового ветра. Основываясь на расчетах силы ветра, противодействующей силы трения колес автомобиля, и принимая во внимание время реакции водителя транспортного средства, можно рассчитать величину смещения автомобиля с траектории движения во время пути (рис.2).

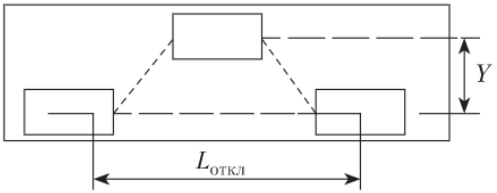


Рис.2. Отклонение автомобиля от траектории движения под воздействием бокового ветра

Для определения данной величины необходимо выяснить силу ветра, при которой сила трения скольжения более не препятствует смещению автомобиля, в результате чего он приобретает боковое ускорение (рис.3). Зная приобретенное боковое ускорение автомобиля, а также время реакции водителя на выполнение маневра, можно рассчитать общее отклонение Y, используя следующие физические формулы:

$$ma = F_в - F_т \qquad (3)$$

$$Y = \frac{at^2}{2}\ , \qquad (4)$$

где m – масса автомобиля, кг; a – ускорение, приобретенное автомобилем под действием внешних сил, м/с^2; $F_в$ – сила ветра, смещающая автомобиль, Н; F_m – сила трения скольжения, препятствующая смещению автомобиля под действием силы ветра, Н; Y – величина смещения автомобиля с траектории движения, м; t – время реакции водителя на необходимость совершения маневра.

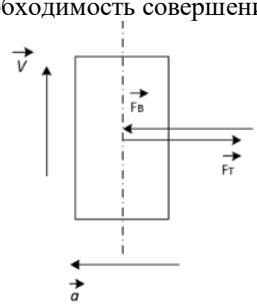


Рис.3. Силы, действующие на движущийся автомобиль при боковом ветре

Используя формулы (3) и (4) можно определить ожидаемое отклонение автомобилей разных габаритов и массы под воздействием силы ветра в зависимости от стажа водителя.

Классификация автомобилей по габаритам. Для построения модели поддержки принятия решений о безопасности движения, необходимо определить ключевые характеристики автомобиля, влияющие на его движения под воздействием различных метеоусловий, и классифицировать общую массу транспортных средств по ограниченному набору категорий.

Все автомобили различаются как по габаритам, так и по снаряженной и полной массам.

В настоящей работе авторами принято решение выделить 5 основных и 2 дополнительные категории, представленные в таблице 1.

Таблица 1. Категории транспортных средств

Категория	Описание	Площадь борта, м^2	Масса, т
1	Легковые машины классов A-F, а также внедорожники	7,00	1,60
2	Рузовые машины малых габаритов, такие как ГАЗ-2705	12,00	2,70

3	Средние грузовые машины (самосвалы) больших габаритов, такие как КамАЗ-65222	29,00	11,35
4	Тяжелые грузовые машины больших габаритов, такие как КамАЗ-65117	42,00	15,00
5	Региональные пассажирские автобусы, такие как НефАз 5299-37-32	45,00	18,00
Дополнительная 1	Груженые средние грузовые машины (самосвалы) больших габаритов, такие как КамАЗ-65222	29,00	25,00
Дополнительная 2	Груженые тяжелые грузовые машины больших габаритов, такие как КамАЗ-65117	42,00	27,00

3. АРХИТЕКТУРА СППР

Для возможности практического использования подобной системы данная модель требует внешнего удобного пользовательского интерфейса, постоянного расширения и изменения базы правил, а также надежного и непрерывного подключения к потоку данных об условиях дорожного движения на мосту [4]; должна накапливать и сохранять знания о постоянно расширяющемся семействе транспортных средств; должна быть масштабируемой, доступной к применению одновременно нескольким пользователям из разных географических точек.

Программно-аппаратный комплекс системы мониторинга (рис.4) представляет собой совокупность следующих подсистем:

- автоматизированная система управления дорожным движением (АСУДД), представляющая из себя совокупность датчиков, установленных на протяжённости моста, подсистемы считывания и обработки сигналов датчиков и непрерывно пополняющейся базы данных (БД) погодных условий на мосту;
- система нечеткого вывода, представляющая из себя совокупность базы нечетких правил и алгоритма нечеткого вывода;
- мобильная платформа пользователя, подключенная к системе нечеткого вывода и БД характеристик автомобилей посредством специального приложения.

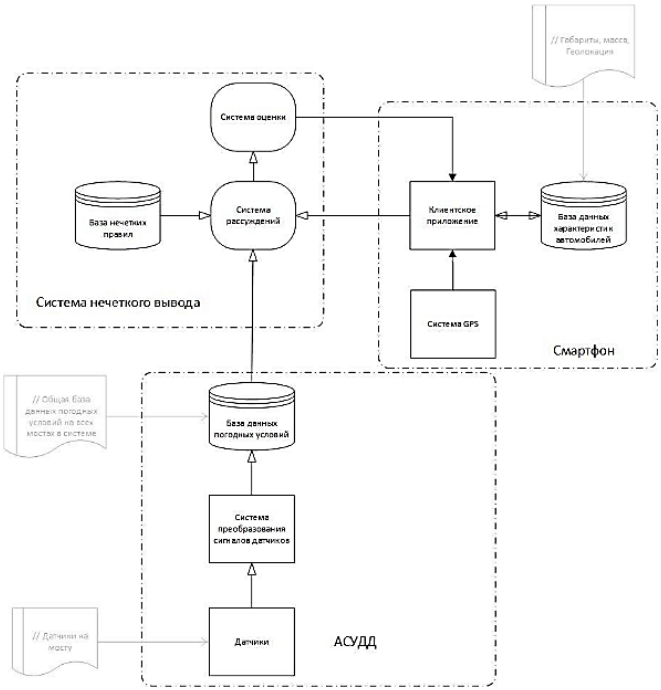


Рис.4. Программно-аппаратный комплекс системы мониторинга

Последовательность работы данного комплекса следующая (рис.5):

1.При помощи приложения, пользователь указывает для системы, какой автомобиль он использует, свой стаж вождения, а также свое географическое расположение и маршрут.

2.Используя БД характеристик автомобиля, приложение отправляет характеристики автомобиля пользователя на вход системы нечеткого вывода.

3.По данным маршрута пользователя на вход системы нечеткого вывода подаются данные о состоянии мостов, через которые проходит маршрут.

4.На основе базы нечетких правил и входных данных рассчитывается безопасность для пользователя всех мостов, лежащих на маршруте.

5.В приложение пользователя отправляется рекомендации по изменению маршрута в соответствии с рассчитанной безопасностью мостов, лежащих на маршруте.

6.Полученные рекомендации выводятся на экран мобильного устройства пользователя.

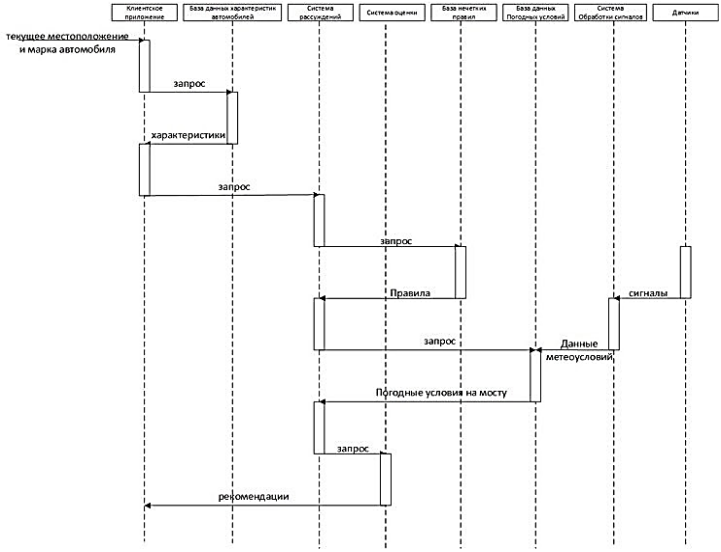


Рис.5. Диаграмма последовательности процесса вывода рекомендаций

Для подачи необходимых данных на входы модуля нечеткого вывода, требуется сохранять преобразованные сигналы датчиков, размещенных на транспортном мосту, безопасность движения по которому требуется определить. Для реализации этой задачи разработана БД погодных условий на мосту.

3.1. База данных погодных условий

База данных погодных условий состоит из 5 таблиц: 3 таблиц-источников, содержащих данные на основе преобразованных сигналов датчиков, таблицы-справочника, содержащей данные по мостовым сооружениям, и одной интеграционной таблицы, предназначенной для агрегации данных 3 таблиц-источников и отправки их в систему нечеткого вывода.

Таблица-источник «Ветер» содержит информацию о скорости и ветра и быстроте ее изменения, а также высоте расположения датчиков на всем протяжении моста в указанный момент времени. Таблица накапливает данные, являющиеся преобразованными сигналами, поступающими с анемометров, установленных на протяжении моста.

Таблица-источник «Температура» содержит информацию о температуре воздуха всем протяжении моста в указанный момент времени. Накапливаемые данные являются преобразованными сигналами, поступающими с температурных датчиков, расположенных на всей длине моста.

Таблица-источник «Состояние дороги» содержит информацию о состоянии поверхности дорожного полотна и его температуре на всем протяжении моста в указанный момент времени, а также фиксированное для конкретного моста значение ширины полосы движения. Накапливаемые данные являются преобразованными сигналами, поступающими с ДСПД, расположенных на всей длине моста.

Таблица-справочник «Мосты» содержит информацию о мостах, на которых ведется мониторинг безопасности движения: наименование, координаты расположения, высоту пролета, ширину полосы движения.

3.2 Процесс обработки данных

Принцип работы базы данных погодных условий следующий. Преобразованные в данные сигналы с датчиков, расположенных на транспортном мосту, записываются в таблицы-источники «Ветер» (WIND), «Состояние дороги» (RoadCover), «Температура» (TEMPERATURE) каждые 10 секунд (рис.6).

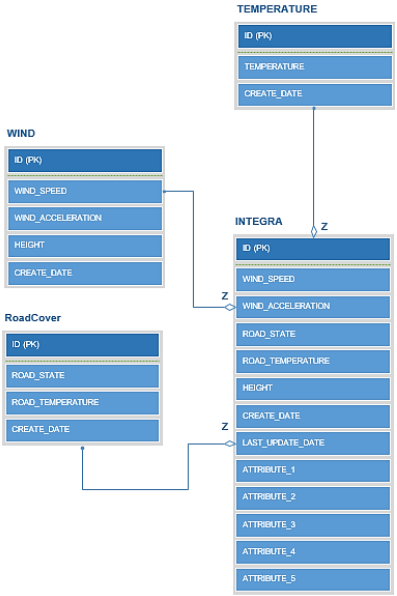


Рис.6. Модель базы данных в нотации IDEF1x

Далее, каждую минуту, согласно процедуре агрегации, данные из таблиц-источников, записываются в общую интеграционную таблицу для дальнейшей передачи данных в систему нечеткого вывода. При этом из каждой таблицы-источника берется последняя созданная запись.

Для контроля объема данных, в базе данных предусмотрена процедура очистки записей из таблиц-источников и интеграционной таблицы, которые старше 60 минут, что позволяет использовать ограниченное дисковое пространство.

3.3. Разработка модуля нечеткого вывода

Системы нечеткого вывода предназначены для преобразования значений входных переменных процесса управления в выходные переменные на основе использования нечетких продукционных правил [5, 6]. Для этого системы нечеткого вывода должны содержать базу нечетких продукционных правил и реализовывать нечеткий вывод заключений на основе посылок или условий, представленных в форме нечетких лингвистических высказываний.

Основой системы нечетких продукционных правил является лингвистическая переменная (ЛП) «Скорость ветра», созданная на основе двенадцатибальной шкалы Бофорта, принятой Всемирной метеорологической организацией для приближенной оценки скорости ветра [7].

В таблице 2 представлен фрагмент базы правил модели поддержки принятия решений об ограничении движения автотранспорта по мосту в зависимости от погодных условий [1].

Таблица 2. Нечеткие продукционные правила ограничения движения по транспортному мосту

Термы ЛП «скорость ветра»	**Продукционные правила**
Слабая	Если скорость ветра = слабая, то движение = разрешено
Умеренная	Если скорость ветра = умеренная, то движение = разрешено Если скорость ветра = умеренная И изменение скорости ветра = усиление И состояние дороги = обледенелая, то движение = слабо ограничено

Сильная	Если скорость ветра = сильная И изменение скорости ветра = не меняется И состояние дороги = обледенелая, то движение = слабо ограничено Если скорость ветра = сильная И изменение скорости ветра = незначительное усиление И состояние дороги = обледенелая, то движение = сильно ограничено Если скорость ветра = сильная И изменение скорости ветра = усиление И состояние дороги = обледенелая, то движение = запрещено

4. РЕАЛИЗАЦИЯ КОМПОНЕНТОВ НА ОСНОВЕ MICROSOFT SQL SERVER 2012 И JAVASCRIPT

4.1 База данных погодных условий

База данных погодных условий реализована на базе Microsoft SQL Server 2012. Для создания и настройки БД запущен сервер баз данных DESKTOP-NRO7L47\SQLEXPRESS (рис.7). База данных погодных условий SENSOR_RESULTS_DB имеет вид согласно своей модели данных, описанной в предыдущем разделе (рис.8). Таблицы предварительно заполнены тестовыми данными.

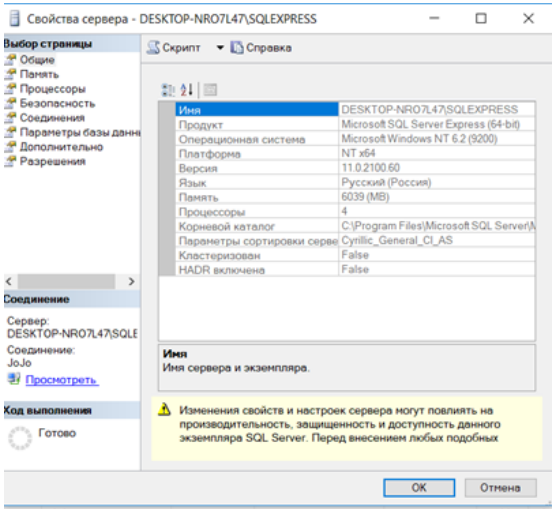


Рис.7. Свойства сервера баз данных

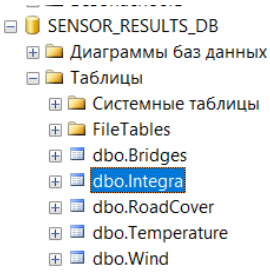


Рис.8. Структура базы данных погодных условий

4.2 Генератор данных с датчиков

В качестве источника исходных данных используется генератор данных, который симулирует вставку данных преобразованных сигналов датчиков в таблицы-источники. Генератор отрабатывает один раз в 30 секунд, заполняя данными таблицы Wind, Temperature, RoadCover.

Генератор данных является отдельной независимой программой, написанной на языке JavaScript (листинг 1).

При запуске программы, она автоматически подключается к БД погодных условий по заданным параметрам и выполняет вставку строк в таблицы БД согласно собственному коду. Аналогично процедура агрегации данных таблиц-источников в интеграционную таблицу выполнена в виде отдельной независимой программы на языке JavaScript. Подобно программе генератора данных, при запуске программа агрегации автоматически подключается к БД и далее, в соответствии с прописанной в коде программы логикой, заполняет интеграционную таблицу Integra данными из таблиц-источников.

```
package Generator;
import java.text.SimpleDateFormat;
import java.util.Calendar;
import java.util.Random;
public class GenerateData {
 public float T = 0;// temperature
 public float W = 0;// temperature
 public String Generate(String type, int n) {
  switch (type){
   case "T":
    return Temperature(n);
   case "R":
    return RoadCover();
```

```
    case "W":
     return Wind(n);
    case "I":
     return UpdIntegra();
    default:
     return "Error! There is no type" + type;
   }
  }
 }
```

Листинг 1. Объявление класса GenerateData

4.3 База данных автомобилей для клиентского приложения

Для вывода информации пользователю о возможности движения его автомобиля по мосту, на котором осуществляется мониторинг, клиентское приложение должно обладать базой данных характеристик автомобилей, из которой пользователь будет иметь возможность выбрать свою модель автомобиля и указать ее в приложении. Также база данных должна сохранять и обрабатывать данные о самом водителе. Подобно БД погодных условий, БД характеристик автомобилей также реализована при помощи по Microsoft SQL Server 2012, на основе сервера DESKTOP-NRO7L47\SQLEXPRESS. Сама база данных носит название DRIVING_SAETY_APP.

4.4. Реализация модуля в среде Matlab

Модуль нечетких рассуждений по ограничению движения на мосту, разработанный в среде Matlab, использует алгоритм нечеткого вывода по Мамдани [1]. Получив на вход данные из БД погодных условий и БД характеристик автомобилей, модуль преобразует их в рекомендации по ограничению движения по мосту на пути следования пользователя посредством разработанной базы нечетких правил.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрены условия, влияющие на безопасность движения по мостовым переходам, и средства их измерения, представлены формулы расчета и таблица правил для силы ветра, воздействующей на автомобили при разных погодных условиях на мосту, предложена схема программно-аппаратного комплекса системы мониторинга и поддержки принятия решений о безопасном движении по мосту.

С использованием средств разработки баз данных и программного обеспечения разработаны БД погодных условий и БД клиентского приложения, а также генератор случайных данных с датчиков для тестирования работы базы данных погодных условий.

Литература

1. Колтунов С.С., Королева М.Н. Разработка модуля нечетких рассуждений для системы мониторинга безопасности движения транспорта по искусственным сооружениям // Интеллектуальные системы и технологии: современное состояние и перспективы. Сборник научных трудов IV-ой Международной летней школы-семинара по искусственному интеллекту для студентов, аспирантов и молодых ученых (Санкт-Петербург, 30 июня – 3 июля 2017 г.). – Санкт-Петербург: Изд-во СПИИРАН, 2017. – С. 105-114.
2. МЭК 61400-1 Установки электрические ветровые. Требования к конструкции» (IEC 61400-1:2005 Wind Turbines – Part 1: Design requirements). – Введ. 27.12.2002. – 126с.
3. Бондарева, Э. Д. Метеорология: дорожная синоптика и прогноз условий движения транспорта : учебник для вузов / Э. Д. Бондарева. – 2-е изд., испр. и доп. – Москва : Издательство Юрайт, 2019. – 106 с. – (Университеты России). – ISBN 978-5-534-08482-5. – Текст : электронный // ЭБС Юрайт [сайт]. – URL: https://biblio-online.ru/bcode/437583 (дата обращения: 21.06.2019).
4. Сырков, А.В. Оптимизация жизненного цикла моста на остров Русский во Владивостоке средствами анализа рисков и мониторинга / Сырков А.В, Крутиков О.В. // Автоматизация в промышленности. – 2012. – С. 45-50.
5. Заде Л. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений. – М.: Мир, 1976. – 149 с.
6. Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта / Под ред. Д.А. Поспелова. – М.: Наука, 1986.
7. Всемирная метеорологическая организация [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.wmo.int/pages/index_ru.html. – (Дата обращения: 05.03.2017).

УДК 004.8

АЛГОРИТМ ОЦЕНИВАНИЯ ОТНОШЕНИЯ К ЦЕЛЕВОМУ ОБЪЕКТУ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПУБЛИКАЦИЙ СОЦИАЛЬНОЙ СЕТИ МЕТОДОМ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Шекшуев С.В.,
e-mail: sergei.shekshuev@gmail.com
Орловский ГУЭиТ

1. ВВЕДЕНИЕ

Изучение общественного мнения представляет собой набор способов исследования проявлений массового сознания, посредством которого публично выражается духовное или духовно-практическое отношение большинства к актуальным для него фактам, событиям, явлениям и процессам действительности. Наиболее распространенным средством изучения общественного мнения является социологическое исследование. К основным его методам социологи относят методы опроса, наблюдения, анализа документов и социологический эксперимент. Эти методы имеют недостатки, такие как необходимость использования большого человеческого ресурса, сложность проведения социологических исследований, недостоверность получаемых данных.

Условием получения максимально объективного мнения какого-либо лица является сокрытие факта исследования от респондента. То есть социологическая информация должна получаться из естественной среды, где лицо высказывает свое мнение исключительно на те события, которые вызвали у него интерес. Одним из источников получения такого рода информации является Интернет в целом и социальные сети в частности.

В настоящее время задача определения отношения к выбранному объекту решается в основном средствами анализа тональности текстов публикаций, сообщений, комментариев. Однако, несмотря на свое широкое применение, данный подход не лишен недостатков, таких, как многозначность оценочной лексики, наличие иронии и сарказм, сравнений, использование иного представления текста, необходимость использования словарных ресурсов.

В работе [7] исследовалась возможность применения первичных и производных показателей социальных сетей (количество лайков,

комментарием, репостов и просмотров в единицу времени) для классификации публикаций социальной сети. Было показано, что конкретная публикация, выраженная в позитивном либо ином ключе, имеет определенную структурно-временную характеристику этих показателей.

В данной работе предлагается алгоритм оценивания отношения к целевому объекту на основе публикаций в социальных сетях, который использует оценку принадлежности отдельно взятой публикации социальной сети к классу y_p положительных или к y_n иных (т.е. не положительных) публикаций. При этом является очевидным тот факт, что невозможно получить оценку публикации каким-либо детерминированным методом. Вместе с тем использование методов из существующего сегодня класса мягких вычислений [6] позволяет найти решение этой проблемы за полиномиальное время. Поэтому ядро алгоритма составляет модель машинного обучения, основанная на методе градиентного бустинга XGBoost [8].

Классифицируя публикации, можно оценить отношение к заранее заданному целевому объекту. Процесс оценки состоит из следующих этапов:

1. Формализация целевого объекта. Результатом данного этапа являются критерии ЦО, по которым будут отбираться публикации социальной сети.
2. Выборка публикаций. На данном этапе в соответствии с критериями целевого объекта производится выборка публикаций из социальной сети. В качестве результата выступает множество постов, удовлетворяющих критериям ЦО $P = \{p_i\}$.
3. Оценка отношения к ЦО.
4. Вывод результата.

2. АЛГОРИТМ ОЦЕНКИ ОТНОШЕНИЯ К ЦЕЛЕВОМУ ОБЪЕКТУ

На рис.1 представлена блок-схема алгоритма оценки отношения к целевому объекту.

Алгоритм состоит из следующих этапов:

1. Проверка входных данных.

Для работы алгоритма необходимо наличие хотя бы одной публикации p_i, т.е. $P \neq \emptyset$. Если публикации отсутствуют, то алгоритм процедура завершает свою работу и возвращает значений 0.

2. Инициализация процедуры.

На данном этапе происходит инициализация цикла по множеству публикаций $P = \{p_i\}$. Индекс i изменяется от 0 до

количества публикаций $0 \le i < |P|$. Здесь же определяется матрица объекты-признаки X, количество строк которой равно количеству публикаций, а каждая строка представляет собой множество значений показателей i-й публикации $x_i = \{f_1, \dots, f_n\}$.

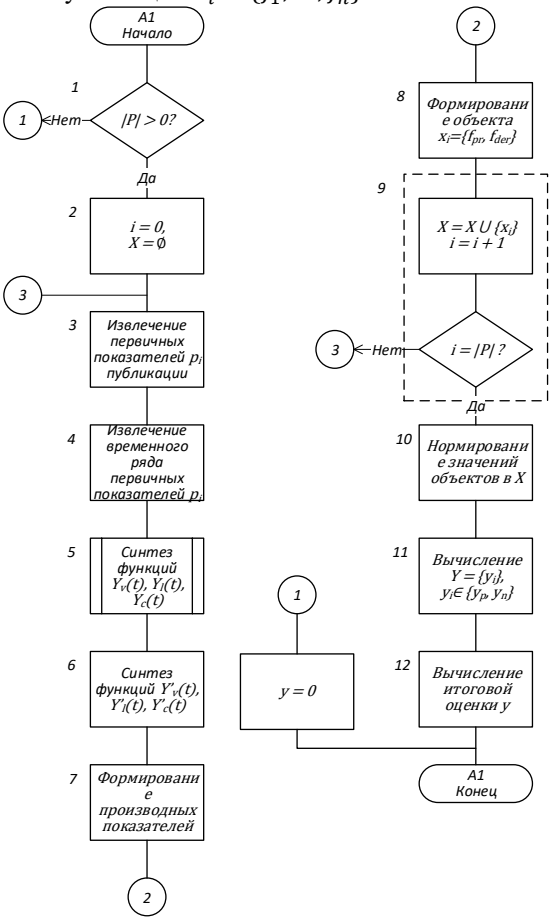


Рис.1. Блок-схема предлагаемого алгоритма

3. Извлечение первичных показателей.

К первичным показателям f_{pr} относятся количество комментариев f_c, просмотров f_v, лайков f_l, репостов f_r и вложений f_a публикации.

4. Извлечение временного ряда первичных показателей.

На данном этапе для публикации p_i извлекаются временные ряды из первичных показателей f_c, f_v и f_l, т.е. формируются табличные функции $f_c(t)$, $f_v(t)$ и $f_l(t)$ на интервале времени $t \in (0, A)$. Правая граница интервала должна удовлетворять условию, при котором изменение количества комментариев, лайков и просмотров будет ничтожно мало по сравнению с общим количеством этих показателей. То есть существует ε, такое, что $\exists A > 0: t \in (0, A): f'(t) \geq \varepsilon$. Поскольку функции $f_c(t)$, $f_v(t)$ и $f_l(t)$ являются функциями логарифмов вида $f(t) = a \log t + b$, то их производная при натуральном логарифме есть гипербола $f'(t) = \frac{a}{t}$. Тогда $t \leq \frac{a}{\varepsilon}$, следовательно $A \leq \frac{a}{\varepsilon}$.

5. Синтез функций $Y_c(t)$, $Y_v(t)$ и $Y_l(t)$.

Путем аппроксимации табличных функций $f_c(t)$, $f_v(t)$ и $f_l(t)$ на интервале времени $t \in (0, A)$, с использованием метода наименьших квадратов (МНК) синтезируются функции $Y_c(t)$, $Y_v(t)$ и $Y_l(t)$.

6. Синтез функций $Y'_c(t)$, $Y'_v(t)$ и $Y'_l(t)$.

На этом шаге алгоритма задаются производные функций $Y_c(t)$, $Y_v(t)$ и $Y_l(t)$.

7. Формирование производных показателей.

На данном этапе производится вычисление значений каждой из функций $Y_v(t), Y_l(t), Y_c(t), Y'_v(t), Y'_l(t), Y'_c(t)$ для формирования множества производных показателей f_{der}.

8. Формирование объекта x_i.

Этот шаг алгоритма предусматривает создание объекта $x_i = \{f_{pr}, f_{der}\}$, представляющего собой множество, объединяющее значения множеств первичных f_{pr} и производных f_{der} показателей публикаций социальной сети.

9. Выход из цикла или переход к следующей итерации.

На данном этапе x_i добавляется во множество X. Иными словами, в матрицу объекты-признаки добавляется новая строка. Также производится проверка на оставшиеся необработанные публикации, и если таковые имеются, то производится переход к следующей итерации цикла, а если нет, то цикл завершается.

10. Нормирование значений в X.

На данном этапе значения в столбцах матрицы X нормируются $x_{new} = \frac{x_{old} - m}{s}$, где x_{new} – новое значение признака, x_{old} – старое значение признака, m – среднее значение признака, s – среднеквадратическое отклонение. Таким образом, значение всех признаков переходит в диапазон [-1, 1].

11. Вычисление значений Y.

Одиннадцатый шаг алгоритма подразумевает непосредственную работу обученной модели XGBoost, на вход которой передается матрица объекты-признаки, а на выходе получается множество значений меток классов $Y = \{y_i\}$, где $y_i \in \{y_p, y_n\}$.

12. Вычисление итоговой оценки y.

Последний этап включает в себя применение решающего правила для получения итоговой оценки отношения к целевому объекту. В качестве такого правила $F'(\{y_i\})$ предлагается использовать долю меток класса y_p, вычисляемую как $F'(\{y_i\}) = \dfrac{\left|\{y_p\} \subset \{y_i\}\right|}{\left|\{y_i\}\right|}$.

3. ОЦЕНКА КОРРЕКТНОСТИ АЛГОРИТМА

Алгоритм называется корректным, если выполняются условия [3]:

- после выполнения конечного числа элементарных операций алгоритм позволяет преобразовать любые входные данные в результат;
- результат устойчив по отношению к малым возмущениям входных данных;
- результат обладает вычислительной устойчивостью.

Методика доказательства корректности алгоритма заключается в реализации следующих действий.

Выделение в алгоритме критических с его точки зрения фрагментов.

Таковыми в разработанном алгоритме являются блок 5, связанный с операцией логарифмирования, и блоки 6 и 12, связанные с операций деления.

Определение постусловий для выделенных фрагментов.

Для корректной работы алгоритма в блоках 5 и 6 переменная t должна быть больше 0, а для блока 12 необходимым условием является наличие хотя бы одной оценки y_i, т.е. $Y \neq \emptyset$.

Преобразование постусловия фрагмента в предусловия и определение, не является ли данное предусловие функцией от другого предусловия, включенного в систему.

Выполнение условия $t > 0$ очевидно, обеспечено. Поскольку t есть время, оно не может быть отрицательным. Ограничение на равенство $t = 0$ заложено в области определения функций Y и Y' (2.21). Наличие хотя бы одной оценки y_i зависит от наличия хотя бы одной публикации p_i. Алгоритм предусматривает корректное завершение процедуры в случае $P \neq \emptyset$ в блоке 1.

Таким образом, корректность алгоритма доказана.

4. ОЦЕНКА СЛОЖНОСТИ АЛГОРИТМА

Для оценки сложности алгоритма необходимо рассчитать число элементарных шагов, которые выполняет алгоритм при заданном размере входных данных с учетом времени их выполнения [2]. Размер входных данных обозначается как m – количество объектов x_i (2.23), при этом каждый объект x_i содержит $n = 293$ признака. Количество деревьев в алгоритме XGBoost обозначим как n_{tr} (таблица 1).

Таблица 1. Расчет сложности алгоритма

№	Этап алгоритма	Временная стоимость выполнения этапа	Число шагов	Общее время выполнения этапа
1	Проверка входных данных	t_1	$c = 1$	t_1
2	Инициализация процедуры	t_2	$c = 1$	t_2
3	Извлечение первичных показателей	t_3	$c = 5$	$5 \cdot t_3$
4	Извлечение временного ряда первичных показателей	t_4	$c = 3$	$3 \cdot t_4$
5	Синтез функций $Y_c(t)$, $Y_v(t)$ и $Y_l(t)$	t_5	n^3	$n^3 \cdot t_5$
6	Синтез функций $Y'_c(t)$, $Y'_v(t)$ и $Y'_l(t)$	t_6	$c = 3$	$3 \cdot t_6$
7	Формирование производных показателей	t_7	$6 \cdot n \cdot m$	$6 \cdot n \cdot m \cdot t_7$
8	Формирование объекта x_i.	t_8	$c = 1$	t_8
9	Выход из цикла и переход к следующей итерации	t_9	$c = 1$	t_9
10	Нормирование значений в X	t_{10}	m^2	$m^2 \cdot t_{10}$
11	Вычисление значений Y	t_{11}	$n \cdot n_{trees}$	$n \cdot n_{trees} \cdot t_{11}$
12	Вычисление итоговой оценки y	t_{12}	$c = 1$	t_{12}

Временная сложность алгоритма определяется как сумма временных сложностей каждого из этапов алгоритма с учетом размера входных данных $T(n, m, n_{tr}) = t_1 + t_2 + 5t_3 + 3t_4 + n^3 t_5 + 3t_6 + +6nmt_7 + +t_8 + t_9 + m^2 t_{10} + nn_{tr} t_{11} + t_{12}$. Из формулы видно, что функция времени работы алгоритма имеет квадратичную зависимость от размера входных данных m и кубическую зависимость от количества признаков объекта n. Пренебрегая константами, а также представляя, что количество признаков n также константа, оценочная асимптотическая сложность алгоритма является квадратичной $O(m^2)$.

5. ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ АЛГОРИТМА

В ходе выполнения алгоритма возникают погрешности различного рода, снижающие точность получаемых оценок [4, 5].

Как правило, общая погрешность вычислений обусловлена рядом причин:

- используемые в вычислениях модели описывают реальные процессы приближенно;
- неточность исходных данных;
- погрешность расчетов в ЭВМ.

В результате возникают: неустранимые погрешности $\delta_н$, вычислительные погрешности $\delta_в$ и погрешности метода $\delta_м$.

При этом для удовлетворительной точности алгоритма отношение неустранимой погрешности $\delta_н$ и погрешности метода $\delta_м$ должно лежать в диапазоне от 2 до 10, включительно. А отношение вычислительной погрешности $\delta_в$ и погрешности метода $\delta_м$ должно составлять не менее одного порядка [3]:

$$U = \begin{cases} \dfrac{\delta_н}{\delta_м} = [2 \dots 10] \\ \dfrac{\delta_м}{\delta_в} \geq 10 \end{cases}.$$

Неустранимая погрешность определяется как $\delta_н \approx 10^{-N+1}$, где N − длина мантиссы исходных данных.

Наибольшая погрешность значений исходных данных алгоритма проявляется в значениях переменных вещественного типа, следовательно, $\delta_н \approx 10^{-14}$.

Для определения погрешности метода необходимо рассчитать изменение погрешности при проведении вычислений на каждом шаге алгоритма.

Исходные данные алгоритма представляются в виде целых чисел и чисел с плавающей точкой, отражающих значений первичных

показателей публикаций социальной сети в конкретный момент времени.

В блоке 5 производится операция логарифмирования, а в блоке 6 операция деления чисел. Погрешность вычислений будет равна погрешности представления результата конкретной операции в ЭВМ. Следовательно, погрешность значения в указанных блоках $\delta_{бл5} \approx \delta_{бл6} \approx 10^{-14}$. В блоке 7 также производятся операции логарифмирования и деления, соответственно $\delta_{бл7} \approx 10^{-14}$. В блоке 10 производится операция деления, следовательно $\delta_{бл10} \approx 10^{-14}$. В остальных блоках операций, связанных с учетом погрешности вычислений, не производится.

Таким образом, полученная погрешность метода $\delta_м \approx 10^{-15}$.

Вычислительная погрешность алгоритма $\delta_в$ определяется внутренней архитектурой ЭВМ. В современных условиях точность ЭВМ на много порядков выше величины 10^{-14}. Следовательно, $\delta_в < 10^{-14}$.

Полученные значения погрешностей удовлетворяют предъявленной системе критериев и позволяют сформулировать вывод о достаточной точности алгоритма.

6. ОЦЕНКА ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ АЛГОРИТМА

Оценка вычислительной устойчивости алгоритма проводится на основе анализа погрешности результатов вычисления в зависимости от числа шагов алгоритма (рис.2).

Для этого определены погрешности вычислений для нескольких значений числа шагов алгоритма. Для понимания характера зависимости погрешности вычислений от количества шагов достаточно значения в нескольких точках и аппроксимировать их.

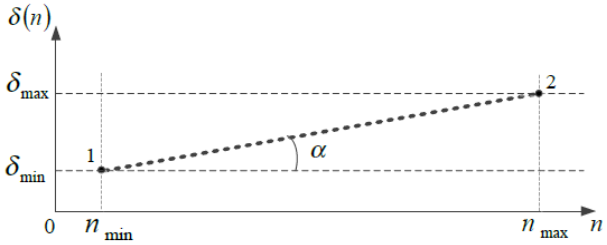


Рис.2. Аппроксимация линейной функцией зависимости погрешности результатов работы алгоритма от числа шагов

Вычислительная устойчивость алгоритма определяется углом наклона линии 1-2, аппроксимирующей линейной функцией зависимость погрешности результатов работы алгоритма от числа шагов. При этом анализ показывает, что для оцениваемого алгоритма угол наклона линии 1-2 стремится к нулю $\alpha \to 0$, поскольку разность $\delta_{max} - \delta_{min}$ более высокого порядка малости, чем разность $n_{max} - n_{min}$, что говорит о достаточной вычислительной устойчивости алгоритма.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлен алгоритм оценивания отношения к целевому объекту на основе анализа публикаций в социальных сетях, направленный на решение задачи минимизации времени оценки отношения к целевому объекту и повешения точности. При этом алгоритм не использует существующие методы анализа тональности текстов, а реализует оценку путем анализа первичных и производных показателей публикаций социальных сетей.

Литература

1. ГОСТ 19.701-90 ЕСПД. Схемы алгоритмов, программ, данных и систем. Обозначения условные и правила выполнения
2. Колмогоров, А.Н. Теория информации и теория алгоритмов. – Москва : Наука, 1987. – 303 с.
3. Бочков, М. В. Проектирование автоматизированных систем обработки информации и управления / М. В. Бочков, Е. И. Новиков, О. В. Тараканов; под ред. М. В. Бочкова. – Орёл: Академия ФСО России, 2007. – 406 с.
4. Ахо, А. Структуры данных и алгоритмы [пер. с англ.] / А. Ахо, В. Хопкрофт, Д. Ульман, Д. Джеффри. – М. : Вильямс, 2001. – 384 с.
5. Кормен, Т. Алгоритмы: построение и анализ / Т. Кормен, Ч. Лейзерсон, Р. Ривест. – М : МЦНМО, 1999. – 960 с.
6. Zadeh, Lotfi A., «Fuzzy Logic, Neural Networks, and Soft Computing», Communications of the ACM, March 1994, Vol. 37 No. 3, p. 77-84.
7. Сазонов М.А., Шекшуев С.В. Исследование задачи классификации публикаций социальных сетей на предмет выявления положительного отношения. Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2020; 8(3). Доступно по: https://moit.vivt.ru/wp-content/uploads/2020/08/SazonovShekshuev_3_20_1.pdf DOI: 10.26102/2310-6018/2020.30.3.014.
8. XGBoost Documentstion, дата обращения: 06.02.2021, URL: https://xgboost.readthedocs.io/en/latest/.

ABSTRACTS

Plenary reports

PRINCIPLES OF AUTONOMOUS GROUP CONTROL

***V.I. Gorodetsky**, DSc*
e-mail: vladim.gorodetsky@gmail.com
EURECA JSC

Group control problems are currently one of the most noticeable and important trends in the area of intelligent information technologies. These problems have to address in the development of a large number of critical distributed applications of many diverse application areas. However, the modern state-of-the-art of research in this area has not been reached the necessary level of maturity to cope with them. The paper analyses and justifies some fundamental principles of modeling and design of autonomous group control system. These principles take into account the theoretical peculiarities of the problem in question and the requirements formulated by modern hot applications of various scales and classes.

Keywords: group control, behavior, multi-agent system, autonomy, self-organization, situational awareness, active knowledge base.

METHODS AND TECHNOLOGY OF INTELLECTUAL DECISION SUPPORT IN THE UNIFIED INFORMATION SPACE

***V.V. Borisov**, DSc*
e-mail: vbor67@mail.ru
Branch of National Research University "MPEI" in Smolensk
***A.V. Agapov**, DSc*
***D.V. Kotov**, DSc*
Military Academy of the General Staff of the RF Armed Forces

The paper describes a conceptual multi-level model of the unified information space that organically combines the informational, technology, organizational and technical levels. The method of functional-information analysis of decision support processes in the unified information space is proposed. The method of support decision processes in the unified information space is offered. An end-to-end technology for intelligent decision support is developed.

Keywords: unified information space, decision support, intelligent technology.

SUBJECTIVITY AND OBJECTIVITY IN THE WORLD OF MEDICINE: A VIEW FROM THE POSITION OF KNOWLEDGE REPRESENTATION FOR A HYBRID INTELLECTUAL SYSTEM

B.A. Kobrinskii, *DSc*
e-mail: kba_05@mail.ru
Federal Research Center "Computer Science and Control"
of Russian Academy of Sciences

The problem of reducing the subjectivity of knowledge in intelligent systems is considered. Confidence factors accompany the individual characteristics of signs. Visuals with confidence measures of each image complement the linguistic fuzzy rules of the knowledge base. The medical subject area as an example of a hybrid system is used.

Keywords: fuzzy, granularity, confidence factors, image rows engineering, natural images, transformed images, hybrid system.

ONTOLOGICAL INFRASTRUCTURES FOR INTELLECTUAL TASK SOLVING

V.V. Gribova*, DSc*
e-mail: gribova@iacp.dvo.ru
E.A. Shalfeeva*, PhD*
e-mail: gribova@iacp.dvo.ru
IACP FEB RAS

The main problem solved by the authors is to reduce the complexity of creating and maintaining systems with knowledge bases and increase their viability. The authors see its solution in the classification of intellectual tasks, which allows us to determine the place of the task to be solved among the many known tasks and ready-made solutions. Unified formal problem statements provide the basis for finding ready-made solvers and designing reusable system components. The ontological solver, together with the user interface, is repeatedly used for a variety of systems with knowledge bases. It does not depend on the content of knowledge bases, so their completeness and quality can be improved endlessly by integrating with the solver in new and different versions of useful intelligent systems.

Keywords: ontology, knowledge base, intelligent system, ontological solver.

ON THE LOGICAL APPROACH TO OPINIONS' RATIONALITY ANALYSIS

***M.A. Mikheyenkova**, DSc*
e-mail: m.mikheyenkova@yandex.ru
***V.K. Finn**, DSc*
e-mail: ira.finn@gmail.com
Federal Research Center "Computer Science and Control", RAS; RSUH

The paper deals with the formal means to solve one of the tasks of cognitive sociology – the rational aspects study of the respondent's perception of a sociological poll. Objectified criteria for the rationality of a formally defined closed poll are proposed, their dependence on the chosen logical semantics is shown, and the possibilities of expanding the proposed approach based on argumentation semantics are described.

Keywords: cognitive sociology, three-valued logics, argumentation, opinions rationality.

ARTIFICIAL INTELLIGENCE ON BOARD AIRCRAFT

***B.E Fedunov**, DSc*
e-mail: boris_fed@gosniias.ru
State Scientific Center, NIIAS

On board of manned or multifunctional unmanned vehicles are on-board intelligent mission systems (BIS missions) and information and explanatory intelligent systems. Mission systems in the process of performing a flight mission by an aircraft constructively solve the problems of (1) operational goal-setting and (2) designing a way to achieve an operatively assigned flight goal. These tasks arise when a collision "Flight phase in progress - Immediate threat to its implementation" appears at the stage in progress. Information-explanatory intelligent systems solve problems that ensure the solution of mission tasks. They include the following tasks: (1) forming an image of the observed object based on current information from on-board measuring systems, (2) identifying immediate threats among the observed potential threats, (3) identifying a partial loss of operability of the aircraft on-board systems and determining their remaining operability, (4) determination of the degree of crew performance.

Keywords: onboard intelligent systems, onboard intelligent mission systems, knowledge bases, methods for solving problems in them.

FUZZY MODELS IN INTELLIGENCE AND COLLABORATIVE ROBOTICS

***A.S. Yuschenko**, DSc*
e-mail: arkadyus@mail.ru
Bauman Moscow State Technical University

Modern trend in robotics is the collaborative robotic systems which make possible the human-robot collaboration in the same working space using a speech voice dialogue. Such systems are not dangerous for human operator and at the same time don't demand any special competence to control the system. To create such human-robotic system is necessary beforehand to construct a formalized model of system on the base of fuzzy logic technology as the human operator's work is difficult to present using the traditional mathematic models. We try to present the basic fuzzy models of the external world situation, robotic system control and human-operator condition. Such models make it possible to elaborate the collaborative robotic system usable for human without special knowledge in robotics. Such models may be effective both for information exchange as a human-robot dialogue and for their collaboration in complicate operations fulfillment such as medical operations, rescue situations etc. Previous investigations also demonstrate the necessity of psychological investigation in the field under discussion.

Keywords: robots, collaboration, fuzzy logic, linguistic variable, human-operator, neuro-network, control system.

PREDICTIVE ANALYTICS BASED ON FUZZY TIME SERIES

***N.G. Yarushkina**, DSc*
e-mail: jng@ulstul.ru
Ulyanovsk State Technical University

In this paper, we will consider the applicability of the methods of fuzzy time series and ontological engineering in relation to the tasks of predictive analytics. To solve the problems of predictive analytics, new methods are needed, one of which may be granular computing. When using a fuzzy time series, it is advisable to use fuzzy ontologies, which have the following advantages for representing a problem situation and the context of predictive reasoning. A set of methods for forecasting fuzzy time series, including the second kind, is used to build tools for predicting the success of software development projects.

Keywords: predictive analytics, fuzzy ontologies, forecasting fuzzy time series.

SUBJECT-VISUAL REPRESENTATIONS OF SPATIAL RELATIONS IN MODELS OF THE WORLD OF COGNITIVE HYBRID INTELLIGENT SYSTEMS

***A.V. Kolesnikov**, DSc*
e-mail: k_a_p@rbcmail.ru
Immanuel Kant Baltic Federal University
***S.A. Soldatov**, PhD*
e-mail: ssacompany@mail.ru
LLC MTS IT

This paper contains the results of modeling the cognitive mechanisms of schematization of subject-visual, figurative representations of events, situations, modes and states of the control object among operational workers of power grid control centers. For enhance human intelligence in operational work, it is required to develop communication technologies for computer imitation of cognitive formations that expand the mental capabilities of a person – cognitive hybrid intelligent systems.

Keywords: subject-visual representation, cognitive hybrid systems.

EXPLAINABLE ARTIFICIAL INTELLIGENCE: RESULTS AND PERSPECTIVES

***A.N. Averkin**, PhD*
e-mail: averkin2003@inbox.ru
Plekhanov Russian University of Economics

Last achievements in machine learning has led to a new wave of AI applications transportation, security, medicine, finance, defense) that offer tremendous benefits but cannot explain their decisions and actions to human users. DARPA's explainable artificial intelligence (XAI) program endeavors to create AI systems whose learned models and decisions can be understood and appropriately trusted by end users. Realizing this goal requires methods for learning more explainable models, designing effective explanation interfaces, and understanding the psychologic requirements for effective explanations. The XAI developer teams are addressing these challenges by creating ML techniques and developing principles, strategies, and human-computer interaction techniques for generating effective explanations.

Keywords: explainable artificial intelligence, DARPA, black box model, machine learning, explainable model, explainable interface.

FROM EXPLAINABLE ARTIFICIAL INTELLIGENCE TO "UNDERSTANDING" COGNITIVE AGENTS

***V.B. Tarassov**, PhD*
e-mail: valery_tarassov@mail.ru
Bauman Moscow State Technical University

In a narrow sense, eXplainable Artificial Intelligence (XAI) is reduced to eXplainable Machine Learning (XML) based on enhancing main machine learning technologies – Deep Learning Neural Networks–by special graphical or logical tools to form user explanation interfaces in order to provide understanding and trust.
An opposite approach is considered in the paper. It supposes the formation of Man-Machine Hybrid Intelligence systems by a synergy of cognitive and emotional understanding structures. Our approach integrates the logical reasoning tools of understanding with human partner emotional evaluation by facial expression. The concept of linguagraphical variable is introduced.

Keywords: Hybrid Intelligence, Human-Machine Partnership, Understanding, Explanation, Justification, Emotional Interface, Linguagraphical Variable.

Section 1

STAGES OF DEVELOPMENT OF THE METAGRAPH DATA AND KNOWLEDGE MODEL

Y.E. Gapanyuk
e-mail: gapyu@bmstu.ru
Bauman Moscow State Technical University

Among the cognitive models in artificial intelligence, graph models of knowledge representation traditionally play an important role. Currently, models based on complex networks or complex graphs are attracting increased attention. One of the most developed models of this class is the metagraph model. Currently, one of the most developed modifications of the metagraph model is the annotated metagraph model. While the metavertices in this model are primarily intended to describe data and knowledge, the metaedges are more intended to describe processes. Thus, the metagraph model allows describing data, knowledge, and processes within a single model. In order to transform the metagraph model, the agent-function and the metagraph agent are used. The metagraph agent allows you to generate one metagraph based on another (using open rules) or modify the metagraph (using closed rules).

Keywords: complex network, complex graph, emergence, metagraph, metavertex, metaedge, metagraph agent.

METAGRAPHS WITH TEMPORAL-LOGICAL CONSTRAINTS

G.S. Plesnevich*, PhD*
e-mail: salve777@mail.ru
National Research University "MPEI"
V.B. Tarassov*, PhD*
e-mail: vbulbov@yahoo.com
Bauman Moscow State Technical University

The definition of temporal metagraph (T-metagraph) is introduced. Since the function τ, taking in correspondence metagraph vertices with temporal intervals, is partial, this metagraph contains variable vertices. Such a definition means that generally T-metagraph defines a scheme providing specific metagraphs.To express in a formal way constraints imposed to values of temporal variables, two interval logics **IL-1** and **IL-2 are** constructed. It is shown by examples, how the knowledge given by constraints for T-metagraph can be represented in these logics. A deduction method for interval ontologies based on analytic tableau is proposed. The theorem about soundness and completeness for the system of inference rules is formulated.

Keywords: temporal metagraph, interval logic, temporal-logical constraints, interval ontology.

INFERENCE METHOD AND TRAINING OF A NEURO-FUZZY SYSTEM WITH FUZZY INPUTS ON A GPU

***V.G. Sinuk**, PhD*
e-mail: vgsinuk@mail.ru
M.V. Panchenko
e-mail: panchenko.maks@gmail.com
Belgorod State Technological University

The paper deals with the learning process of Mamdani-type fuzzy systems with fuzzy inputs. Parallel computing technologies are used to speed up this process. The paper proposes an evolutionary algorithm that allows you to train a neuro-fuzzy system on a graphics processor unit. Including a model computational experiment.

Keywords: fuzzy systems like Mamdani, fuzzy truth value, evolutionary algorithm, graphics processor unit.

THE PRECEDENT LEARNING METHOD OF FUZZY MODELS BASED ON THE FUZZY BAYESIAN APPROACH

***V.V. Borisov**, DSc*
e-mail: vbor67@mail.ru
E.A. Lyferova
e-mail: elena.67reg@gmail.com
Branch of National Research University "MPEI" in Smolensk

The precedent learning method of fuzzy models based on the fuzzy bayesian approach is proposed. The method allows you to increase the validity of the expert approach to the designing and training of fuzzy models. The method also localizes and changes the required parameters of fuzzy models when new data is received, ensuring the verification of these parameters, with using fuzzy Bayesian networks. An example of using the proposed method for analyze the impact of climate phenomena on the vulnerability of the natural environment is presented.

Keywords: fuzzy model, the precedent learning method, fuzzy Bayesian network.

PROCESS APPROACH TO ORGANIZATION OF INDIVIDUAL AND COLLECTIVE TRAINING OF SPECIALISTS BASED ON FUZZY PETRI NETS

***I.A. Frolov**, PhD*
The RF Armed Forces Army Air Defense Military Academy

The article shows the problem of organizing high-quality individual and collective training of specialists, which consists in the difficulty of organizing and implementing the adaptive process of their training, monitoring the quality of training, at its various stages. An approach to formalization, management of the collective training process and its implementation using process management methods is given. The expediency of using the tool of fuzzy Petri nets for solving this problem has been substantiated. The method of adaptive collective training of specialists has been developed.

Keywords: collective training, process management, individual trajectory of learning, modeling of "business" processes, fuzzy Petri net, method of adaptive collective training.

MANAGEMENT OF INDUSTRIAL AND TECHNICAL PROCESSES OF COMPLEX SYSTEMS BASED ON MODIFIED NEURO-FUZZY PETRI NETS

***A.V. Bobryakov**, DSc*
avbob@mail.ru
National Research University "MPEI"
***A.E. Misnik**, PhD*
anton@misnik.by
Inter-state educational institution of higher education
"Belarusian-Russian university"
S.A. Prokopenko
puss95@yandex.by
National Research University "MPEI"

For effective functioning within a complex system, industrial and technological processes are supported by appropriate information-analytical processes that ensure the collection and analysis of information, as well as modeling and making control decisions for the industrial and technological process. A variety of neuro-fuzzy Petri nets with temporal fuzzy neurons is proposed. An example of constructing a model of a industrial and technological process and the corresponding information-analytical processes is considered. The developed specialized software for modeling of industrial and technological processes and the implementation of information-analytical processes is considered.

Keywords: complex systems, neuro-fuzzy Petri nets, temporal logic.

FUZZY MODELS APPLICATION FOR SOLUTION OF THE MICROGRID PERFORMANCE EVALUATING PROBLEM

Amin K. Abd Elraheem
e-mail: aminkamal90@hotmail.com
***V.A. Shikhin**, PhD*
e-mail: shikhinva@mpei.ru
National Research University "MPEI"

An approach for assessing the required performance of agent-based microgrid, considering multi-objective criteria is proposed. Unified representation of agents is introduced for analyzing various microgrid components in a multi-agent system. Technical, economic and environmental criteria are considered. In order to obtain a generalized solution under taking into account the heterogeneity of the considered criteria fuzzy-models are introduced and used as a tool for scalarizing these criteria.

Keywords: fuzzy logic, microgrids, multi-agent systems, performance evaluation, distributed power generation.

Section 2

THE PROBLEM OF POSSIBILITY-PROBABILITY OPTIMIZATION WITH CONSTRAINTS ON POSSIBILITY/NECESSITY-PROBABILITY AND PROBABILITY-POSSIBILITY/NECESSITY

***A.V. Yazenin**, PhD*
e-mail: yazenin.av@tversu.ru
***I.S. Soldatenko**, PhD*
e-mail: soldis@tversu.ru
Tver State University

The paper continues the study of the problem of possibility-probability linear programming with constraints on the possibility/necessity – probability and probability – possibility/necessity. For the case of normally distributed random and fuzzy factors in the shift-scale representation of fuzzy random variables, an equivalent stochastic analog of the model is constructed. The obtained results are applied to the construction of a minimal risk portfolio in the conditions of hybrid uncertainty.

Keywords: possibility-probability optimization, constraints on possibility/necessity and probability, constraints on probability and possibility/necessity, equivalent deterministic analog, equivalent stochastic analog, fuzzy random variable, strongest t-norm, minimum risk portfolio.

AUTOMATED GENERATION OF ONTOLOGY FOR NL-TEXT DATA SAMPLE

***V.I. Gorodetsky**, DSc*
e-mail: vladim.gorodetsky@gmail.com
EVRICA JSC
***O.N. Tushkanova,** PhD*
e-mail: tushkanova.on@gmail.com
St. Petersburg Federal Research Center of RAS

The paper shares an experience on automated NL-data sample ontology generation. The developed and implemented technology uses semantic resources of Wikipedia semantic resources and Dbpedia Spotlight service. The paper contribution is justified stopping criteria determining semantically admissible ontology generalization level.

Keywords: data ontology, automated design, Dbpedia Spotlight service, ontology generalization, ontology specialization, duality, stopping criteria.

AN APPROACH TO BUILDING A PROBABILISTIC MODEL OF SPREADING A SOCIAL ENGINEERING ATTACK BETWEEN TWO USERS

A.O. Khlobystova
e-mail: aok@dscs.pro
***M.V. Abramov**, PhD*
e-mail: mva@dscs.pro
SPC RAS
***A.L. Tulupyev**, DSc*
e-mail: alt@dscs.pro
SPBU

The article proposes an approach to building probabilistic estimates of the spread of a social engineering attack between two users, which takes into account the informational influence of users. The theoretical significance of the study lies in creating a basis for the subsequent modeling of multi-step social engineering attacks. The practical significance lies in the formation of a base for software automation of identification of the most probable and critical scenarios for the spread of social engineering attacks, and, as a consequence, the creation of a tool that helps decision-makers to take effective measures to eliminate vulnerabilities.

Keywords: social engineering attacks, probabilistic model, informational influence, attack spread estimate.

APPLICATION OF SCENARIO SIMULATION TECHNIQUE FOR PROBABILITY CALCULATIONS OF ELECTORICAL COMPANIES' RESULTS

***A.A. Azarova**, PhD*
e-mail: artur-azarov@yandex.ru
Financial University under the Government of the Russian Federation,
ITMO University
***A.V. Suvorova**, PhD*
e-mail: suvalv@mail.ru
HSE University
***E.V. Brodovskaya**, DSc*
e-mail: brodovskaya@inbox.ru
Financial University under the Government of the Russian Federation
O.V. Vasileva
e-mail: vasiljevaa@mail.ru
SPSU
A.V. Azarova
SPC RAS

The article presents the application of scenario modeling methods to assess the potential for scaling electoral support for political parties through digital communications (communities in social networks). Some metrics from social network groups are used to predict data. Programm complex is developed for experiments execution.

Keywords: scenario modeling, social networks, digital communication.

DEVELOPMENT OF A SYSTEM FOR FINDING EXTREMIST TEXTS

***V.S. Moshkin**, PhD*
e-mail: v.moshkin@ulstu.ru
D.O. Fadeev
e-mail: zloizvyk@gmail.com
***N.G. Yarushkina**, DSc*
e-mail: jng@ulstu.ru
Ulyanovsk State Technical university

The paper describes an algorithm for finding extremist texts in social networks by classifying them. The algorithm includes 3 stages: preprocessing, filtering using dictionaries and text classification based on the Bayesian algorithm. The architecture of the information system and the brief results of the experiments are described.

Keywords: text analysis, social network, Bayesian classifier, classification.

Section 3

ON THE INTEGRATION OF BOTH EXPLANING AND DECISION MODELS BY TAKING INTO ACCOUNT THE PROPERTIES OF THE NEURAL NETWORK

A.V. Pavlov
e-mails: pavlov@phoi.ifmo.ru; avpavlov@itmo.ru
ITMO University

The phenomenon of violation of the classical law of total probability for disjunction of incompatible events is considered on the example of the non-cooperative game Prisoner's Dilemma. The neural network mechanism of the phenomenon is shown, and its model based on the logic of Fourier-dual operations is given. The connection of the filtering parameters in the sensor layer and on the matrix of interconnect weights with the width of the range of violation of the total probability formula is revealed. This connection explains why different neural networks make different decisions under the same conditions and arguments. The theoretical conclusions are confirmed by the simulation results. Thus, the decision-making model is given an explanatory ability without violating the principle "model-free system".

Keywords: Explainable Artificial Intelligence, Quantum Like Cognitive Phenomena, Cognitive Dissonance, Non-cooperative Games, Prisoner's Dilemma, Disjunction, Decision Making, Violation of Total Probability Law.

ON THE RELATIONSHIP OF LOGICAL AND INTUITIVE IN NATURAL LANGUAGE

I.B. Fominykh
e-mail: igborfomin@mail.ru
National Research University "MPEI"

The paper deals with the issues of reflection of the logical and intuitive levels in natural language. The reasons why in NL statements are used more often than negation, and conjunctions – more often than disjunctions are analyzed. The reason lies in the information asymmetry of these operations: assertion and conjunction carry positive information, while negation and disjunction, as a rule, carry negative information. The difficult understanding of negative verbal formulas is connected with the fact that there is usually no sensually tangible concrete image behind them. A negative verbal formula is initially two-valued, i.e. contains both a positive view and its negation, and at the intuitive level the first view is chosen as more informative. In the conclusion, the possibilities of irony are considered as a technique that implements the ability of intuition to choose a representation, the opposite of that to which logic formally points.

Keywords: intuition, logic, assertion, conjunction, negation, disjunction, information asymmetry, irony.

COMPARISON OF THE SPOT MODEL WITH OTHER MODELS FOR QUALITATIVE DATA AND VAGUE OBJECTS

***N.A. Simonov**, PhD*
e-mail: nsimonov@ftian.ru
Valiev Institute of Physics and Technology, RAS

This work analyzes a new mathematical model of spots, which are vague figures and compare it with some other famous models. The main feature of our approach is that both the shape of the spot and its surrounding space are initially unknown. They can be only identified on the base of information about the spot's elementary relations with other spots. We regard that crisp figures are a special limiting case of spots. The suggested model is considered as a mathematical object that is adequate for imaging qualitative data or the semantic aspect in data of any nature and for modeling human perception and reasoning. Although the concept under consideration is substantially new, it shares common ideas with other theories, related to the vagueness aspect, including Region Connection Calculus, Fuzzy Sets, Rough Sets, Soft Sets and Granular Computing.

Keywords: Artificial intelligence, Granular Computing, fuzzy sets, rough sets, soft sets, mental images, vague figures.

SPATIAL MODELING OF RESOURCES, EVENTS AND SITUATIONS IN COMPLEX DYNAMIC SYSTEMS BY METHODS AND INSTRUMENTAL MEANS OF COGNITIVE SEMIOTICS AND GEOINFORMATICS

***A.V. Kolesnikov**, PhD*
e-mail: avkolesnikov@yandex.ru
IPMIT IKBFU
***S.B. Rumovskaya**, PhD*
e-mail: sophiyabr@gmail.com
Kaliningrad Branch of the FRC "Computer Science and Control" of the RAS
***S.A. Soldatov**, PhD*
e-mail: ssacompany@mail.ru
LLC MTS IT
E.V. Jasinski
e-mail: ejasinski96@gmail.com
IPMIT IKBFU

In the paper, we represent the sign spatial modelling of resources, events, and situations in systems with high dynamics of technological processes. An analytical overview of the main directions of spatial modelling is given. It includes topological and algebraic modelling. The subjective and visual coding of the locativeness of static and dynamic resources, events, and situations on the example of spatial modelling of the area of the regional electric power system is considered.

Keywords: cognitive semiotics, spatial modelling, subject-visual coding, static and dynamic resources, events, situations, operational dispatching management.

USE OF PRELIMINARY CLUSTERING METHODS FOR SEARCHING PRECEDENTS

M.V. Fomina
e-mail: m_fomina2000@mail.ru
V.N. Shcherbakova
e-mail: tory.sh@bk.ru
National Research University "MPEI"

This paper provides the problem of increasing the effectiveness of decision-making on the basis of precedents in intelligent systems is considered. The method of preliminary clustering of the use case base with the subsequent construction of a set of decision trees for the obtained clusters is proposed. The results of experiments on the application of the proposed algorithms are given.

Keywords: search for precedents, clustering, decision tree, classification model.

Section 4

METHOD FOR SOFT EVALUATION OF THE DYNAMICS OF THE STUDENT'S THINKING ACTIVITY

***N.N. Filatova**, DSc*
e-mail: nfilatova99@mail.ru
***N.I. Bodrina**, PhD*
e-mail: vavilovani@mail.ru
***K.V. Sidorov**, PhD*
e-mail: bmisidorov@mail.ru
M.E. Voronkov
e-mail: dzharman@rambler.ru
P.D. Klyuev
e-mail: paul.kluev@gmail.com
Tver State Technical University

The issues of the dynamics of the process of changing cognitive activity after emotiogenic stimulation, as well as the duration of the increased level of mental activity, which is established after emotiogenic stimulation, are considered. The average estimates of the central density of attractors reconstructed from EEG signals in leads Cz, P4, P3, C4, C3, Pz were used as signs reflecting the level of cognitive activity. When analyzing the results of experiments, these characteristics are expressed using fuzzy numbers, and make it possible to find approximate estimates for two new coefficients that reflect the direction of the rate of change of the spacecraft. Rules have been drawn up to determine whether the description of patterns of EEG signals belongs to the classes of human cognitive activity, as well as the dynamics of its change during the transition from the current stage of observation to the next.

Keywords: cognitive activity, stimulation of emotions, EEG signal, fuzzy sets, fuzzy inference.

THE USE OF MATLAB FOR WORKING WITH BIG DATA ON THE EXAMPLE OF PROCESSING INFORMATION FROM THE WORLD NETWORK OF MAGNETIC OBSERVATORIES INTERMAGNET

***A.G. Korobeynikov**, DSc*
e-mail: korobeynikov_a_g @mail.ru
SPbF IZMIRAN

In this paper, using the data from the geomagnetic observatory as an example, the use of MATLAB for working with big data using the Datastore is considered. The source text in MATLAB language is presented. It is shown that a user who is not a highly qualified programmer in the MATLAB environment can work with big data using the considered tools.

Keywords: big data, matlab, datastore, tall array, intermagnet.

APPLICATION OF METHODS OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN PROCESSING GEOPHYSICAL DATA RELATED TO DETECTION OF THE SHORE EFFECT IN NATURAL VARIATIONS OF THE ELECTRIC FIELD

V.S. Ismagilov
e-mail: ivs@izmiran.spb.ru
A.G. Korobeynikov
e-mail: korobeynikov_a_g@mail.ru
SPbF IZMIRAN

Applying the methods of the theory of artificial intelligence, a "coastal effect" was discovered in the data of a natural alternating electric field, which consists in an increase in the amplitude of variations in the horizontal component orthogonal to the coast near the coastline. The effect in variations in the electric field is associated with a change in the density of electric charges on the coastline proportional to the variations in the electric field strength.

Keywords: artificial intelligence, deep learning, coastal effect, alternating electric fields.

MONITORING AND DECISION SUPPORT SYSTEM FOR TRAFFIC SAFETY ON BRIDGES

S.S. Koltunov
e-mail: sergeyk94@gmail.com
M.N. Koroleva*, PhD*
e-mail: maria.svyatkina@gmail.com
Bauman Moscow State Technical University

This paper discusses the development of monitoring and decision support system for traffic safety on a long road bridge using a fuzzy inference module based on the Mamdani algorithm. The proposed model allows the user to get a recommendation remotely about the ability to move across the bridge.

Keywords: monitoring system, decision support system, fuzzy logic, data base, traffic safety.

AN ALGORITHM OF THE ATTITUDE ESTIMATION TO A TARGET OBJECT BASED ON ANALYSIS OF SOCIAL MEDIA PUBLICATION INDICATORS BY THE MACHINE LEARNING METHOD

S.V. Shekshuev
e-mail: sergei.shekshuev@gmail.com
Oryol state University of Economics and trade

The article proposes an algorithm based on a method of revealing a positive attitude to social networks publications by classifying them using artificial indicators of social network publications obtained on the basis of the structural and temporal characteristics of them.

Keywords: social media, indicators of social network publications, algorithm.

АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

Абд Эльрахим А.К. 260
Абрамов М.В. 296
Аверкин А.Н. 153
Агапов А.В. 49
Азаров А.А. 305
Азарова В.А. 305
Бобряков А.В. 249
Бодрина Н.И. 378
Борисов В.В. 49, 233
Бродовская Е.В. 305
Васильева О.В. 305
Воронков М.Е. 378
Гапанюк Ю.Е. 190
Городецкий В.И. 16, 284
Грибова В.В. 68
Исмагилов В.С. 395
Клюев П.Д. 378
Кобринский Б.А. 55
Колесников А.В. 129, 348
Колтунов С.С. 403
Коробейников А.Г. 388, 395
Королева М.Н. 403
Котов Д.В. 49
Луферова Е.А. 233
Мисник А.Е. 249
Михеенкова М.А. 78
Мошкин В.С. 314
Павлов А.В. 319
Панченко М.В. 220
Плесневич Г.С. 201
Прокопенко С.А. 249
Румовская С.Б. 348
Сидоров К.В. 378
Симонов Н.А. 337
Синюк В.Г. 220
Солдатенко И.С. 271
Солдатов С.А. 129, 348
Суворова А.В. 305
Тарасов В.Б. 175, 201
Тулупьев А.Л. 296
Тушканова О.Н. 284
Фадеев Д.О. 314
Федунов Б.Е. 90
Филатова Н.Н. 378
Финн В.К 78
Фомина М.В. 369
Фоминых И.Б. 331
Фролов И.А. 241
Хлобыстова А.О. 296
Шалфеева Е.А. 68
Шекшуев С.В. 417
Шихин В.А. 260
Щербакова В.Н. 369
Ющенко А.С. 104
Язенин А.В. 271
Ярушкина Н.Г. 116, 314
Ясинский Э.В. 348

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие ……. 6

ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

Городецкий В.И. Принципы автономного группового управления ……. 16

Борисов В.В., Агапов А.В., Котов Д.В. Методы и сквозная технология Интеллектуальной подготовки и поддержки принятия решений в едином информационном пространстве …… 49

Кобринский Б.А. Субъективность и объективность в мире медицины: взгляд с позиции представления знаний для гибридной интеллектуальной системы …… 55

Грибова В.В., Шалфеева Е.А. Онтологические инфраструктуры для решения интеллектуальных задач …….. 68

Михеенкова М.А., Финн В.К. О логическом подходе к анализу рациональности мнений …….. 78

Федунов Б.Е. Искусственный интеллект на борту летательного аппарата …… 90

Ющенко А.С. Нечеткие модели в интеллектуальной и коллаборативной робототехнике ……... 104

Ярушкина Н.Г. Предиктивная аналитика на основе нечетких временных рядов ……. 116

Колесников А.В., Солдатов С.А. Предметно-изобразительные представления пространственных отношений в моделях мира когнитивных гибридных интеллектуальных систем …… 129

Аверкин А.Н. Объяснимый искусственный интеллект: итоги и перспективы …… 153

Тарасов В.Б. От объяснимого искусственного интеллекта к «понимающим» когнитивным агентам ……. 175

СЕКЦИЯ 1. **НЕЧЁТКИЕ ГРАФЫ, МЕТАГРАФЫ И СЕТИ**

Гапанюк Ю.Е. Этапы развития метаграфовой модели данных и знаний 190

Плесневич Г.С., Тарасов В.Б. Метаграфы с темпорально-логическими ограничениями …… 201

Синюк В.Г., Панченко М.В. Метод вывода и обучение нейро-нечеткой системы с нечеткими входами на графическом процессоре …… 220

Борисов В.В., Луферова Е.А. Метод прецедентного обучения нечетких моделей на основе нечеткого байесовского подхода …… 233

Фролов И.А. Процессный подход к организации индивидуальной и коллективной подготовки специалистов на основе нечетких сетей Петри …… 241

Бобряков А.В., Мисник А.Е., Прокопенко С.А. Управление производственно-техническими процессами в сложных системах на основе нейро-нечётких сетей Петри …….. 249

Абд Эльрахим А.К., Шихин В.А. Фаззи-модели как средство решение задачи оценивания эффективности функционирования микроэнергосистемы ……... 260

СЕКЦИЯ 2. **ВОЗМОЖНОСТНЫЕ И ВЕРОЯТНОСТНЫЕ МОДЕЛИ: ТЕОРИЯ И ПРИЛОЖЕНИЯ**

Язенин А.В., Солдатенко И.С. Задача возможностно-вероятностной оптимизации с ограничениями по возможности/необходимости – вероятности и вероятности – возможности/необходимости …… 271

Городецкий В.И., Тушканова О.Н. Генерация онтологии текстовых данных …….. 284

Хлобыстова А.О., Абрамов М.В., Тулупьев А.Л. Подход к построению вероятностной модели распространения социоинженерной атаки между двумя пользователями …… 296

Азаров А.А., Суворова А.В., Бродовская Е.В., Васильева О.В., Азарова В.А. Применение методики сценарного моделирования для вероятностных расчетов результатов электоральных кампаний …… 305

Мошкин В.С., Фадеев Д.О., Ярушкина Н.Г. Разработка системы нахождения текстов экстремистской направленности …… 314

СЕКЦИЯ 3. **НЕКЛАССИЧЕСКИЕ, ГИБРИДНЫЕ И СИНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ**

Павлов А.В. К вопросу интеграции моделей решения и объясняющей: влияние характеристик элементов нейросети на выбор решения …….. 319

Фоминых И.Б. О соотношении логического и интуитивного в естественном языке …… 331

Симонов Н.А. Сравнение модели пятен с другими моделями качественных данных и размытых объектов …… 337

Колесников А.В., Румовская С.Б., Солдатов С.А., Ясинский Э.В. Пространственное моделирование ресурсов, событий и ситуаций в сложных динамических системах методами и инструментальными средствами когнитивной семиотики и геоинформатики …… 348

Фомина М.В., Щербакова В.Н. Использование методов предварительной кластеризации для поиска прецедентов ……... 369

СЕКЦИЯ 4. **МЯГКИЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ, ИЗМЕРЕНИЯ И ОЦЕНКИ**

Филатова Н.Н., Бодрина Н.И., Сидоров К.В., Воронков М.Е., Клюев П.Д. Метод мягкой оценки динамики мыслительной активности обучаемого 378

Коробейников А.Г. Применение MATLAB для работы с большими данными на примере обработки информации из мировой сети магнитных обсерваторий INTERMAGNET 388

Исмагилов В.С., Коробейников А.Г. Применение методов искусственного интеллекта при обработке геофизических данных, связанных с обнаружением берегового эффекта в естественных вариациях электрического поля 395

Колтунов С.С., Королева М.Н. Система мониторинга и поддержки принятия решений о безопасности движения по автомобильному мосту 403

Шекшуев С.В. Алгоритм оценивания отношения к целевому объекту на основе анализа показателей публикаций социальной сети методом машинного обучения 417

Abstracts 426

Авторский указатель 445

Научное издание

Сборник трудов
X Международной научно-практической конференции
«Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте» ИММВ-2021
Труды конференции в 2-х томах
Том 1

Подписано в печать 12.05.2021 г.
Формат 60x84 1/16. Тираж 300 экз. Усл. печ. л. 26,1.

Издательство «Универсум»

ISBN 978-5-91412-469-1