Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
"САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК"
(СПб ФИЦ РАН)

УДК 004.8
Рег N НИОКТР АААА-А18-118101590068-0
Рег N ИКРБС _____

УТВЕРЖДАЮ
Директор СПб ФИЦ РАН
д.т.н., профессор РАН

_____ А.Л. Ронжин

30.12.2020

ОТЧЕТ

О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

МЕТОДЫ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ, СИНТЕЗА ОЦЕНОК ИСТИННОСТИ И МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ В АЛГЕБРАИЧЕСКИХ БАЙЕСОВСКИХ СЕТЯХ И РОДСТВЕННЫХ МОДЕЛЯХ ЗНАНИЙ С НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЬЮ: ЛОГИКО-ВЕРОЯТНОСТНЫЙ ПОДХОД И СИСТЕМЫ ГРАФОВ

Грант РФФИ № 18-01-00626 А

(заключительный)

Руководитель темы,
гл. н. с., д.ф.-м.н., проф. _____ А.Л. Тулупьев
30.12.2020

Ответственный исполнитель,
ст. науч. сотр., к.т.н. _____ М.В. Абрамов
30.12.2020

Санкт-Петербург 2020 г.

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Гл. науч. сотр., д.ф.-м.н., проф.	_____	30.12.2020 Тулупьев Александр Львович (отчет)
Ст. науч. сотр., к.т.н.	_____	30.12.2020 Абрамов Максим Викторович (отчет)
Ст. науч. сотр., к.пс.н., доц.	_____	30.12.2020 Тулупьева Татьяна Валентиновна (отчет)
Ст. науч. сотр., к.ф.-м.н.	_____	30.12.2020 Сироткин Александр Владимирович (отчет)
Ст. науч. сотр., к.ф.-м.н.	_____	30.12.2020 Суворова Алёна Владимировна (отчет)
Ст. науч. сотр., к.ф.-м.н.	_____	30.12.2020 Фильченков Андрей Александрович (отчет)
Мл. науч. сотр.	_____	30.12.2020 Харитонов Никита Алексеевич (отчет)
Мл. науч. сотр.	_____	30.12.2020 Максимов Анатолий Григорьевич (отчет)
Мл. науч. сотр.	_____	30.12.2020 Завалишин Арсений Дмитриевич (отчет)
Мл. науч. сотр.	_____	30.12.2020 Хлобыстова Анастасия Олеговна (отчет)
Мл. науч. сотр.	_____	30.12.2020 Корепанова Анастасия Андреевна (отчет)
Мл. науч. сотр.	_____	20.11.2018 Бушмелев Федор Витальевич (отчет)
Стажер-исследователь, к.ф.-м.н.	_____	30.12.2020 Золотин Андрей Алексеевич (отчет)
Стажер-исследователь	_____	30.12.2020 Мальчевская Екатерина Андреевна (отчет)
Стажер-исследователь	_____	30.12.2020 Левенец Даниил Григорьевич (отчет)

РЕФЕРАТ

Отчет 51 с., 101 источник, 3 прил.

ВЕРОЯТНОСТНЫЕ ГРАФИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ, БАЙЕСОВСКИЕ СЕТИ, СИНТЕЗ ГЛОБАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ, ЛОГИКО-ВЕРОЯТНОСТНЫЙ ВЫВОД, СОЦИОИНЖЕНЕРНЫЕ АТАКИ

Проект поддержан грантом РФФИ № 18-01-00626, отчет представлен за весь период реализации проекта.

Объектом исследования являются алгебраические байесовские сети и родственные модели баз фрагментов знаний с неопределенностью. **Целью** проекта является развитие теории алгебраических байесовских сетей и родственных моделей как части решения фундаментальной проблемы моделирования и формирования методов обработки данных и знаний с неопределенностью. **Методология** проекта основывается на предложенном и апробированном в рамках предшествующих проектов использовании сочетания логико-вероятностного подхода и вероятностных графических моделей для эффективного представления знаний с неопределенностью, а также проведения логико-вероятностного вывода на основе таких знаний.

Работа в исследовании велась по пяти основным направлениям: 1) изучение локального логико-вероятностного вывода; 2) изучение глобального логико-вероятностного вывода; 3) работа с глобальными структурами алгебраических байесовских сетей; 4) исследование подходов к слиянию нескольких алгебраических байесовских сетей; 5) изучение родственных вероятностных графических моделей и областей возможного применения алгебраических байесовских сетей.

Были предложены цепная и звездчатая структуры алгебраической байесовской сети и алгоритмы их построения. Были получены эмпирические оценки чувствительности первой и второй задач локального апостериорного вывода. Были преложены методы частотного и параметрического локального обучения алгебраических байесовских сетей. Доказана теорема о том, как меняются параметры распределения Дирихле при переходе от априорного к апостериорному распределению вероятностей на квантах. Разработаны оптимизированные алгоритмы поддержания всех степеней непротиворечивости алгебраических байесовских сетей, использующие параллельные вычисления. Сформулированы подходы к изолированным слияниям фрагментов знаний, изучена сложность поддержания интернальной непротиворечивости получающейся сети. Описан явный вид решений задачи поддержания локальной непротиворечивости для небольших фрагментов знаний. Разработаны алгоритмы для глобального априорного вывода. В глобальных структурах решена задача по определению, является ли семейство деревьев семейством минимальных графов смежности. В рамках работы с родственными графическими моделями рассмотрены особенности применения байесовских сетей доверия для оценки параметров социально-значимого поведения, исследован потенциал применения алгебраических байесовских сетей в задачах оценки степени защищенности пользователей информационных систем от социоинженерных атак. Разработаны программные модули, реализующие предложенные алгоритмы.

Опубликованы 67 работ (из них 1 WoS, 28 Scopus, 11 ВАК, 40 РИНЦ, 1 учебник, 2 учебных пособия, 1 монография). Получено 25 свидетельств о регистрации ПрЭВМ (Роспатент).

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ . . . 6

1 Чувствительность оценок апостериорного локального логико-вероятностного вывода . . . 16

2 Синтез глобальных структур алгебраической байесовской сети . . . 16

3 Компаративный анализ алгебраических байесовских сетей и байесовских сетей доверия . . . 16

4 Слияние алгебраических байесовских сетей . . . 17

5 Экстернальная непротиворечивость алгебраических байесовских сетей . . . 17

6 Интернальная непротиворечивость алгебраических байесовских сетей . . . 18

7 Использование параллельных вычислений в теории алгебраических байесовских сетей . . . 18

8 Мета-профиль пользователя в задачах защищенности пользователя от социоинженерных атак . . . 19

9 Байесовские сети доверия для моделирования социально-значимого поведения . . . 19

10 Параллельные алгоритмы для поддержания локальной непротиворечивости . . . 20

11 Частотный подход к локальному машинному обучению . . . 20

12 Изолированное слияние фрагментов знаний . . . 20

13 Идентификация семейств минимальных графов смежности в семействах деревьев . . . 21

14 Графы производных графов смежности . . . 21

15 Топологические индексы молекулярного графа сульфида кадмия . . . 22

16 Эмпирические оценки чувствительности локального апостериорного вывода . . . 22

17 Глобальный априорный вывод . . . 22

18 Аналитические решения в задаче поддержания локальной непротиворечивости . . . 23

19 Локальное параметрическое обучение: самосопряженные распределения и экспертные знания с неопределенностью . . . 23

ЗАКЛЮЧЕНИЕ . . . 24

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Перечень грантов, заказанных НИР, контрактов, хоздоговоров, которыми поддерживались исследования по данной НИР . . . 27

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Список публикаций в рамках проекта . . . 28

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Список программ для ЭВМ, алгоритмов и баз данных, разработанных на основе результатов, полученных в НИР . . . 38

Список используемой литературы . . . 41

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И ОПРЕДЕЛЕНИЙ

В настоящем отчете о НИР применяют следующие сокращения и обозначения.

Алгебраическая байесовская сеть (АБС) — вероятностная графическая модель (ВГМ), одним из представлений которой является ненаправленный идеал с фрагментами знаний в узлах.

Фрагмент знаний (ФЗ) — идеал конъюнктов с приписанными им скалярными или интервальными оценками вероятности истинности.

Логико-вероятностный вывод (ЛВВ) — совокупность процессов, подразумевающих работу с оценками вероятности в алгебраических байесовских сетях. Выделяется три вида ЛВВ: 1) априорный — оценка вероятности пропозициональной формулы на основе оценок вероятности конъюнктов алгебраической байесовской сети; 2) апостериорный — изменение оценок в алгебраической байесовской сети на основе поступившей пропозициональной формулы с оценкой вероятности ее истинности (свидетельства); 2) поддержание непротиворечивости — изменение оценок вероятности истинности конъюнктов таким образом, чтобы сохранялась вероятностная семантика АБС. Также ЛВВ разделяется на локальный (в рамках одного ФЗ) и глобальный (в рамках всей АБС)

ЗЛП — задача линейного программирования

Система математических объектов, определений, понятий и обозначений приведена в Приложении Г.

ВВЕДЕНИЕ

Настоящий отчет о НИР (заключительный) содержит сведения о результатах заключительного этапа работы над проектом № 18-01-00626, поддержанным грантом РФФИ.

Актуальность. Интенсивное развитие информационных технологий в настоящее время влечет за собой порождение существенных объемов данных. Согласно сведениям, опубликованным аналитической фирмой IDC, объем данных к 2025 году увеличится в 10 раз по отношению к 2016 и достигнет 163 зеттабайт [1]. Такое количество накопленной информации естественным образом приводит к необходимости ее анализа, что подтверждается наблюдаемым ростом в развитии и применении методов искусственного интеллекта и машинного обучения.

Часто данные, которые необходимо анализировать, обладают неточностью, неполнотой, нечеткостью получаемой информации. Кроме этого, сам объем получаемых данных достаточно велик, работа с ними обладает высокой вычислительной сложностью. Для преодоления проблем, связанных с высокой вычислительной сложностью, в информатике и искусственном интеллекте часто используется декомпозиция знаний, разбиение их на меньшие части.

Алгебраические байесовские сети являются одной из моделей машинного обучения, относящейся к классу вероятностных графических моделей, и позволяющей анализировать имеющиеся знания о предметной области. Одним из базовых принципов, используемых при построении и обучении алгебраических байесовских сетей, является описанная выше декомпозиция знаний о предметной области на меньшие части, имеющие тесные связи внутри себя и слабо связанные между собой. Математической моделью таких частей выступают фрагменты знаний (математически представляемые в виде идеалов конъюнктов с сопоставленными им оценками вероятностей). Связи между фрагментами знаний представляются в виде графа (при этом выделяется несколько уровней представлений: вторичная, третичная и четвертичная структуры). Для удобства понимания процессы, происходящие внутри фрагмента знаний, называются локальными, а процессы, затрагивающие всю алгебраическую сеть, — глобальными.

Под процессами, происходящими в алгебраической байесовской сети, подразумевается логико-вероятностный вывод над вероятностными графическими моделями. Как было отмечено выше, он разделяется на локальный и глобальный. Такое разделение позволяет произвести оптимизацию аппарата: наиболее сложные и затратные вычислительные операции производятся над фрагментами знаний, которые имеют малое число элементов (среди них — решение систем линейных уравнений и матрично-векторные преобразования). При этом вычислительная сложность операций глобального логико-вероятностного вывода над всей сетью сравнима со сложностью операций локального в отдельно взятом фрагменте знаний.

В рамках алгебраический байсовских сетей используется следующая трактовка объекта исследования искусственного интеллекта: объектом является математическая модель совокупности знаний эксперта о предметной области. Здесь алгебраические байесовские сети напрямую следуют позиции Дж. Перла, утверждающего, что мнение эксперта может характеризовать от одной до четырех сущностей и связи между ними, что находит отражение в числе атомарных высказываний, на основе которых строится фрагмент знаний. Таким образом, алгебраические байесовские сети предоставляют математический аппарат, позволяющий структурировать экспертные знания и использовать зависимости между высказываниями для дальнейшего использования ее в качестве экспертной системы.

Кроме малого числа объектов, описываемых мнением эксперта, последнему присуща неточность, оценочность суждений. Эта особенность экспертных знаний нашла свое отражение в модели алгебраических байесовских сетей, основной особенностью которых является способность обрабатывать неточные (интервальные) оценки вероятностей элементов. Они служат для интерпретации как естественных языковых конструкций (использующих такие выражения, как “вероятно”, “возможно”, “примерно”, “около”), так и для отображения присущей знаниям неполноты, неточности информации.

Наконец, байесовские сети доверия, являющиеся родственными моделями по отношению к алгебраическим байесовским сетям, нашли широкое применения в различных областях прикладной науки (медицина, биология, инженерия), при этом усилия по формированию сети в каждом индивидуальном случае оказываются весьма значительными.

В свою очередь алгебраические байесовские сети за счет иерархической архитектуры глобальных структур позволяют гибко оперировать данными как в рамках алгоритма синтеза указанных структур, так и на уровне уравнений логико-вероятностного вывода.

Таким образом, алгебраические байесовские сети позволяют работать с неточными, неполными данными за счет манипуляции интервальными оценками вероятностей, использовать декомпозицию предметной области для оптимизации вычислений, гибко оперировать данными при синтезе структур, а также имеют развитый аппарат локального и глобального логико-вероятностного вывода и синтеза структур, что делает их актуальным и перспективным направлением развития искусственного интеллекта.

Интеллектуальные системы принятия решений базируются на нескольких идеологических подходах, в том числе:

1. Системы типа «IF-THEN» (продукционные системы) [**7**]. Они строятся на основе определенного набора правил, зачастую вербализованных, которые определяют истинность одних утверждений на основе истинности других. В таких системах существенно осложняется задание стохастических закономерностей, когда истинность одних утверждений не приводит к истинности других, но существенно увеличивает ее вероятность.

2. Системы, построенные на моделях вероятностной логики, такие как байесовские сети доверия [**9, 10**] или марковские сети [**11**]. Такие системы эффективно используют оценки вероятности истинности, но при этом возникают заметные проблемы при поступлении противоречивой, неточной или нечисловой информации. Указанные системы требуют, чтобы были заданы точечные оценки вероятностей, в то время как при поступлении нечисловой или неточной информации требуется использование интервальных оценок; сведение нечисловой или неточной информации к набору точечных оценок зависит от сиюминутных невоспроизводимых субъективных оценок эксперта.

3. Системы, построенные на основе различных мер истинности, таких как мера доверия и правдоподобия, необходимости и возможности, или семействе нечетких мер, в частности, на мерах Сугено [**20**]. К недостаткам данного вида систем часто относят отсутствие «физического смысла», стоящего за получаемыми оценками, а также то, что указанные системы недостаточно хорошо учитывают структуру взаимоотношений между различными элементами системы знаний.

4. Системы, основанные на стохастическом моделировании (например, по Гиббсу) предметной среды по заданным параметрам. К недостаткам данных систем можно отнести высокую сложность оценки надежности, воспроизводимости или достоверности получаемых результатов [**23**].

5. Различные гибридные системы, сочетающие несколько выше названных подходов. Несмотря на то, что такие системы могут сочетать положительные качества нескольких подходов, согласование получаемых разными путями выводов, оценок или заключений становится затруднительным, поскольку, в первую очередь, требует согласованного использования весьма разных теоретических аппаратов [**21, 22, 74**].

В свою очередь можно заметить, что эти подходы условно разделяются по преобладающему аспекту отражения особенностей системы знаний на два класса. Первый класс состоит из «сетевых» подходов, которые достаточно успешно справляются с представлением причинно-следственной структуры над всей доступной системой знаний о предметной области (к ним относятся, например, байесовские сети доверия и продукционные системы). Второй класс состоит из подходов, «оперирующих оценками истинности над фрагментом знаний» (т.е. над небольшим набором утверждений о предметной области, связи между которыми можно охарактеризовать достаточно полно). Подходы второго класса снабжены глубоко проработанным теоретическим аппаратом мер истинности утверждений (например, вероятностная мера в рамках вероятностной логики и парадигмы неточных вероятностей (imprecise probabilities), нечеткие меры, меры доверия и правдоподобия, меры необходимости и возможности).

Хотя первый класс подходов успешно справляется с «сетевыми» аспектами представления знаний, он имеет определенные затруднения в представлении их неопределенности. Например, в байесовских сетях доверия не рассматриваются систематически интервальные оценки вероятности, в них невозможно использовать иные упоминавшиеся выше меры неопределенности истинности. В продукционных системах аппарат обработки неопределенностей носит, как правило, «присоединенный характер»; в отношении этого аппарата не решен вопрос о получаемых в результате вычислений оценках истинности — насколько они соответствуют аксиоматике изначально выбранной меры истинности. Во втором классе подходов достаточно тщательно изучаются математиче-

ские свойства мер истинности в условиях, когда они определены над небольшим числом атомарных утверждений о предметной области, т.е., фактически, над «фрагментом знаний», однако, как правило, ничего не говорится о том, как представлять и обрабатывать несколько фрагментов знаний, как делать вывод на основе всех имеющихся фрагментов знаний о предметной области.

В рамках проектов за 2009–2018 гг. коллективом исследователей был получен значительный объем фундаментальных математических результатов и результатов из области теоретических основ информатики, относящихся к теории байесовских сетей, представленный ниже. Значительная часть из них доведена до публикации в научных журналах или трудах конференций; все представлены в приложениях к отчетам по грантам.

1. Дано описание фрагмента знаний (ФЗ) и сопутствующих параметров(векторы оценок вероятностей истинности элементов) алгебраической байесовской сети на матрично-векторном языке как для классического представления (идеал конъюнктов) [**75**], так и для альтернативных моделей (идеал дизъюнктов, множество пропозиций-квантов) [**12**]. Кроме того предложены матрицы для перехода между указанными моделями [**13**].

2. На матрично-векторном языке формализованы алгоритмы следующих видов логико-вероятностного вывода для фрагмента знаний: поддержание непротиворечивости фрагмента знаний, априорный вывод [**14**] и апостериорный вывод (пропагация свидетельств) [**15**].

3. Разработан прототип комплекса программ, реализующий указанные выше алгоритмы логико-вероятностного вывода для фрагмента знаний [**5**].

4. Предложен подход к представлению глобальной структуры АБС в виде графа смежности (или его подвидов: дерева, цепи, цикла смежности), в узлах которого расположены идеалы конъюнктов со скалярными или интервальными оценками вероятности [**16**].

5. Предложен подход к обучению фрагментов знаний алгебраической байесовской сети (локальному обучению) на основе разнородных неполных недоопределенных данных и знаний [**17**].

6. Формализована задача автоматического обучения глобальной структуры АБС (структурного синтеза АБС) по известному набору фрагментов знаний; предложен инкрементальный и декрементальный подход к решению указанной задачи [**72**, **82**].

7. Предложен способ повышения точности апостериорного вывода в частном случае. Решение серии задач линейного программирования заменяется при этом на решение серии задач квадратичного программирования [**25**].

8. Предложена классификация всех возможных вторичных структур алгебраических байесовских сетей. Предложены алгоритмы для построения хотя бы одной минимальной по числу ребер вторичной структуры, а также алгоритм, строящий все возможные вторичные структуры над заданным набором фрагментов знаний [**18**].

9. Развиты предложенные ранее методы локального параметрического обучения и создан прототип комплекса программ для построения оценок фрагмента знаний на основе выборок.

10. Обобщены матрично-векторные уравнения, возникающие в анализе направленного цикла в байесовских сетях доверия, на случай многозначных переменных в БСД [**75**].

11. Предложен способ представления бинарных линейных по структуре скрытых марковских моделей в виде алгебраических байесовских сетей. На основе такого представления решение первой задачи СММ (оценка правдоподобности серии наблюдений) сведена к решению задачи пропагации детерминированного свидетельства в АБС [**24**].

12. Даны оценки вычислительной сложности алгоритмов локального логико-вероятностного вывода в АБС со скалярными оценками вероятностей его элементов [**75**].

13. Предложены и реализованы в прототипах комплекса программ способы визуализации алгебраических байесовских сетей [**19**].

Следует отметить, что ряд предложенных подходов требует своего развития, что нашло отражение в изложении задач настоящего проекта.

Фрагмент знаний АБС используется для представления, агрегации и обработки знаний с неопределенностью посредством ряда операций логико-вероятностного вывода: поддержания и проверки непротиворечивости, априорного вывода, апостериорного вывода, причем в последнем допускается использование как детерминированных свидетельств, так и стохастических и неточных свидетельств, компоненты которых мо-

гут быть зависимыми. Результаты в области автоматического обучения создают возможность использования АБС в случаях, когда знания извлекаются не из экспертов, а из иных источников.

Однако многие из полученных результатов, создавшие значительный задел в исследованиях алгебраических байесовских сетей и родственных им моделей, могут быть углублены и уточнены с учетом современного понимания структур и механизмов функционирования алгебраических байесовских сетей как логико-вероятностных моделей баз фрагментов знаний с неопределенностью. Более того, в ходе исследований открылись новые проблемы, которые требуют своего решения для развития теории алгебраических байесовских сетей и вероятностных графических моделей в целом.

Данный проект ориентирован на развитие теории алгебраических байесовских сетей за счет решения комплекса проблем и задач, связанных с алгоритмами логико-вероятного вывода и автоматического обучения в интеллектуальных системах поддержки принятия решений на основе неточной, неполной, нечисловой информации, представленной в виде вероятностных графических моделей систем знаний с неопределенностью, генетических взаимосвязей между такими моделями, а также математическая формализация полученных результатов. Полученные результаты обладают новизной, находятся на мировом уровне.

Основной целью проекта является развитие теории алгебраических байесовских сетей и родственных моделей как части решения фундаментальной проблемы моделирования и формирования методов обработки данных и знаний с неопределенностью. Предложенное и апробированное в рамках ранних проектов использование логико-вероятностного подхода и представления на основе вероятностных графических моделей уже доказало возможность эффективного представления знаний с неопределенностью, а также проведения логико-вероятностного вывода на основе таких знаний.

Непосредственная близость рассматриваемых алгебраических байесовских сетей с иными вероятностными графическими моделями, такими как байесовские сети доверия, скрытые марковские сети, вероятностные булевские сети ставит перед коллективом цель анализа генетических взаимосвязей между указанными моделями, их соотношение и потенциальные возможности преобразования.

Отдельной целью является развитие методов выявления, представления и эффективной визуализации ключевых структур моделей, особенно сильно влияющих на проводимый вывод. Это особенно важно в области построения систем поддержки принятия решений.

Наконец, еще одной особой целью является изучение с математической (в широком смысле) точки зрения тех моделей, объектов, представлений, алгоритмов, которые возникают при достижении первых двух указанных целей, причем с учетом контекста, позволяющего сформулировать дополнительные ожидаемые особенности (или накладываемые ограничения) в отношении изучаемых объектов, а значит — ожидать выявления особых подклассов таких объектов с важными для достижения цели проекта свойствами.

Для достижения указанного комплекса целей были сформулированы следующие задачи.

В рамках заключительного года работы над проектом:

— Изучить эмпирические оценки чувствительности локального апостериорного вывода, как естественное продолжение исследований оценок чувствительности логико-вероятностного вывода.

— Продолжить исследование задач глобального логико-вероятностного вывода, в частности априорного вывода.

— Исследовать вопрос оптимизации имеющихся подходов к поддержанию локальной непротиворечивости алгебраической байесовской сети.

— Развить имеющиеся подходы к обучению алгебраических байесовских сетей на наборе имеющихся данных.

— Рассмотреть распределение вероятностей квантов в алгебраической байесовской сети, получаемой в процессе обучения.

— Неизменная задача изучения отечественной и зарубежной литературы, научный поиск новых методов, областей и подходов в теории алгебраических байесовских сетей, а также подготовка финального отчета по проделанной работе.

В рамках второго года над проектом:

— Подробно исследовать вопрос слияния алгебраических байесовских сетей и как локальные, так и глобальные свойства получаемой в результате сети. Развитие

вопроса слияния алгебраических байесовских сетей является одним из важных вопросов их машинного обучения.

— Разработать методы параллельного исполнения алгоритмов логико-вероятностного вывода, а также реализовать их в рамках комплекса программ для проведения дальнейших статистических экспериментов по выявлению их эффективности.

— Продолжить исследования структур алгебраических байесовских сетей второго и высших порядков, а именно алгоритмов их генерации и свойств.

— Продолжить анализ чувствительности алгоритмов локального и глобального логико-вероятностного вывода.

— Развить исследования родственных графических моделей, в том числе байесовских сетей доверия.

— Обеспечить развитие математических основ теории алгебраических байесовских сетей и родственных моделей для обеспечения возможности их использования в рамках фундаментальных исследований по проблемам защиты и оценок защищенности от социоинжереных атак.

— Неизменными неэлиминируемыми задачами, выполняемыми коллективом на протяжении всего проекта, являются изучение отечественной и зарубежной литературы, подготовка отчетов, научный поиск новых методов, областей и подходов в теории алгебраических байесовских сетей.

В рамках первого года работы над проектом:

— Для развития локального логико-вероятностного вывода в алгебраических байесовских сетях была поставлена задача изучения чувствительности апостериорного вывода во фрагментах знаний над пропозициями-квантами.

— Изучение и оптимизация алгоритмов поддержания непротиворечивости является задачей, поставленной как в рамках развития глобального логико-вероятностного вывода, так и в рамках изучения возникающих в ходе исследования моделей и алгоритмов.

— Кроме того, в рамках работ с глобальными структурами была выдвинута задача нахождения таких структур алгебраических байесовских сетей, которые могут

быть легко масштабируемы и использованы не только в структурных исследованиях, но и в исследованиях в области логико-вероятностного вывода.

— При исследовании существующих структур была выдвинута задача формулировки возможных подходов к слиянию (гибридизации) нескольких алгебраических байесовских сетей.

— Наконец, важной является задача изучения родственных моделей и возможностей практического использования алгебраических байесовских сетей.

Отчет составлен по результатам выполнения НИР, поддержанной грантом РФФИ № 18-01-00626 (Приложение А).

Результаты первого года выполнения проекта

1 Чувствительность оценок локального логико-вероятностного вывода

Рассмотрена чувствительность первой задачи апостериорного вывода в фрагментах знаний над пропозициями-квантами. Сформулированы 4 задачи линейного программирования — 2 для случая детерминированного и 2 для стохастического свидетельства, решение которых дает точную оценку чувствительности рассматриваемых уравнений. Кроме того, предложена накрывающая оценка чувствительности, не требующая крупных вычислений. Полученные в работе оценки доказывают применимость и корректность предложенных уравнений. Проведены статистические эксперименты, которые показывают степень чувствительности рассмотренного уравнения, что дает оценку порядка точности входных данных, необходимого для получения предполагаемого результата (Приложение Д, Е). Полученные результаты являются новыми и позволяют в дальнейшем перейти к рассмотрению чувствительности второй задачи апостериорного вывода.

2 Синтез глобальных структур алгебраической байесовской сети

В рамках работы с глобальной структурой алгебраических байесовских сетей исследованы особенности цепной и звездчатой структур. Описаны алгоритмы построения данных структур. Проведены вычислительные эксперименты, сравнивающие эмпирическую вычислительную сложность данных алгоритмов (Приложение Ж). Полученные структуры имеют значение для экспериментального аппарата в части проекта, посвященной логико-вероятностному выводу, за счет своей естественной масштабируемости. Ранее не было предложено легко масштабируемых моделей алгебраических байесовских сетей с указанными типами структуры.

3 Компаративный анализ алгебраических байесовских сетей и байесовских сетей доверия

В рамках работы с глобальной структурой алгебраических байесовских сетей, а также анализа родственных моделей, был проведен компаративный анализ алгебраических байесовских сетей и байесовских сетей доверия. Анализ показал, что в алгебраических

байесовских сетях можно провести операцию слияния, в отличие от байесовских сетей доверия. Операция слияния опирается на новый алгоритм поддержания непротиворечивости, отличающийся от ранее изученных алгоритмов поддержания тем, что он подразумевает формирование накрывающей непротиворечивой оценки (по возможности, минимальной в одном из формальных смыслов), в то время как последние обеспечивают формирование подпирающей непротиворечивой оценки, причем максимальной по включению (Приложение И). В рамках вероятностного, логико-вероятностного и т.д. подходов в отношении байесовских сетей и родственных моделей фундаментальная проблема слияния систем ставится впервые.

4 Слияние алгебраических байесовских сетей

Сформулирована задача и предложены «кандидаты» в методы синтеза согласованной системы вероятностных оценок формул высказываний для двух разных частично перекрывающихся наборов знаний. Методы продемонстрированы на примере двух алгебраических сетей с одним пересечением. Описаны положительные и отрицательные стороны каждого «кандидата» в методы, сформулированы дальнейшие задачи в данном направлении исследований (Приложение К). Подходы к слиянию алгебраических байесовских сетей ранее не рассматривались. Проведенная работа открывает широкий спектр исследований, начинающийся с формализации представленных подходов и распространении их на большее число алгебраических байесовских сетей.

5 Экстернальная непротиворечивость алгебраических байесовских сетей

Проведены вычислительные эксперименты, позволившие получить эмпирические оценки времени поддержания экстернальной непротиворечивости алгебраических байесовских сетей в зависимости от числа атомов в сети, а также во фрагментах знаний и на их пересечениях (Приложение Л). Ранее были предложены только теоретические оценки, эмпирические оценки сложности вычислены впервые. Полученные в рамках исследования результаты имеют важное значение для алгебраических байесовских сетей со скалярными оценками, для которых из экстернальной непротиворечивости следуют интернальная и глобальная.

6 Интернальная непротиворечивость алгебраических байесовских сетей

Представлены результаты исследований, направленных на оптимизацию поддержания непротиворечивости алгебраической байесовской сети за счет сокращения числа переменных и избыточных условий согласования в задачах линейного программирования, решаемых в алгоритме поддержания интернальной непротиворечивости. Сформулирован алгоритм и теоремы, описывающие сложность его работы. Также проведены вычислительные эксперименты, демонстрирующие преимущество использования интернальной непротиворечивости по отношению к глобальной, а также различия в его времени работы при различных видах алгебраических байесовских сетей (Приложения М, Н). Оптимизация алгоритма интернальной непротиворечивости имеет большое значение для алгебраических байесовских сетей с интервальными оценками, для которых в случае их ацикличности (а любую алгебраическую байесовскую сеть возможно привести к ацикличному виду) из интернальной непротиворечивости следует и глобальная.

7 Использование параллельных вычислений в теории алгебраических байесовских сетей

Выдвинуты подходы к использованию параллельных вычислений при поддержке экстернальной и интернальной непротиворечивости (Приложение Л, М). Подходы к параллелизации алгебраических байесовских сетей ранее не рассматривались. При этом за счет своей структуры последние являются легко декомпозируемыми, и, как следствие, параллельные вычисления видятся одним из продуктивных путей оптимизации работы с алгебраическими байесовскими сетями. Дальнейшим направлением исследований в этой области являются проведение практических экспериментов и исследование подходов к параллельному исполнению априорного и апостериорного логико-вероятностного вывода.

8 Мета-профиль пользователя в задачах защищенности пользователя от социоинженерных атак

Предложены три подхода к решению задачи выбора наиболее вероятной конфигурации параметров мета-профиля пользователя. В качестве источника информации рассматриваются аккаунты сотрудников компании и их друзей в социальных сетях. Рассмотренные подходы закладывают основу для проведения соответствующих экспериментов, выработке новых алгоритмов и дальнейшего использования алгебраических байесовских сетей для решения поставленной задачи (Приложение П). Также данные подходы были реализованы в качестве модуля для программного прототипа и протестированы, показав высокий уровень точности. Полученные методы и, главное, их автоматизация позволят оперативно получать информацию о мета-профиле пользователя в социальной сети, необходимой для дальнейших работ в рамках задачи социоинженерных атак. Например, получение профиля уязвимостей пользователей, критичных траекторий, вероятности передачи атаки и многое другое.

9 Байесовские сети доверия для моделирования социально-значимого поведения

Рассмотрен пример применения аппарата теории байесовских сетей доверия для решения задачи моделирования социально-значимого поведения и оценки его численных характеристик. Рассмотрены преимущества и недостатки подобного подхода при ограниченности и неполноте исходных данных. Исследованы варианты сочетания экспертных знаний и статистических данных при построении модели. Показано, что предложенная модель показывает хорошие результаты качества предсказания и допускает различные расширения. В целом предлагаемая модель на основе байесовской сети доверия показала высокое качество прогнозирования и обладает большим потенциалом для анализа реальных проблем, связанных с оцениванием поведения (Приложение Р).

Результаты второго года выполнения проекта

10 Параллельные алгоритмы для поддержания локальной непротиворечивости

Предложены подходы к использованию параллельных вычислений при поддержке локальной непротиворечивости во фрагментах знаний со скалярными и интервальными оценками вероятностей (Приложение Д). Подходы к параллелизации алгоритмов для алгебраических байесовских сетей ранее рассматривались только для экстернальной и интернальной непротиворечивости. При этом последние в силу своей структуры являются легко декомпозируемыми, и, как следствие, параллельные вычисления видятся одним из продуктивных путей оптимизации работы с алгебраическими байесовскими сетями. Предложенные подходы реализованы. Проведены эксперименты, показывающие их эффективность. Дальнейшим направлением исследований в этой области являются проведение практических экспериментов и исследование подходов к параллельному исполнению априорного и апостериорного логико-вероятностного вывода.

11 Частотный подход к локальному машинному обучению

Предложен метод частотного локального обучения во фрагменте знаний алгебраической байесовской сети по данным с пропусками, реализован алгоритм обучения (Приложение Т). Начальные данные для обучения представляются в виде набора атомов и соответствующих им означиваний. Предложенный метод был протестирован на искусственных и реальных данных из социальных сетей. Ранее не производилось обучения алгебраических байесовских сетей на данных с пропусками. Дальнейшей работой в этом направлении является исследование подходов к обучению всей алгебраической байесовской сети.

12 Изолированное слияние фрагментов знаний

Сформулированы подходы к изолированным слияниям фрагментов знаний. Выделено четыре типа слияний, которые различаются подходами к получению оценок и типом поддержания непротиворечивости полученной сети. Также сформулированы утверждения о числе элементов в получаемой сети и сложности поддержания ее интернальной

непротиворечивости (Приложение У). Таким образом, получили развитие ранее предложенные концепции слияния алгебраических байесовских сетей, представленных в виде фрагментов знаний. Дальнейшими работами в данном направлении является изучение путей слияния структурно более сложных сетей.

13 Идентификация семейств минимальных графов смежности в семействах деревьев

Решена задача по определению, является ли семейство деревьев семейством МГС. Ответом на поставленную задачу является необходимое и достаточное условие отсутствие неудлиняющего пути графа (Приложение З). Также было введено определение дополнительности графа и был получен критерий дополнительности графа (Приложение К). Было показано, что любое дерево, которое является неудлиняющим пути, является также дополнительным, и обратно. В будущем планируется разработать и оценить алгоритм решения системы пересечений–вложений (иначе говоря, алгоритм построения такой первичной структуры, в которой исходное семейство являлось бы семейством МГС), алгоритмы поиска неудлиняющих пути графов, а также более внимательно изучить операции релаксации и серии релаксаций.

14 Графы производных графов смежности

Предложено обобщение графа производной на магистрально связные графы и показана корректность этого обобщения (Приложение И, К). Было установлено, что свойство магистральной связности сохраняется при переходе к графу производной. Стоит отметить, что для малых графов, обладающих магистральной связностью, верно, что образ графа при восстановлении из графа производной совпадает с исходным графом. Ближайшей целью теперь является поиск способа априорно определить, является ли "интеграл" графа магистрально связным, или, что то же самое, найти инварианты в графах производных графов смежности.

15 Топологические индексы молекулярного графа сульфида кадмия

Продемонстрировано практическое приложение теории графов как подраздела теоретических основ информатики в решении одной из междисциплинарных задач — описании структуры молекулы сульфида кадмия, как потенциальный вариант глобальной структуры АБС, с применением методов и индексов хемиоинформатики (Приложение Л). Были вычислены индексы (ABC), геометрический и арифметический индексы GA, обобщенный индекс Рандича, GA5 и ABC4, загребские индексы для химического графа сульфида кадмия (CdS).

Результаты заключительного года выполнения проекта

16 Эмпирические оценки чувствительности локального апостериорного вывода

Был предложен и проведен эксперимент по нахождению эмпирической зависимости между вариацией новых данных поступающих во фрагмент знаний и вариациями решений второй задачи апостериорного вывода во фрагменте знаний (Приложение Щ). Эмпирические оценки, полученные в ходе выполнения эксперимента говорят о том, что норма разницы фрагментов знаний после решения второй задачи локального апостериорного вывода не превосходит нормы разницы поступающих на вход свидетельств, на которых для которых решалась задача.

17 Глобальный априорный вывод

Был предложен и обоснован алгоритм решения задачи глобального априорного вывода в случае скалярных оценок во фрагментах знаний и АБС с экстернальной непротиворечивостью и в случае интервальных оценок и АБС с глобальной непротиворечивостью, иначе говоря, алгоритм нахождения оценки вероятности истинности пропозициональной формулы при условии построенной непротиворечивой АБС. Кроме того была показана адекватность априорного вывода, а также было доказано, что оценки, получаемые методом, предложенным в алгоритме, совпадают с оценками, получаемыми локальным априорным выводом в объемлющем всю сеть фрагменте знаний (Приложение Э). Реше-

ние задачи глобального априорного вывода позволит оценивать вероятность истинности любой формулы построенной над АБС. Ранее это можно было сделать исключительно при помощи локального априорного вывода, однако было ограничение на алфавит, над которым была построена формула. Теперь этого ограничения нет, что значительно расширяет количество формул, вероятность истинности которых можно оценить имея сформированную АБС.

18 Аналитические решения в задаче поддержания локальной непротиворечивости

Были разработаны и доказаны решения в явном виде для задачи поддержания локальной непротиворечивости во фрагменте знаний с малым числом переменных, а также проведено сравнение их эффективности с симплекс-методом (Приложение Ю). Эксперимент продемонстрировал, что предложенный подход дает существенный выигрыш по времени даже для двух переменных. Полученные результаты открывают новые возможности для исследования чувствительности алгебраических байесовских сетей, а также существенно ускоряют поддержание локальной непротиворечивости.

19 Локальное параметрическое обучение: самосопряженные распределения и экспертные знания с неопределенностью

Рассмотрено параметрическое локальное обучение алгебраических байесовских сетей (Приложение Я). Приведено описание процесса обучения и доказана теорема о том, что получаемое в результате распределение оценок вероятностей квантов будет описываться распределением Дирихле. Работа с конкретным распределением вероятностей позволяет исследовать новые, ранее не изученные свойства алгебраических байесвоских сетей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные в данном отчете результаты дополняют, расширяют, развивают и открывают новые направления исследований в теории алгебраических байесовских сетей. Кроме того, часть результатов, основанных на применении алгебраических байесовских сетей и родственных моделей, развивает вероятностный подход в задачах оценки степени защищенности персонала информационных систем от социоинженерных атак.

На заключительном этапе работы над проектом достигнуты следующие результаты:

— Получены эмпирические оценки чувствительности локального апостериорного вывода, сформулированы утверждения о норме разницы фрагментов знаний после решения второй задачи локального апостериорного вывода.

— Предложен и обоснован алгоритм нахождения оценки вероятности истинности пропозициональной формулы при условии построенной непротиворечивой алгебраической байесовской сети.

— Разработаны и доказаны решения в явном виде для задачи поддержания локальной непротиворечивости во фрагменте знаний с малым числом переменных, а также проведено сравнение их эффективности с симплекс-методом.

— Рассмотрено параметрическое локальное обучение алгебраических байесовских сетей.

— Сформулирована и доказана теорема о том, что получаемое в результате параметрическое локальное обучения распределение оценок вероятностей квантов будет описываться распределением Дирихле.

За второй годы работы получены результаты:

— Проведён анализ применения параллельных алгоритмов для сокращения времени для проверки интернальной непротиворечивости.

— Подсчитаны топологические индексы для химического графа сульфида кадмия.

— Исследовано влияние перехода к графу производной для глобальных структур АБС.

— Решена задача о нахождении семейств графов для которых существует набор нагрузок, семейство МГС над которым в точности совпадает с заданным.

— Проведён эксперимент, в рамках которого, был обучен фрагмент знаний на несовершенной информации из социальных сетей.

— Сформулированы подходы к изолированным слияниям фрагментов знаний, утверждения о числе элементов в получаемой сети и сложности поддержания ее интернальной непротиворечивости.

Результаты, полученные за первый год работы над проектом:

— Была рассмотрена чувствительность первой задачи апостериорного вывода в фрагментах знаний над пропозициями-квантами, проведены соответствующие статистические эксперименты.

— Произведена оптимизация алгоритма поддержания интернальной непротиворечивости и теоретическая оценка времени его работы. Для алгоритмов поддержания экстернальной и интернальной непротиворечивости найдены эмпирические временные оценки. Предложены подходы к оптимизации алгоритмов путем использования параллельных вычислений.

— Предложены цепная и звездчатая структуры алгебраической байесовской сети и алгоритмы их построения. Проведены вычислительные эксперименты.

— Предложены и проиллюстрированы примером два подхода гибридизации (слияния) алгебраических байесовских сетей.

— В рамках работы с родственными моделями приведены примеры применения соответствующих методов в решении социально-ориентированных задач. В частности, рассмотрены особенности применения байесовских сетей доверия для оценки параметров социально-значимого поведения и исследован потенциал применения алгебраических байесовских сетей для представления интервальных оценок вероятностей системы событий, рассматриваемых при решении задач оценки степени защищенности от социоинженерных атак.

В результате выполнения проекта получены новые, ранее не опубликованные результаты.

Теоретическая значимость представленных в данном отчете результатов заключается в расширении, развитии и открытии новых направлений исследований в теории алгебраических байесовских сетей.

Практическая значимость представленных в данном отчете результатов заключается в поиске и расширении возможностей применения алгебраических байесовских сетей в развитии вероятностного подхода в задачах оценки степени защищенности персонала информационных систем от социоинженерных атак.

Отраженные в отчете теоретические результаты были опубликованы или приняты к публикации в российских рецензируемых журналах, а также представлены на российских и международных конференциях разного уровня (40 публикаций с индексацией РИНЦ, из них 11 в изданиях из перечня ВАК, 28 публикаций с индексацией Scopus, 1 публикация с индексацией в WoS), опубликованы 1 учебник, 2 учебных пособия, 1 монография (Приложение Б). Кроме того, теоретические и алгоритмические разработки (как в части тематики алгебраических байесовских сетей, так и части родственных моделей сложных систем знаний с неопределенностью) частично реализованы в ряде программ — компонент комплекса программ, с помощью которого производятся вычислительные эксперименты; часть указанных компонент прошла регистрацию в качестве программ для ЭВМ в Роспатенте (25 регистраций) (Приложение В). Математические формулировки определений и обоснование результатов приведены в Приложениях Г—Я.

Таким образом, задачи исследования выполнены, а цель проекта — достигнута.

ПРИЛОЖЕНИЕ А
Перечень грантов, заказанных НИР, контрактов, хоздоговоров, которыми поддерживались исследования по данной НИР

1. Грант РФФИ, проект № 18-01-00626 — «Методы представления, синтеза оценок истинности и машинного обучения в алгебраических байесовских сетях и родственных моделях знаний с неопределенностью: логико-вероятностный подход и системы графов», руководитель А.Л. Тулупьев.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б
Список публикаций в рамках проекта

1. *Zolotin A.A., Tulupyev A.L.* Sensitivity Statistical Estimates for Local A Posteriori Inference Matrix-Vector Equations in Algebraic Bayesian Networks over Quantum Propositions // Vestnik St. Petersburg University, Mathematics. 2018. Vol. 51. № 1. P. 42–48. DOI: 10.3103/S1063454118010168. (WoS, Scopus, ВАК)
2. *Хлобыстова А.О., Абрамов М.В., Тулупьев А.Л., Золотин А.А.* Поиск кратчайшей траектории социоинженерной атаки между парой пользователей в графе с вероятностями переходов // Информационно-управляющие системы. 2018. № 6. С. 74–81. DOI: 10.31799/1684-8853-2018-6-74-81. (Scopus, ВАК)
3. *Золотин А.А., Тулупьев А.Л.* Оценка чувствительности уравнений локального апостериорного вывода в алгебраических байесовских сетях над пропозициями-квантами // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 1. Математика. Механика. Астрономия. 2018. Т. 63. № 1. С. 55–64. (ВАК)
4. *Суворова А.В., Смирнова К.Р., Будин Е.А., Тулупьева Т.В., Тулупьев А.Л., Абрамов М.В.* Исследовательский проект как инструмент обучения методам анализа текста: предсказание класса поста в социальной сети // Компьютерные инструменты в образовании. 2018. № 3. С. 49–64. DOI: 10.32603/2071-2340-3-49-64. (ВАК)
5. *Харитонов Н.А.* Поддержание интернальной непротиворечивости алгебраических байесовских сетей с линейной и звездчатой структурой: статистические оценки сложности // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2018. Т 6. С. 1108–1117. DOI: 10.17586/2226-1494-2018-18-6-1108-1117. (ВАК)
6. *Malchevskaya E., Kharitonov N., Zolotin A., Abramov M.* External Consistency Maintenance Algorithm for Chain and Stellate Structures of Algebraic Bayesian Networks: Statistical Experiments for Running Time Analysis // International Conference on Intelligent Information Technologies for Industry. Springer, Cham. 2018. P. 23–30. DOI: 10.1007/978-3-030-01821-4_3. (Scopus)

7. *Suvorova A., Tulupyev A.* Learning Bayesian Network Structure for Risky Behavior Modelling // International Conference on Intelligent Information Technologies for Industry. Springer, Cham. 2018. P. 58–65. DOI: 10.1007/978-3-030-01821-4_7. (Scopus)
8. *Toropova A.* Synthesis and learning of socially significant behavior model with hidden variables // International Conference on Intelligent Information Technologies for Industry. Springer, Cham. 2018. P. 76–84. DOI: 10.1007/978-3-030-01821-4_9. (Scopus)
9. *Suvorova A.* Exploring Bayesian belief network for risky behavior modelling: discretization and latent variables // Proceedings of the II International Scientific and Practical Conference "Fuzzy Technologies in the Industry — FTI 2018". CEUR Workshop Proceedings. 2018. P. 63–70. (Scopus)
10. *Tulupyev A., Kharitonov N., Zolotin A.* Algebraic Bayesian networks: consistent fusion of partially intersected knowledge systems // Proceedings of the II International Scientific and Practical Conference "Fuzzy Technologies in the Industry — FTI 2018". CEUR Workshop Proceedings. 2018. Vol. 2258. P. 109–115. (Scopus)
11. *Абрамов М.В., Тулупьева Т.В., Тулупьев А.Л.* Социоинженерные атаки: социальные сети и оценки защищенности пользователей // РИЦ ГУАП. 2018. 300 С.
12. *Мальчевская Е.А., Столярова В.Ф.* Чувствительность оценки вероятности свидетельства локального апостериорного вывода в алгебраических байесовских сетях: вычислительные эксперименты // XXI Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям. Т. 1. С. 89–92. (РИНЦ)
13. *Столярова В.Ф.* Моделирование копулы зависимости длин интервалов между последовательными эпизодами поведения индивида в гамма-пуассоновской модели // XXI Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям. Т. 1. С. 122–125. (РИНЦ)
14. *Харитонов Н.А., Березин А.И.* Синтез математического представления ациклической алгебраической байесовской сети // XXI Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям. Т. 1. С. 141–143. (РИНЦ)
15. *Бушмелев Ф.В., Харитонов Н.А.* Использование байесовских сетей при анализе защищенности пользователей информационных систем от социоинженерных атак // Региональная информатика (РИ–2018). XVI Санкт-Петербургская междунаро-

ная конференция «Региональная информатика (РИ-2018)». (Санкт-Петербург, 24–26 октября 2018 г.): Материалы конференции. СПб: СПОИСУ, 2018. С. 544–545.

16. *Тулупьев А.Л.* Логико-вероятностный подход к слиянию систем знаний с неопределенностью на основе алгебраических байесовских сетей // Региональная информатика (РИ–2018). XVI Санкт-Петербургская международная конференция «Региональная информатика (РИ-2018)». (Санкт-Петербург, 24–26 октября 2018 г.): Материалы конференции. СПб: СПОИСУ, 2018. С. 552–554.
17. *Харитонов Н.А.* Использование параллельных вычислений при поддержке непротиворечивости алгебраических байесовских сетей // Региональная информатика (РИ–2018). XVI Санкт-Петербургская международная конференция «Региональная информатика (РИ-2018)». (Санкт-Петербург, 24–26 октября 2018 г.): Материалы конференции. СПб: СПОИСУ, 2018. С. 558–559.
18. *Харитонов Н.А., Тулупьев А.Л.* Возможные подходы к слиянию и гибридизации алгебраических байесовских сетей // Региональная информатика (РИ–2018). XVI Санкт-Петербургская международная конференция «Региональная информатика (РИ-2018)». (Санкт-Петербург, 24–26 октября 2018 г.): Материалы конференции. СПб: СПОИСУ, 2018. С. 559–560.
19. *Харитонов Н.А.* Алгоритм построения неоднородной математической структуры алгебраических байесовских сетей // Информационные технологии в управлении. 2018. С. 77–79. (РИНЦ)
20. *Абрамов М.В., Тулупьев А.Л., Тулупьева Т.В.* Агрегирование данных из социальных сетей для восстановления фрагмента мета-профиля пользователя // Шестнадцатая Национальная конференция по искусственному интеллекту с международным участием КИИ–2018. Т. 1. С. 189–197. (РИНЦ)
21. *Тулупьев А.Л.* Алгебраические байесовские сети: локальный логико-вероятностный вывод. Учебное пособие // Изд. 2-е, перераб. и дополн. СПб.: ВВМ. 2019. 138 с.
22. *Тулупьев А.Л.* Алгебраические байесовские сети: глобальный логико-вероятностный вывод в деревьях смежности. Учебное пособие // Изд. 2-е, перераб. и дополн. СПб.: ВВМ. 2019. 108 С.

23. *Тулупьев А.Л., Николенко С.И., Сироткин А.В.* Основы теории байесовских сетей: учебник // СПб.: Изд-во С.-Петерб. ун-та. 2019. 399 С.

24. *Kharitonov N.A., Maximov A.G., Tulupyev A.L.* Algebraic Bayesian Networks: Naïve Frequentist Approach to Local Machine Learning Based on Imperfect Information from Social Media and Expert Estimates // Artificial Intelligence. RCAI 2019. Communications in Computer and Information Science. Springer, Cham. 2019. P. 234–244. DOI: 10.1007/978-3-030-30763-9_20. (Scopus)

25. *Харитонов Н. А., Тулупьев А. Л.* Алгебраические байесовские сети: изолированное слияние фрагментов знаний в условиях дефицита информации // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2019. Т. 19. № 4. С. 641–649. DOI: 10.17586/2226-1494-2019-19-4-641-649. (ВАК)

26. *Khlobystova A.O., Abramov M.V., Tulupyev A.L.* An approach to estimating of criticality of social engineering attacks traces //International Conference on Information Technologies. Springer, Cham. 2019. P. 446-456. DOI: 10.1007/978-3-030-12072-6_36. (Scopus)

27. *Хлобыстова А.О., Абрамов М.В., Тулупьева Т.В., Тулупьев А.Л.* Социальное влияние на пользователя в социальной сети: типы связей в оценке поведенческих рисков, связанных с социоинженерными атаками // Управленческое консультирование. 2019. № 3. С. 104–117. DOI: 10.22394/1726-1139-2019-3-104-117. (ВАК)

28. *Хлобыстова А.О., Абрамов М.В., Тулупьев А.Л.* Подход наибольшего правдоподобия к задаче выявления траекторий социоинженерных атак и скомпрометированных пользователей информационных систем // Системы управления, связи и безопасности. 2019. № 3. С. 202–219. DOI: 10.24411/2410-9916-2019-10310. (ВАК)

29. *Абрамов М.В., Тулупьев А.Л., Тулупьева Т.В.* Психологические особенности, психические состояния пользователя и профиль его уязвимостей в контексте социоинженерных атак //Психология психических состояний: сб. статей студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых. Казань. 2019. №. 978-5. С. 312–317. (РИНЦ)

30. *Khlobystova A.O., Abramov M.V., Tulupyev A.L.* Soft Estimates for Social Engineering Attack Propagation Probabilities Depending on Interaction Rates Among Instagram Users

//International Symposium on Intelligent and Distributed Computing. Springer, Cham. 2019. P. 272–277. DOI: 10.1007/978-3-030-32258-8_32. (Scopus)

31. *Abramov M.V., Tulupyev A.L.* Soft estimates of user protection from social engineering attacks: fuzzy combination of user vulnurabilities and malefactor competencies in the attacking impact success prediction // Communications in Computer and Information Science. 2019. P. 47–58. DOI: 10.1007/978-3-030-34518-1_4. (Scopus)
32. *Корепанова А.А., Абрамов М.В., Тулупьева Т.В.* Идентификация аккаунтов пользователей в социальных сетях «Вконтакте» и «Одноклассники» // Семнадцатая Национаьная конференция по искусственному интеллекту с международным участием КИИ-2019. 2019. С. 153–163. (РИНЦ)
33. *Корепанова А.А., Тулупьева Т.В.* Идентификация аккаунтов пользователя в различных социальных сетях по социальному окружению //Информационная безопасность регионов России (ИБРР-2019). XI Санкт-Петербургская межрегиональная конференция. Санкт-Петербург, 23-25 октября 2019 г.: Материалы конференции / СПОИСУ. 2019. С. 442–443. (РИНЦ)
34. *Корепанова А.А.* Сопоставление пользовательских аккаунтов на основе поведенческих паттернов//Информационная безопасность регионов России (ИБРР-2019). XI Санкт-Петербургская межрегиональная конференция. Санкт-Петербург, 23-25 октября 2019 г.: Материалы конференции / СПОИСУ. 2019. С. 441–442.
35. *Хлобыстова А.О., Абрамов М.В.* Распределение прав доступа в системе как мера понижения вероятности успеха социоинженерной атаки //Информационная безопасность регионов России (ИБРР-2019). XI Санкт-Петербургская межрегиональная конференция. Санкт-Петербург, 23-25 октября 2019 г.: Материалы конференции / СПОИСУ. 2019. С. 454–455.
36. *Kharitonov N.A., Maximov A.G., Tulupyev A.L.* Algebraic Bayesian networks: parallel algorithms for maintaining local consistency // International Conference on Intelligent Information Technologies for Industry. Springer, Cham, 2019. P. 214–222. DOI: 10.1007/978-3-030-50097-9_22. (Scopus)

37. *Максимов А. Г. , Завалишин А. Д. , Абрамов М. В. , Тулупьев А. Л.* Семейства деревьев смежности и критерий дополнительности // Компьютерные инструменты в образовании. 2020. №. 1. С. 28–37. DOI: 10.32603/2071-2340-2020-1-28-37. (ВАК)

38. *Максимов А. Г. , Завалишин А. Д. , Абрамов М. В. , Тулупьев А. Л.* Хемоинформатика: приложения информатики в анализе химических структур (на примере сульфида кадмия) //Компьютерные инструменты в образовании. 2019. №. 4. С. 44–54. DOI: 10.32603/2071-2340-2019-4-44-54. (ВАК)

39. *Максимов А. Г. , Завалишин А. Д. , Абрамов М. В. , Тулупьев А. Л.* Графы производных в глобальных структурах алгебраических байесовских сетей // Компьютерные инструменты в образовании. 2020. №. 2. С. 59–65. DOI: 10.32603/2071-2340-2020-2-59-65. (ВАК)

40. *Khlobystova A.O., Abramov M.V., Tulupyev A.L.* Employees' social graph analysis: a model of detection the most criticality trajectories of the social engineering attack's spread // International Conference on Intelligent Information Technologies for Industry. Springer, Cham, 2019. P. 198–205. DOI: 10.1007/978-3-030-50097-9_20. (Scopus)

41. *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 // International Conference on Intelligent Information Technologies for Industry. Springer, Cham, 2019. P. 206–213. DOI: 10.1007/978-3-030-50097-9_21. (Scopus)

42. *Торопова А.В., Тулупьева Т.В.* Байесовская сеть доверия как модель оценки интенсивности поведения на примере постинга в социальной сети // Сборник докладов XXIII Международной конференции по мягким вычислениям и измерениям (SCM-2020). М. СПб: СПбГЭТУ «ЛЭТИ». С. 20–22. (РИНЦ)

43. *Завалишин А.Д., Тулупьев А.Л., Максимов А.Г.* Алгебраические байесовские сети: эмпирические оценки чувствительности второй задачи локального апостериорного вывода // Сборник докладов XXIII Международной конференции по мягким вычислениям и измерениям (SCM-2020). М. СПб: СПбГЭТУ «ЛЭТИ». С. 29–31. (РИНЦ)

44. *Максимов А.Г., Тулупьев А.Л., Завалишин А.Д.* Алгебраические байесовские сети: сложность проверки непротиворечивости // Сборник докладов XXIII Международной конференции по мягким вычислениям и измерениям (SCM-2020). М. СПб: СПбГЭТУ «ЛЭТИ». С. 32–34. (РИНЦ)

45. *Хлобыстова А.О., Абрамов М.В., Тулупьева Т.В.* Применение метода вероятностей альтернатив при построении оценок интенсивности взаимосвязей // Сборник докладов XXIII Международной конференции по мягким вычислениям и измерениям (SCM-2020). М. СПб: СПбГЭТУ «ЛЭТИ». С. 35–38. (РИНЦ)

46. *Корепанова А.А., Олисеенко В.Д., Абрамов М.В.* Применимость коэффициентов сходства в задаче сравнения социального окружения // Сборник докладов XXIII Международной конференции по мягким вычислениям и измерениям (SCM-2020). М. СПб: СПбГЭТУ «ЛЭТИ». С. 39–42. (РИНЦ)

47. *Toropova A. V., Tulupyeva T. V.* Bayesian BeliefNetwork as a Behavior Intensity Rate Model on the Example of Posting in a Social Network //2020 XXIII International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM). IEEE, 2020. P. 22–24. DOI: 10.1109/SCM50615.2020.9198795. (Scopus)

48. *Zavalishin A. D., Tulupyev A. L., Maksimov A. G.* Algebraic Bayesian Networks: Empirical Estimates of the Sensitivity of Local Posteriori Inference //2020 XXIII International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM). IEEE, 2020. P. 31–33. DOI: 10.1109/SCM50615.2020.9198792. (Scopus)

49. *Maksimov A. G., Tulupyev A. L., Zavalishin A. D.* Algebraic Bayesian Networks: the Complexity of Consistency Checking //2020 XXIII International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM). IEEE, 2020. P. 34–36. DOI: 10.1109/SCM50615.2020.9198771. (Scopus)

50. *Khlobystova A. O., Abramov M. V., Tulupyeva T. V.* Application of the Altematives Method Probabilities in Construction of Intensity of User Communications Estimates //2020 XXIII International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM). IEEE, 2020. P. 37–40. DOI: 10.1109/SCM50615.2020.9198751. (Scopus)

51. *Korepanova A. A., Oliseenko V. D., Abramov M. V.* Applicability of Similarity Coefficients in Social Circle Matching //2020 XXIII International Conference

on Soft Computing and Measurements (SCM). IEEE, 2020. P. 41–43. DOI: 10.1109/SCM50615.2020.9198782. (Scopus)

52. *Завалишин А.Д., Максимов А.Г.* Верхняя теоретическая оценка решения второй задачи локального апостериорного вывода в алгебраических байесовских сетях // 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. 120–127. (РИНЦ)

53. *Максимов А.Г., Завалишин А.Д., Тулупьев А.Л.* Оценка сложности алгоритма построения минимального графа смежности // 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. 128–134. (РИНЦ)

54. *Харитонов Н.А., Тулупьев А.Л.* Локальное параметрическое обучение алгебраических байесовских сетей // 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. 110–119. (РИНЦ)

55. *Олисеенко В.Д., Корепанова А.А.* Восстановление возраста пользователей: анализ сообществ // 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 2 – Смоленск: Универсум, 2020. С. 147–153. (РИНЦ)

56. *Бушмелев Ф.В., Абрамов М.В., Тулупьева Т.В.* Адаптированный метод цветовых выборов в применении к изображениям из социальных медиа // 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 2 – Смоленск: Универсум, 2020. С. 154–163. (РИНЦ)

57. *Торопова А.В., Тулупьева Т.В.* Модели оценки интенсивности поведения на примере постинга в социальной сети // 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 2 – Смоленск: Универсум, 2020. С. 164–172. (РИНЦ)

58. *Хлобыстова А.О., Абрамов М.В.* Применение гибридных моделей при разграничении прав доступа в контексте социоинженерных атак // 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 2 – Смоленск: Универсум, 2020. С. 173–179. (РИНЦ)

59. *Krylov B.S., Abramov M.V.* Automatic Hierarchical Task Network Planning System for the Unity Engine Russian // Conference on Artificial Intelligence. Springer, Cham, 2020. P. 122–1133. (Scopus)

60. *Toropova A.V., Tulupyeva T.V.* Learning Behavior Rate Models on Social Network Data // Conference on Artificial Intelligence. Springer, Cham, 2020. P. 200–209. (Scopus)

61. *Khlobystova A.O., Tulupyev A.L.* Approaches To Merging Linguistic Values - Users Relationships // Conference on Artificial Intelligence. Springer, Cham, 2020. P. 210–218. (Scopus)

62. *Kharitonov N.A., Tulupyev A.L.* Local Parameter Training of Algebraic Bayesian Networks: Conjugate Distributions and Expert Knowledge with Uncertainty // Conference on Artificial Intelligence. Springer, Cham, 2020. P. 219–226. (Scopus)

63. *Maksimov A.G., Zavalishin A.D.* On Analytical Solutions to the Problems of Maintaining Local Consistency // Russian Conference on Artificial Intelligence. Springer, Cham, 2020. P. 152–163. DOI: 10.1007/978-3-030-59535-7_11. (Scopus)

64. *Maksimov A.G., Zavalishin A.D., Tulupyev A.L.* Global a priori inference in algebraic Bayesian networks // International Conference on Information Technologies. Springer, Cham, 2020. P. 391–403. DOI: 10.1007/978-3-030-65283-8_32. (Scopus)

65. *Zavalishin A.D., Maksimov A.G., Tulupyev A.L.* Upper theoretical estimate of solving the second problem of local a posteriori inference in algebraic Bayesian networks //

International Conference on Information Technologies. Springer, Cham, 2020. P. 404–410. DOI: 10.1007/978-3-030-65283-8_33. (Scopus)

66. *Krylov B., Abramov M., Khlobystova A.* Automated player activity analysis for a serious game about social engineering // International Conference on Information Technologies. Springer, Cham, 2020. P. 587–599. DOI: 10.1007/978-3-030-65283-8_48. (Scopus)

67. *Toropova A.V., Tulupyeva T.V.* Comparison of Behavior Rate Models Based on Bayesian Belief Network // International Conference on Information Technologies. Springer, Cham, 2020. P. 587–599. DOI: 10.1007/978-3-030-65283-8_42. (Scopus)

ПРИЛОЖЕНИЕ В
Список программ для ЭВМ, алгоритмов и баз данных, разработанных на основе результатов, полученных в НИР

1. *Слезкин Н.Е., Сулейманов А.А., Абрамов М.В., Тулупьев А.Л., Тулупьева Т.В.* User Data Aggregation for Social Engineering Attacks Modeling Version 02 (SocND Aggregator v.02) (Свидетельство). Свид. о госуд. регистрации № 2018615900(17.05.2018). Роспатент.
2. *Березин А.И., Зотов М.А., Золотин А.А., Тулупьев А.Л.* Algebraic Bayesian Network Minimal Join Graph Set Statistics, Version 01 for CSharp (AlgBN MJGS S cs.v.01). Свид. о госуд. регистрации № 2018615779(16.05.2018). Роспатент.
3. *Торопова А.В., Хайбуллин Р.Р., Суворова А.В., Тулупьев А. Л.* Программа для диагностики согласованности исходных данных в модели социально-значимого поведения (Input Data Coherence Diagnostics in Behaviour Model, Version 01 (IDCDiBM v.01)). Свид. о госуд. регистрации № 2018615722(15.05.2018). Роспатент.
4. *Мальчевская Е.А., Тулупьев А.Л.* Algebraic Bayesian Network Deterministic Evidence Local Propagator, Version 01 for CSharp (AlgBN DEL Propagator cs.v.01). Свид. о госуд. регистрации № 2018615600(11.05.2018). Роспатент.
5. *Сулейманов А.А., Слезкин Н.Е., Абрамов М.В., Тулупьев А.Л. Тулупьева Т.В.* Employees Social Graph Analyzer for Social Engineering Attacks Modeling Java Version 01 (ESGA for SEA Modeling j.v.01). Свид. о госуд. регистрации № 2018615561(10.05.2018). Роспатент.
6. *Акульшина О.Д., Суворова А.В., Тулупьев А.Л.* Respondents Imprecise Initial Data Analyzer, Version 01 for R (RIIDAnalyzer, r.v.01). Свид. о госуд. регистрации № 2018615388(08.05.2018). Роспатент.
7. *Шляк А.В., Золотин А.А., Тулупьев А.Л.* Algebraic Bayesian Network Virtual Evidence Propagators, Version 01 for CSharp (AlgBN VE Propagators, cs.v.01). Свид. о госуд. регистрации № 2018612634 (21.02.2018). Роспатент.

8. *Харитонов Н.А., Тулупьев А.Л.* Algebraic Bayesian Networks External and Internal Reconciler, Version 01 for CSharp (AlgBN E&L Reconciler, cs.v.01). Свид. о госуд. регистрации № 2018612405 (16.02.2018). Роспатент.
9. *Мальчевская Е.А., Тулупьев А.Л.* Algebraic Bayesian Network Local Reconciler, Version 01 for CSharp (AlgBN L Reconciler, cs.v.01). Свид. о госуд. регистрации № 2018612407 (16.02.2018). Роспатент.
10. *Сулейманов А.А., Абрамов М.В., Тулупьев А.Л.* Employees Social Interactions Graph Analyzer for Social Engineering Attacks Modeling Version 01 (ESIGA For SEA Modeling, v.01). Свид. о госуд. регистрации № 2018612149 (13.02.2018). Роспатент.
11. *Слезкин Н.Е., Абрамов М.В., Тулупьев А.Л.* User Data Aggregation for Social Engineering Attacks Modeling Version 01 (SocND Aggregator v.01) Свид. о госуд. регистрации № 2018612147 (13.02.2018). Роспатент.
12. *Золотин А.А., Тулупьев А.Л.* Система визуализации интерфейсов и структур данных алгебраических байесовских сетей Algebraic Bayesian Network Web Implementation of Interfaces an Data Structure Visualization, Version 01 for Javascript (AlgBN WI I&DSV, js.v.01). Свид. о госуд. регистрации № 2018612140 (13.02.2018). Роспатент.
13. *Березин А.И., Тулупьев А.Л.* Algebraic Bayesian Network Minimal Join Graph Set Lazy Constructor, Version 01 for CSharp (AlgBN MJGS LC, cs.v.01). Свид. о госуд. регистрации № 2018612148 (13.02.2018). Роспатент.
14. *Шиндарёв Н.А., Абрамов М.В., Тулупьев А.Л.* Parsing Employees Pages in Websites of Social Network for Social Engineering Attacks Modeling Version 01 (PEP in WSSN, v.01). Свид. о госуд. регистрации № 2018612139 (13.02.2018). Роспатент.
15. *Харитонов Н.А., Тулупьев А.Л.* Algebraic Bayesian Networks Math Structure Synthesizer, Version 01 for CSharp (AlgBN MSS cs.v.01) (Свидетельство). Свид. о гос. рег. прогр. для ЭВМ. Рег. № 2019612060 (08.02.2019). Роспатент.
16. *Максимов А.Г., Завалишин А.Д., Абрамов М.В., Тулупьев А.Л.* Not/and/or Expression Simplifier Version 01 (n/a/o ExpSimp v.01) (Свидетельство). Свид. о гос. рег. прогр. для ЭВМ. Рег. № 2019666364 (09.12.2019). Роспатент.

17. *Завалишин А.Д., Максимов А.Г., Абрамов М.В., Тулупьев А.Л.* Realization b-tree with compression Version 01 for CPlusPlus (RoBtreeCom v.01) (Свидетельство). Свид. о гос. рег. прогр. для ЭВМ. Рег. № 2019666627 (12.12.2019). Роспатент.
18. *Корепанова А.А., Абрамов М.В., Тулупьев А.Л.* Social Network Data Aggregator for “VK” and “OK.ru”, Version 01 for CSharp (SNDA cs.v.01) (Свидетельство). Свид. о гос. рег. прогр. для ЭВМ. Рег. № 2019612298 (14.02.2019). Роспатент.
19. *Хлобыстова А.О., Абрамов М.В., Тулупьев А.Л.* Identifying critical trajectory of the spread of a social engineering attack, Version 01 for Java (ICTS SEA jav.v.01) (Свидетельство). Свид. о гос. рег. прогр. для ЭВМ. Рег. № 2019610872 (12.02.2019). Роспатент.
20. Завалишин А.Д., Тулупьев А.Л., Абрамов М.В., Максимов А.Г. abnPy Utilities Version 01 for Python (abnPy_U v.01) (Свидетельство). Свид. о гос. рег. прогр. для ЭВМ. Рег. № 2020618884. Роспатент.
21. Завалишин А.Д., Тулупьев А.Л., Абрамов М.В., Максимов А.Г. abnPy Knowledge Pattern Version 01 for Python (abnP_KP v.01) (Свидетельство). Свид. о гос. рег. прогр. для ЭВМ. Рег. № 2020619151. (06.08.2020). Роспатент.
22. Завалишин А.Д., Тулупьев А.Л., Абрамов М.В., Максимов А.Г. abnPy Network Version 01 for Python (abnPy_N v.01) (Свидетельство). Свид. о гос. рег. прогр. для ЭВМ. Рег. № 2020618618. (30.07.2020). Роспатент.
23. Завалишин А.Д., Тулупьев А.Л., Абрамов М.В., Максимов А.Г. Publication List Generator Version 01 for PHP (PLG v.01) (Свидетельство). Свид. о гос. рег. прогр. для ЭВМ. Рег. № 2020618768. (04.08.2020). Роспатент.
24. Олисеенко В.Д., Тулупьев А.Л., Абрамов М.В., Корепанова А.А. User Attribute Recovery for Social Engeneering Atacks Modeling Version 01 (UAR for SEA v.01) (Свидетельство). Свид. о гос. рег. прогр. для ЭВМ. Рег. № 2020618820. (05.08.2020). Роспатент.
25. Корепанова А.А., Тулупьев А.Л., Абрамов М.В., Олисеенко В.Д. User Profile Matching for Social Engeneering Atacks Modeling Version 01(UPM for SEA v.01) (Свидетельство). Свид. о гос. рег. прогр. для ЭВМ. Рег. № 2020618890. (06.08.2020). Роспатент.

Список используемой литературы

1. *Reinsel D., Gantz J., Rydning J.* The Digitization of the World From Edge to Core // An IDC White Paper, 2018. https://www.seagate.com/files/www-content/our-story/trends/files/idc-seagate-dataage-whitepaper.pdf
2. *Золотин А.А., Тулупьев А.Л., Сироткин А.В.* Матрично-векторные алгоритмы локального апостериорного вывода в алгебраических байесовских сетях над пропозициями квантами // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики, 2015. Т. 15. № 4. С. 676–684.
3. *Тулупьев А.Л.* Байесовские сети: логико-вероятностный вывод в циклах . СПб.: Изд-во С.-Петербургского ун-та. 2008. 140 с.
4. *Тулупьев А.Л., Сироткин А.В.* Матричные уравнения локального логико-вероятностного вывода оценок истинности элементов в алгебраических байесовских сетях // Вестн. С.-Петерб. ун-та, сер. 1, 2012. Вып. 3. С. 63–72.
5. *Mal'chevskaya E.A., Berezin A.I., Zolotin A.A., Tulupyev A.L.* Algebraic Bayesian Networks: Local Probabilistic-Logic Inference Machine Architecture and Set of Minimal Joint Graphs // Proceedings of the First International Scientific Conference "Intelligent Information Technologies for Industry"(IITI'16). Springer, Cham, 2016. P. 69-79.
6. *Тулупьев А.Л., Сироткин А.В.* Чувствительность результатов локального априорного и локального апостериорного вывода в алгебраических байесовских сетях // Научная сессия НИЯУ МИФИ-2010. Аннотации докладов. В 3 т. Т. 3: Информационно-телекоммуникационные системы. Проблемы информационной безопасности в системе высшей школы. Экономика, управление и нормативно-правовые вопросы высоких технологий. Инновационные образовательные технологии в Национальном исследовательском ядерном университете. М.: НИЯУ МИФИ, 2010. С. 75.
7. *Zhozhikashvili A., Stefanuk V.L.* Theory of Category Approach to Knowledge Based Programming // Joint Conference on Knowledge-Based Software Engineering. Springer, Cham, 2014. P. 735–746.
8. *Shaaban S., Hudson S.* Special Issue:'Production Systems. Cases and Applications', 2014.

9. *Pearl J.* Probabilistic Reasoning in Intelligent Systems: Networks of Plausible Inference. N.Y.:Morgan Kaufman Publ.1991. 552 p.
10. *Jensen F.V.* Bayesian Networks and Decision Graphs // Springer-Verlag. 2002.
11. *Kindermann R., Snell J.L.* Markov random fields and their applications. American Mathematical Society. 1980. T. 1.
12. *Тулупьев А.Л.* Непротиворечивость оценок вероятностей в идеалах конъюнктов и дизъюнктов. Вестн. С.-Петерб. ун-та, сер. 10, 2009. Вып. 2. С. 121–131.
13. *Zolotin A., Malchevskaia E.* Matrix-vector algorithms of local posteriori inference in algebraic Bayesian networks on ideal of disjuncts /// Soft Computing and Measurements (SCM), 2016 XX IEEE International Conference on. IEEE, 2016.
14. *Сироткин А.В., Тулупьев А.Л.* Локальный априорный вывод в алгебраических байесовских сетях: комплекс основных алгоритмов // Труды СПИИРАН, 2007. Вып. 5. СПб.: Наука, 2007. С. 100–111.
15. *Тулупьев А.Л., Сироткин А.В., Золотин А.А.* Матричные уравнения нормирующих множителей в локальном апостериорном выводе оценок истинности в алгебраических байесовских сетях / Вестн. С.-Петерб. ун-та, сер. 1, 2015. Т. 2. № 3. С. 379–386.
16. *Фильченков А.А., Тулупьев А.Л., Сироткин А.В.* Минимальные графы смежности алгебраической байесовской сети: формализация основ синтеза и автоматического обучения // Нечеткие системы и мягкие вычисления. Научный журнал Российской ассоциации нечетких систем и мягких вычислений, 2011. Том 6. № 2. С. 145–163.
17. *Тулупьев А.Л.* Автоматическое обучение фрагментов знаний в алгебраических байесовских сетях // Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте. V-я Международная научно-практическая конференция. Сборник научных трудов. Т. 1. С. 163–176.
18. *Berezin A.I., Ivanova A.V., Zotov M.A.* Minimal Join Graphs' Set Synthesis: Performance Statistical Estimate of the Decremental Algorithm /// Soft Computing and Measurements (SCM), 2016 XX IEEE International Conference on. IEEE, 2016. P. 42–44.
19. *Зотов М.А., Иванова А.В., Золотин А.А.* Визуализация алгебраических байесовских сетей с помощью javascript библиотеки D3.JS // Сборник научных трудов

конференции “Интеллектуальные Системы и Технологии: Современное Состояние и Перспективы–2017” (ISYT–2017). С. 86-95.

20. *Dubois D., Prade H.* Fuzzy Sets and Systems: Theory and Applications. New York, NY: Academic Press. 1980.
21. *Осипов Г.С.* Методы искусственного интеллекта. Москва: Физматлит. 2011.
22. *Батыршин И.З., Недосекин А.О., Стецко А.А., Тарасов В.Б., Язенин А.В., Ярушкина Н.Г.* Нечеткие гибридные системы. Теория и практика. Москва: Физико-математическая литература. 2007.
23. *Duminil-Copin H., Smirnov S.* The connective constant of the honeycomb lattice equals $\sqrt{2}+\sqrt{2}$. Annals of Mathematics, 1653-1665. 2012.
24. *Sirotkin A.V.* An observed sequence probability estimate in binary linear hidden Markov models with posterior inference in algebraic Bayesian networks // SPIIRAS Proceedings, 2012. Vol. 13. p. 122–142.
25. *Сироткин А.В., Мусина В.Ф., Тулупьев А.Л.* Алгебраические байесовские сети: нелинейная задача оптимизации в локальном апостериорном выводе при атомарном стохастическом свидетельстве // Тр. СПИИРАН, 2012. Т. 20. С. 200–215.
26. *Тулупьева Т.В., Тафинцева А.С., Тулупьев А.Л.* Подход к анализу отражения особенностей личности в цифровых следах // Вестник психотерапии. 2016. № 60 (65). С. 124–137.
27. *Бордовская Н.В., Тулупьева Т.В., Тулупьев А.Л., Азаров А.А.* Возможности электронной социальной сети в решении профессиональных задач вузовского преподавателя // Психологическая наука и образование. 2016. Т. 21. № 4. С. 32–39.
28. *Суворова А.В., Тулупьев А.Л.* Синтез структур байесовской сети доверия для оценки характеристик рискованного поведения // Информационно-управляющие системы. 2018. № 1 (92). С. 116–122.
29. *Азаров А.А., Тулупьева Т.В., Суворова А.В., Тулупьев А.Л., Абрамов М.В., Юсупов Р.М.* Социоинженерные атаки: проблемы анализа. СПб.: Наука, 2016. 352 с.
30. *Bagretsov G.I., Shindarev N.A., Abramov M.V., Tulupyeva T.V.* Approaches to development of models for text analysis of information in social network profiles in order

to evaluate user's vulnerabilities profile // Soft Computing and Measurements (SCM), 2017 XX IEEE International Conference on. IEEE, 2017. P. 93–95.

31. *Абрамов М.В., Тулупьев А.Л., Сулейманов А.А.* Задачи анализа защищенности пользователей от социоинженерных атак: построение социального графа по сведениям из социальных сетей // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2018. Т. 18. № 2. С. 313–321.
32. *Kharitonov N.A., Tulupyev A.L., Zolotin A.A.* Software implementation of reconciliation algorithms in al-gebraic Bayesian networks // Proceedings of 2017 20th IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements, SCM 2017. 2017. P. 8-–10.
33. *Shindarev N., Bagretsov G., Abramov M., Tulupyeva T. Suvorova A.* Approach to identifying of employees profiles in websites of social networks aimed to analyze social engineering vulnerabilities //International Conference on Intelligent Information Technologies for Industry. Springer, Cham, 2017. P. 441–447.
34. *Abramov M. V., Azarov A. A.* Social engineering attack modeling with the use of Bayesian networks // Soft Computing and Measurements (SCM), 2016 XIX IEEE International Conference on. IEEE, 2016. P. 58–60.
35. *Золотин А.А., Левенец Д.Г., Зотов М.А., Бирилло А.И., Березин А.И., Иванова А.В., Тулупьев А.Л.* Алгоритмы обработки и визуализации алгебраических байесовских сетей. Образовательные технологии и общество. 2017. 20(1). С. 446–457.
36. *Тулупьев А.Л.* Непротиворечивость оценок вероятностей в алгебраических байесовских сетях // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 10. Прикладная математика. Информатика. Процессы управления. 2009. № 3. С. 143-–150.
37. *Сироткин А.В.* Проверка и поддержание непротиворечивости алгебраических байесовских сетей: вычислительная сложность алгоритмов // Труды СПИИРАН. 2010. Т. 4. № 15. С. 162–192.
38. *Dalkiran E., Ghalami L.* On linear programming relaxations for solving polynomial programming problems // Computers & operations research. 2018. V. 99. P. 67–77.
39. *Kolev L., Skalna I.* Exact solution to a parametric linear programming problem // Numerical algorithms. 2018. V. 78 N 4. P. 1183-–1194.

40. *Feng J., Che A.* Novel integer linear programming models for the facility layout problem with fixed-size rectangular departments // Computers & operations research. 2018. V. 95 P. 163–171.

41. *Langford J.* Quantitatively Tight Sample Complexity Bounds. — Carnegie Mellon Thesis. 2002. 124 с.

42. *Слёзкин Н.Е., Абрамов М.В., Тулупьева Т.В.* Подход к восстановлению метапрофиля пользователя информационной системы на основании данных из социальных сетей // Сборник научных трудов Первой Всероссийской научно-практической конференции «Нечёткие системы и мягкие вычисления. Промышленные применения». (г. Ульяновск, 14–15 ноября, 2017 г.). — Ульяновск, УлГТУ, 2017. С. 394-–399.

43. *Степанов Д.В., Мусина В.Ф., Суворова А.В., Тулупьев А.Л., Сироткин А.В., Тулупьева Т.В.* Функция правдоподобия с гетерогенными аргументами в идентификации пуассоновской модели рискованного поведения в случае информационного дефицита // Труды СПИИРАН. 2012. Вып. 4(23). С. 157—184.

44. *Суворова А.В., Тулупьев А.Л., Сироткин А.В.* Байесовские сети доверия в задачах оценивания интенсивности рискованного поведения // Нечеткие системы и мягкие вычисления. 2014. № 2. С.115-–129

45. *Торопова А.В., Суворова А.В., Тулупьев А.Л.* Диагностика согласованности в модели для оценивания интенсивности социально-значимого поведения // Нечеткие системы и мягкие вычисления. 2015. Т. 10. №1. С. 93-–107

46. *Barton D.N., Benjamin T., Cerdan C.R., DeClerck F., Madsen A.L., Rusch G.M., Villanueva C.* Assessing ecosystem services from multifunctional trees in pastures using Bayesian belief networks // Ecosystem Services. 2016. Vol. 18. P. 165-174 (2016).

47. *Boets P., Landuyt D., Everaert G., Broekx S., Goethals P.L.* Evaluation and comparison of data-driven and knowledge-supported Bayesian Belief Networks to assess the habitat suitability for alien macroinvertebrates // Environmental Modelling & Software. 2015. Vol 74. P. 92–103.

48. *Bolger N., Davis A., Rafaeli E.* Diary methods: Capturing life as it is lived // Annual review of psychology. 2003. Vol. 54(1). P. 579—616

49. *Darwiche A.* Modelling and reasoning with Bayesian networks. Cambridge: Cambridge University Press, 2009

50. *Graham C.A., Catania J.A., Brand R., Duong T., Canchola J.A.* Recalling sexual behavior: A methodological analysis of memory recall bias via interview using the diary as the gold standard // Journal of sex research. 2003. Vol. 40(4), P. 325-–332

51. *Jitwasinkul B., Hadikusumo B.H., Memon A.Q.* A Bayesian Belief Network model of organizational factors for improving safe work behaviors in Thai construction industry // Safety science. 2016. Vol. 82, pp. 264–273.

52. *Lemelin C., Lussier Y., Sabourin S., Brassard A., Naud C.* Risky sexual behaviours: The role of substance use, psychopathic traits, and attachment insecurity among adolescents and young adults in Quebec // The Canadian Journal of Human Sexuality. 2014. Vol. 23(3). P. 189–199

53. *Margaritis D.* Learning Bayesian network model structure from data. PhD thesis. Pittsburgh: Carnegie-Mellon University, School of Computer Science, 2003.

54. *Mkrtchyan L., Podofillini L., Dang V.N.* Bayesian belief networks for human reliability analysis: A review of applications and gaps // Reliability Engineering & System Safety. 2015. Vol. 139, pp. 1—16.

55. *Neapolitan R.E.* Learning Bayesian Networks. Pearson Prentice Hall. 2003

56. *Pearl J.* Causality: Models, Reasoning, and Inference. Cambridge: Cambridge University Press, 2000

57. *Ramrakha S., Caspi A., Dickson N., Moffitt T. E., Paul C.* Psychiatric disorders and risky sexual behaviour in young adulthood: cross sectional study in birth cohort // Bmj. 2000. Vol. 321(7256). P. 263—266

58. *Schroder K.E., Carey M.P., Vanable P.A.* Methodological challenges in research on sexual risk behavior: II. Accuracy of self-reports // Annals of behavioral medicine. 2003. Vol. 26(2). P. 104-–123

59. *Scutari M.* Learning Bayesian Networks with the bnlearn R Package // Journal of Statistical Software. 2010. Vol. 35(3), pp. 1—22

60. *Su C., Andrew A., Karagas M. R., Borsuk, M.E.* Using Bayesian networks to discover relations between genes, environment, and disease // BioData mining. 2013. № 6(1)

61. *Suvorova A., Tulupyev A.* Learning Bayesian Network Structure for Risky Behavior Modelling // Advances in Intelligent Systems and Computing. Vol. 875. Proceedings of the Third International Scientific Conference “Intelligent Information Technologies for Industry” (IITI’18). Springer, 2018. Vol. 2. P. 58–65.
62. *Suvorova A., Tulupyeva T.* Bayesian Belief Networks in Risky Behavior Modelling // Proceedings of the First International Scientific Conference “Intelligent Information Technologies for Industry”(IITI’16). Springer International Publishing, 2016. P. 95–102.
63. *Vacirca M.F., Ortega E., Rabaglietti E., Ciairano S.* Sex as a developmental transition: the direct and indirect roles of peers // Psychology & Sexuality. 2012. Vol. 3(2). P. 108—122
64. *Marella, D., Vicard, P.* Toward an integrated Bayesian network approach to measurement error detection and correction. Communications in Statistics-Simulation and Computation, Vol. 48(2), 2019. P. 544–555.
65. *Tulupyev A.L.* Algebraic Bayesian networks: local logical and probabilistic inference: a tutorial. 2nd edition, SPb: VVM, 2019, 138 p.
66. *Kharitonov N.A., Tulupyev A.L.* Zolotin A.A. Software Implementation of Reconciliation Algorithms in Algebraic Bayesian Networks // Soft Computing and Measurements (SCM), 2017 XX IEEE International Conference on. IEEE, 2017. P. 8–10.
67. *Malchevskaya E. A., Zolotin A. A.* Probabilistic-logic inference in algebraic Bayesian networks: C# software package architecture and examples of use // Hybrid and Synergetic Intelligent Systems, 2016. P. 181–187.
68. *A.A. Zolotin, E.A. Malchevskaya, A.L. Tulupyev, A.V. Sirotkin* An approach to sensitivity analysis of inference equations in algebraic bayesian networks // Advances in Intelligent Systems and Computing, 2018. Vol. 679. P. 34–42
69. *Azar A., Dolatabad K. M.* A method for modelling operational risk with fuzzy cognitive maps // Expert systems with applications, 2019. Vol. 115. P. 607–617.
70. *Suwanwimolkul S., Zhang L., Ranasinghe D.C., Shi Q.F.* One-step adaptive markov random field for structured compressive sensing // Signal processing, 2019. Vol. 156. P. 116–144.

71. *Kharitonov N.A., Malchevskaia E.A., Zolotin A.A., Abramov M.A.* External consistency maintenance algorithm for chain and stellate structures of algebraic bayesian networks: Statistical experiments for running time analysis // Advances in Intelligent Systems and Computing, 2019. Vol. 875. P. 23–30.
72. *Suvorova A.* Exploring Bayesian belief network for risky behavior modelling: discretization and latent variables // The Second International Scientific and Practical Conference "Fuzzy Technologies in the Industry — FTI 2018". CEUR Workshop Proceedings. [Ожидает индексации в SCOPUS].
73. *Tulupyev A., Kharitonov N., Zolotin A.* Algebraic Bayesian networks: consistent fusion of partially intersected knowledge systems // The Second International Scientific and Practical Conference "Fuzzy Technologies in the Industry — FTI 2018". CEUR Workshop Proceedings. [Ожидает индексации в SCOPUS].
74. Тулупьев А.Л., Николенко С.И., Сироткин А.В. Байесовские сети: логико-вероятностный подход. СПб: Наука, 2006. 607 с.
75. Тулупьев А.Л., Сироткин А.В., Николенко С.И. Байесовские сети доверия: логико-вероятностный вывод в ациклических направленных графах. СПб: СПбГУ, 2009. 400 с.
76. *Тулупьев А.Л., Николенко С.И., Сироткин А.В.* Основы теории байесовских сетей: учебник. СПб: СПбГУ, 2019. 399 с.
77. *Харитонов Н.А.* Поддержание интернальной непротиворечивости алгебраических байесовских сетей с линейной и звездчатой структурой // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2018. Т. 18. № 6. С. 1108–1117.
78. *Тулупьев А.Л.* Алгебраические байесовские сети: логико-вероятностная графическая модель баз фрагментов знаний с неопределенностью // Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук / Санкт-Петербургский государственный университет. Санкт-Петербург, 2009.
79. *Malinowski. G.* Kleene logic and inference // Bulletin of the Section of Logic, 2014. Vol. 43. No. 1/2. P. 43–52.

80. *Абрамов М.В.* Автоматизация анализа социальных сетей для оценивания защищённости от социоинженерных атак // Автоматизация процессов управления, 2018. №1(51). P. 34–40.

81. *Багрецов Г.И., Шиндарев Н.А., Абрамов М.В., Тулупьева Т.В.* Подходы к автоматизации сбора, структурирования и анализа информации о сотрудниках компании на основе данных социальной сети // Труды VII всероссийской научно-практической конференции «Нечёткие системы, мягкие вычисления и интеллектуальные технологии» НСМВИТ–2017 (г. Санкт-Петербург, 3–7 июля, 2017 г.). — в 2 т. Т. 1. СПб.: Политехника-сервис, 2017. С. 9–16.

82. *Romanov A.V., Levenets D.G., Zolotin A.A., Tulupyev A.L.* Incremental synthesis of the tertiary structure of algebraic Bayesian networks // Soft Computing and Measurements (SCM), 2017 XX IEEE International Conference on. IEEE, 2017. P. 28–30.

83. *Whitney H.* Congruent graphs and the connectivity of graphs //Hassler Whitney Collected Papers. Birkhäuser Boston, 1992. P. 61–79.

84. Filchenkov A. A., Tulupyev A. L. Coincidence of the sets of minimal and irreducible join graphs over primary structure of algebraic Bayesian networks // Vestnik St. Petersburg University: Mathematics. 2012. T. 45. № 2. P. 106–113.

85. *Харари Ф.* Теория графов: Пер. с англ./ Предисл. В. П. Козырева; Под ред. Г.П.Гаврилова. Изд. 4-е. М.: Книжный дом "ЛИБРОКОМ 2009. 296 с.

86. *Sabidussi G.* Graphs with given group and given graph-theoretical properties //Canadian journal of mathematics. 1957. T. 9. P. 515–525.

87. IARC Monograph: «Cadmium and Cadmium Compounds». Last access Nov. 2005

88. *Чопра К., Дас С.* Тонкопленочные солнечные элементы: Пер. с англ. с сокращениями // М.: Мир. 1986. 435 с.

89. *Петухов И.А., Зуев Д.А., Шорохова А.В., Паршина Л.С., Новодворский О.А., Храмова О.Д., Лотин А.А., Путилин Ф.Н., Козловский В.Ф., Иванов В.К., Румянцева М.Н., Гаськов А.М.* Тонкие плёнки сульфида кадмия для фотольватики // Computational nanotechnology, 2014. 68–73 с.

90. *Paul K.* Handbook of Infrared Optical Materials // CRC Press, 1991.

91. *Mohammed B.K.* Insight into the origin of magnetism in Iron-doped cadmium sulfide thin films from first principles calculations // Solid State Communications, 2017. vol. 253. P. 10–13.

92. *Randić M.* On characterization of molecular branching // J. Amer. Chem. Soc. 97 (23), 1975. P. 6609–6615.

93. *Amic D. Beslo B. Lucić S. Nikolić N.* Trinajstić The vertex-connectivity index revisited // J. Chem. Inf. Comput. Sci. V. 38. 1998. P. 819–822.

94. *Bollobas B., Erdos P.* Graphs of extremal weights // Ars Combinatoria, 1998. Vol. 50. P. 225–233.

95. *Gutman I., Das K.C.* The first Zagreb index 30 years after. Commun. Math. Comput. Chem, 2004. Vol. 50. P. 83–92.

96. *Gutman I., Trinajstić N.* Graph theory and molecular orbital's., Total-electron energy of alternant hydrocar-bons // Chemical Physics Letters, 1972. Vol. 17. P. 535–538.

97. *Estrada E., Torres L., Rodriguez L., Gutman I.* An at-om-bond connectivity index: Modeling the enthalpy of formation of alkanes // Indian J. Chem., 1998. Vol. 37A. P. 849–855.

98. *Ghorbani A., Hosseinzadeh M.A.* Computing ABC4 index of nanostar Dendrimers // Optoelectronics and Ad-vanced Materials–Rapid Communications, 2010. Vol. 4. P. 1419–1422.

99. *Vukičević D., Furtula B.* Topological index based on the ratios of geometrical and arithmetical means of end-vertex degrees of edges // J. Math. Chem., 2009. Vol. 46. P. 1369–1376.

100. *Graovac A., Ghorbani M., Hosseinzadeh M.A.* Compu-ting fifth geometric-arithmetic index for nanostar Dendrimers // J. Math. Nanosci., 2011. Vol. 1. P. 33–42.

101. *Kleene S.C.* Mathematical logic // Courier Corporation, 2002. 416 p.

102. *Karmarkar N. A.* new polynomial-time algorithm for linear programming // Proceedings of the sixteenth annual ACM symposium on Theory of computing, 1984. P. 302–311.

103. *Karnaugh M.* The map method for synthesis of combinational logic circuits // Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, Part I: Communication and Electronics, 1953. Vol. 72. №5. P. 593–599.

104. *Vereschchagin N.K., Shen A.* Computable Functions. Translated by V. N. Dubrovskii. American Mathematical Society. 2003.

105. *Sirotkin A.V.* Algebraic Bayesian networks reconciliation: computational complexity // SPIIRAS Proceedings, 2010. Vol. 4, No. 15. P. 162–192.

106. *Borgwardt K.H.* The Simplex Method: a probabilistic analysis // Springer Science & Business Media, 2012. Vol 1.

107. *DeGroot M.H.* Optimal Statistical Decisions // McGraw-Hill, 1970.