

В. А. Фомичев, д-р техн. наук, проф., e-mail: vfomichov@hse.ru,

А. А. Разоренов, аспирант, e-mail: razorenov@mail.ru,

Национальный исследовательский университет "Высшая школа экономики", Москва

Значение теории К-представлений для исследований по автоматическому выявлению семантических ролей

Показана неполнота теоретических основ ветвей компьютерной семантики, называемых Выявлением семантических ролей (ВСР) и Фреймово-семантическим анализом (ФСА), как следствие кажущегося отсутствия семантического формализма, позволяющего описывать смысловую структуру сложных предложений и дискурсов из произвольных предметных областей. Сделан вывод о том, что теория К-представлений (концептуальных представлений) предоставляет такой формализм, определяя новый класс формальных языков — класс СК-языков (стандартных концептуальных языков). Проиллюстрированы некоторые новые выразительные механизмы СК-языков. Изложены центральные идеи метода выполнения семантико-синтаксического анализа текстов на естественном языке (ЕЯ), предложенного теорией К-представлений. Для построения семантических представлений текстов использован класс СК-языков. В заключительной части статьи рассматривается применение метода к проектированию ЕЯ-интерфейсов для управления программным обеспечением. Разработан файловый менеджер с ЕЯ-интерфейсом NLC-1 (Natural Language Commander — версия 1), система реализована на функциональном языке программирования Haskell.

Ключевые слова: естественный язык, семантико-синтаксический анализ текстов, выявление семантических ролей, фреймово-семантический анализ, семантическое представление, теория К-представлений, СК-язык, лингвистическая база данных, управление программным обеспечением, естественно-языковое управление файловой системой, Natural Language Commander

Введение

Исследования, направленные на автоматическое извлечение смысла из текстов на естественном языке (ЕЯ), т. е. из текстов на русском, английском и других языках, проводились с конца 1960-х годов и сформировали важное направление в области искусственного интеллекта, называемое компьютерной обработкой естественного языка (КОЕЯ). В англоязычной научной литературе используется термин Natural Language Processing (NLP). Уменьшение интереса к проблеме в 1990-х сменилось в 2000-х быстрым ростом числа проектов в этой области. Представляется, что основные причины данной ситуации заключаются в том, что: (а) из-за бурного роста Всемирного Веба (World Wide Web) стал технически доступен огромный объем информации в виде естественно-языковых текстов (ЕЯ-текстов), и это вызвало потребность их смысловой обработки, позволяющей обычному, непрограммирующему пользователю осуществлять поиск информации в текстах по определенным критериям; (б) было разработано семейство онтологий, базирующихся в Вебе (Web-based ontologies), что повлекло за собой возможность использовать накопленные знания для

семантической обработки ЕЯ-текстов прикладными компьютерными системами; (в) возникла необходимость в естественно-языковых интерфейсах (ЕЯ-интерфейсах) для взаимодействия с онтологиями, разработанными в рамках проекта Семантического Веба (Semantic Web) и сформированных с помощью языков RDF, RDFS и OWL [1, 2], а также для взаимодействия с Системой взаимосвязанных открытых данных (Linked Open Data) [3, 4].

В сентябре 2012 г. в Германии, в замке Дагштуль, состоялся семинар по Мультилингвистическому Семантическому Вебу (МСВ). Труды этого семинара [5] содержат следующие данные: в 2010 г. число пользователей Интернета, говорящих не на английском языке, в три раза превысило число англоговорящих пользователей (1430 млн против 536 млн). Поэтому проблема создания МСВ чрезвычайно актуальна. Эта проблема выдвигает новые требования к компьютерной семантике. Представляется разумным анализировать эти новые требования в контексте проблем, с которыми столкнулась компьютерная лингвистика в целом.

Анализ многих публикаций в области КОЕЯ показывает существование разрыва (очень часто —

большого разрыва) между используемыми в проектах теоретическими инструментами и реальными потребностями исследуемых проблем. Рассмотрим только один пример. Лингвистический процессор BLUE (Boeing Language Understanding Engine) был разработан для компании Боинг как передовой инструмент обработки информации. Эта система может строить семантические представления (СП) предложений многих видов [6]. Однако мы узнаем из второго раздела той же статьи [6], что система BLUE "разрешает высказываниям быть аргументами других высказываний, образуя встроенные структуры". Так, система строит СП фразы "Мужчина хотел покинуть дом". Этот шаг немедленно выводит нас за пределы логики предикатов первого порядка (ЛППП). Дело в том, что атомарная формула ЛППП не может включать аргументы, являющиеся формальными семантическими образами инфинитивных конструкций ("покинуть дом" и т. п.). Поэтому, по существу, компьютерная система BLUE компании Боинг не имеет адекватной теоретической основы.

Эта проблема является частным случаем фундаментальной проблемы, с которой столкнулось научное направление, называемое *Выявлением семантических ролей (Semantic Role Labeling)* [7]. Главной решаемой задачей является нахождение семантико-синтаксических отношений (называемых семантическими ролями или, во многих публикациях, тематическими, ролями) между глагольными формами (или некоторыми другими предикативными словами и сочетаниями) и зависимыми в предложении словами или сочетаниями слов. Например, можно выявить семантические роли *Агент*, *Феномен* и *Время* в предложении "Российский нобелевский лауреат Иван Петрович Павлов открыл условные рефлексы в начале XX столетия".

Цель алгоритмов выявления семантических ролей заключается, во-первых, в нахождении ролей, реализованных в рассматриваемой фразе, и, во-вторых, в построении формального выражения, называемого СП фразы, для того чтобы обработать очередную фразу в контексте диалога (либо предыдущей части связного текста) и базы знаний о предметной области (онтологии). Фундаментальной проблемой этого направления является *кажущееся отсутствие* формальных средств, позволяющих отражать семантическую структуру произвольных предложений. В частности, направление Выявление семантических ролей (ВСП) не предлагает эффективные формальные средства для построения СП предложений со сложной прямой или косвенной речью, составными обозначениями множеств, инфинитивными конструкциями. Последнее относится, например, к предложению "Павел решил покинуть фирму "Старт" и постараться получить более высокую рабочую позицию в компании "Восход".

Анализируя развитие компьютерной лингвистики (КЛ) в последние два десятилетия, можно заметить сдвиг к многочисленным инженерным проектам для решения частных практических задач и недостаток внимания к фундаментальным исследованиям.

Представляется, что одно из наиболее ярких описаний недавней и текущей ситуаций в компьютерной лингвистике было дано доктором Ш. Винтнером из отделения информатики университета Хайфы (Израиль) [8]. Отправной точкой для Ш. Винтнера была высокая оценка значения математических теорий для развития многих инженерных областей. Например, на основе аэродинамики конструируются самолеты, а гидродинамика помогает проектировать корабли. В связи с этим в [8] задаются следующие вопросы: "Какая область науки лежит в основе инженерии компьютерных систем обработки ЕЯ? Какова теоретическая инфраструктура, на основе которой мы разрабатываем приложения? И какой вид математики нужен для обоснования рассуждений о языках человека?"

Необходимость разработки комплексного формального подхода для создания МСВ делает чрезвычайно актуальным вопрос о математических основах компьютерной семантики, являющейся ядром современной КЛ.

Обстоятельный ответ на вопрос об адекватных математических основах компьютерной семантики был опубликован уже через несколько месяцев (в том же году) после опубликования указанных фундаментальных вопросов. Такой ответ был дан теорией К-представлений (концептуальных представлений) — оригинальной теорией проектирования семантико-синтаксических анализаторов ЕЯ-текстов с широким применением формальных средств описания входных, промежуточных и выходных данных. Основная часть этой теории была опубликована на английском языке в декабре 2009 г. в монографии [9], развивающей идеи монографий [10, 11].

Первая цель данной статьи — показать, что ветви КОЕЯ, называемые Выявлением семантических ролей (Semantic Role Labeling) и Фреймово-семантическим анализом (Frame-Semantic Parsing) [12], должны быть дополнены семантическим формализмом, удобным для построения семантических представлений сложных предложений и дискурсов.

Вторая цель — показать, что семантический формализм такого рода уже существует, это класс СК-языков (стандартных концептуальных языков), определяемый теорией К-представлений.

Наконец, третья цель заключается в демонстрации непосредственной практической значимости одного из алгоритмов семантико-синтаксического анализа, предлагаемых теорией К-представлений. В частности, этот алгоритм нашел применение при разработке ЕЯ-интерфейса прикладной интеллектуальной системы, позволяющей управлять файловой системой компьютера.

Состояние исследований по автоматическому выявлению семантических ролей

Задача извлечения смысла из ЕЯ-текстов привлекла большое внимание специалистов во многих областях применений в первой половине 2000-х годов. Эта задача, предполагающая конструирование полного или частичного формального представления смысла текста, стимулировала появление целого ряда исследовательских проектов во всем мире. Главным направлением в этой области представляются взаимосвязанные научные ветви, называемые Выявлением семантических ролей (ВСР) и Фреймово-семантическим анализом (ФСА).

Как было отмечено выше, цель ВСР заключается в разработке методов и компьютерных программ, направленных на нахождение семантических ролей (другими словами — тематических ролей), реализующихся в парах определенных слов или словосочетаний. Важным бинарным событием в развитии этого научного направления стала публикация пионерской работы [13] о компьютерной программе для статистического выявления семантических ролей и создание депозитария аннотаций PropBank [14]. Эти две публикации послужили отправной точкой для разработки семейства прикладных компьютерных систем, предназначенных для нахождения предикатно-аргументных структур, отражающих семантику предложений и коротких дискурсов.

Формальные аннотации из депозитария PropBank состоят из деревьев синтаксического разбора, представленных в разделе депозитария Penn Treebank [15] с текстами из журнала Wall Street Journal и дополненных предикатно-аргументными структурами для глаголов. Депозитарий PropBank использует базовые роли ARG0—ARG5, и эти роли имеют разные интерпретации для разных предикатов. В предыдущее десятилетие было проведено много исследований в области автоматического выявления семантических ролей, использующих нотацию депозитария PropBank [7, 16, 17]. Проблема использования предикатно-аргументных структур заключается в том, что базовые роли ARG2—ARG5 служат многим различным целям для разных глаголов [18].

Выход из этой ситуации был предложен ветвью компьютерной обработки ЕЯ, названной Фреймово-семантическим анализом (ФСА, в англоязычной литературе Frame-Semantic Parsing) и тесно связанной с ветвью ВСР (многочисленные библиографические ссылки можно найти в статье [12]). Основой ФСА является лингвистический ресурс FrameNet [19]. Этот ресурс хранит значительный объем информации о лексической семантике и предикатно-аргументной семантике предложений английского языка. Лексикон ресурса FrameNet содержит семантические фреймы, каждый из которых включает список лексических единиц — ассоциированных слов и словосочетаний, которые могут сигнализи-

ровать о возможной реализации рассматриваемого семантического фрейма в ЕЯ-выражении. Кроме того, каждый семантический фрейм из ресурса FrameNet указывает на несколько ролей, соответствующих различным аспектам сценария, представляемого фреймом. Мишенями (или тагитами — от английского слова target) называют предикатные выражения (глаголы и т. д.), сигнализирующие о семантических фреймах, а аргументом называют такое слово или выражение, значение которого связано с определенной мишенью (тагитом) некоторой семантической ролью.

Например, фрейм JUDGMENT (Осуждение) из базы данных (БД) FrameNet содержит вручную аннотированное предложение "She blames the Government for failing to do enough to help" ("Она обвиняет правительство за недостаточные усилия помочь"). В этом предложении выделены следующие семантические роли: *Judge* (Осуждающий) в паре (She, blames), *Evaluate* (Осуждаемый) в паре (blames, the Government), *Reason* (Причина) в паре (blames, for failing to do enough to help). В БД FrameNet рассматриваемому предложению будет соответствовать следующая семантико-синтаксическая аннотация:

[*Judge* She] **blames** [*Evaluate* the Government]
[*Reason* for failing to do enough to help].

По сравнению с депозитарием PropBank, содержащим глагольные предикаты, FrameNet включает как их, так и прилагательные, наречия и предлоги.

Центральные идеи теории К-представлений

Постановка задачи. Алгоритмы и компьютерные программы, разработанные в областях КОЕЯ, называемых ВСР и ФСА, помогли преодолеть часть трудностей, связанных со сравнением содержания запроса пользователя Веба с содержанием фрагмента информационного ресурса. Например, БД FrameNet включает семантический фрейм TRANSFER, описывающий взаимосвязи между семантическими ролями мишеней (тагитов) *send* (послать) и *receive* (получить). Поэтому, используя фрейм TRANSFER, можно ответить на вопрос "Какие партии послали избирателям открепительные бюллетени?" после обработки текста "Избиратели как Демократической, так и Республиканской партий получили открепительные бюллетени от своих партий". Однако значительная часть вопросов, касающихся автоматической семантической обработки ЕЯ-текстов, все еще остается открытой.

Пример 1. Пусть V_1 = "Получала ли фирма "Радуга" в этом месяце аксессуары от ЗАО "Весна"?", вопрос V_1 датирован 24 апреля 2015 г., и некоторая полнотекстовая БД Db_1 содержит коммерческий контракт, включающий текст T_1 = "ЗАО "Весна" обязуется поставить фирме "Радуга" три однотонных контейнера с аксессуарами к 15 апреля 2015 г.". Тогда последовательность разумных шагов формиро-

вания ответа "Скорее всего, да" гипотетической компьютерной интеллектуальной системой включает:

Шаг 1. Построение СП вопроса В1.

Шаг 2. Построение СП текста Т1.

Шаг 3. Нахождение в базе знаний Db2 записи, передающей смысл М1 = "Если какая-то организация Х1 обязуется в юридическом документе, датированном моментом t1, выполнить определенное действие Х2 к дате t2, то обычно организация Х1 выполняет действие Х2 в интервале времени t3, где t1 предшествует началу t3, и конец t3 близок к дате t2 и раньше t2 либо совпадает с t2".

Пример 2. Пусть В2 = "Какие достижения были у компании "Горизонт" в прошлом году?". Для обработки вопросов о достижении цели нам нужно выделить, изучить и разделить на несколько групп цели деятельности организации. Примеры таких целей: "Выпуск нового продукта", "Открытие нового офиса компании", "Увеличение прибыли". Такая информация должна храниться в специальной базе целей [20].

Эти два примера и многие другие примеры показывают, что для продвижения вперед в теории семантически-ориентированных систем обработки ЕЯ необходимо создать предметно-независимый семантический формализм, удобный для описания: (а) семантической структуры предложений, включающих, в частности, инфинитивные и герундиальные (для английского языка) конструкции, выражающие цели, обязательства, команды и т. д., придаточные предложения цели, сложную прямую и косвенную речь, составные обозначения множеств; (б) семантической структуры связных текстов (или дискурсов), в том числе включающих ссылки на ранее упомянутые объекты и на смысл фраз и более крупных частей текста; (в) представления фрагментов знаний о мире, в том числе определений понятий; (г) формальных представлений простых и составных целей людей, организаций и роботов.

Такого сочетания выразительных механизмов не предлагают теория представления дискурсов (Discourse Representation Theory), теория концептуальных графов (Theory of Conceptual Graphs), эпизодическая логика (Episodic Logic), теория расширенных семантических сетей, компьютерная семантика русского языка и теория неоднородных семантических сетей.

Краткая характеристика теории К-представлений.

Решение указанной проблемы предлагается теорией К-представлений (концептуальных представлений). Это оригинальная теория проектирования семантико-синтаксических анализаторов ЕЯ-текстов с широким применением формальных средств описания входных, промежуточных и выходных данных. Теория К-представлений (ТКП) представлена в большой серии публикаций на русском и английском языках, в том числе в работах [9—11, 20—27].

ТКП вносит также вклад в расширение теоретических основ МСВ [9, 25—27]. Первоначально ТКП называлась теорией К-исчислений и К-языков.

Сущность базовой математической модели. Базовая модель ТКП описывает систему, состоящую из 10 частичных операций на концептуальных структурах. Применяя эти операции шаг за шагом, можно построить формальное представление структурированного значения, или СП, произвольно сложного предложения или связного текста (дискурса) на русском, английском, немецком, французском и других языках. Модель, в частности, определяет новый класс формальных языков — класс СК-языков [9—11, 21—23]. По сравнению с указанными выше подходами к формальному представлению значений (или смысла, содержания) ЕЯ-текстов общим преимуществом СК-языков является уникальный набор новых выразительных механизмов, открывающих возможности моделирования семантической структуры словосочетаний и текстов следующих видов (при сохранении выразительных средств многосортной логики предикатов первого порядка): (а) инфинитивных и герундиальных конструкций (выражающих действия, цели, обязательства и т. д.); (б) фраз со сложными придаточными предложениями, в том числе с прямой и косвенной речью, с придаточными цели; (в) произвольно сложных составных обозначений объектов, ситуаций, множеств и понятий; (г) дискурсов со ссылками на смысл предыдущих или последующих фраз и более крупных частей текста; (д) обозначений упорядоченных наборов объектов [9—11, 21—23, 27].

Некоторые выразительные возможности СК-языков. Пусть $Exrg$ — выражение на ЕЯ, и Sem — некоторое СП этого выражения. Тогда будем говорить, что Sem — возможное К-представление (КП) выражения $Exrg$, если Sem является выражением некоторого СК-языка (т. е. СК-языка в некотором концептуальном базисе). В примерах КП входного текста Т будет значением строковой переменной $Semrepr$ (Semantic Representation).

Представление смысла предложений с прямой речью. Пусть Т1 = "Когда мистер Питер Смит сообщил, что он посетит Монпелье в апреле?" Тогда $Semrepr = \text{Вопрос}(t1, \text{Ситуация}(e1, \text{информирование1} * (\text{Время, нек момент} * (\text{Раньше, \#сейчас\#}): t1) (\text{Агент1, нек чел} * (\text{Имя, "Питер"})) (\text{Фамилия, "Смит"}): x1) (\text{Информ-содержание, Ситуация}(e2, \text{визит1} * (\text{Агент1, x1}) (\text{Место2, нек город1} * (\text{Наименование1, "Монпелье"}): x2) (\text{Время, Ближайший-будущий-месяц}(Апрель, \#сейчас\#))))))$.

Представление смысла сложноподчиненных предложений с придаточными цели. Пусть Т2 = "Мистер Питер Смит, вице-президент компании "Rainbow" заявил вчера, что посетит Монпелье в апреле, чтобы подписать соглашение с компанией CIRAD". Тогда $Semrepr = \text{Ситуация}(e1, \text{информирование1} * (\text{Время,$

Предыдущий-день (#сейчас#)) (Агент1, нек чел * (Имя, "Питер") (Фамилия, "Смит"): x1) (Информ-содержание, Ситуация (e2, визит1 * (Агент1, x1) (Место2, нек город * (Наименование1, "Montpellier"): x2) (Время, Ближайший-будущий-месяц (Апрель, #сейчас#)) (Цель, предписание2 * (Информ-объект, нек соглашение1: x3) (Партнер2, нек компания1 * (Наименование1, "CIRAD"): x4))))).

Отображение смысла дискурсов. Пусть ТЗ = "Все гранулоциты являются полиморфонуклеарными; это значит, что у них многодольные ядра". Тогда $Semrepr = (Свойство (произв\ гранулоцит : x1, полиморфонуклеарн): P1 \wedge \text{Пояснение} (P1, \text{Если-то} (Ситуация (e1, обладание1 * (Субъект1, x1) (Объект1, нек ядро : x2)), Свойство (x2, многодольн))))).$

Здесь P1 — переменная, используемая как метка смысла первой фразы из ТЗ; идентификаторы *Субъект1*, *Объект1* обозначают семантические роли.

Сущность метода семантико-синтаксического анализа текстов, предлагаемого теорией К-представлений

ТКП не только предложила класс СК-языков для построения СП сложных предложений и дискурсов, но и использовала определение класса СК-языков для создания широко применимой математической модели лингвистической базы данных (ЛБД) (см. гл. 6 книги [10] и гл. 7 книги [9]). Эта модель ЛБД лежала в основе разработки сильно структурированных алгоритмов семантико-синтаксического анализа (ССА) ЕЯ-текстов *SemSyn* и *SemSynt1*. Модель и алгоритмы применены при разработке рекомендательной системы с ЕЯ-интерфейсом [28], информационно-поисковой системы, реализующей семантический поиск специалистов по ЕЯ-описаниям их компетенций [29] и при проектировании системы управления файлами с ЕЯ-интерфейсом [30, 31].

В монографиях [9, 10] предлагается альтернативный подход к выявлению семантических ролей. В отличие от идеологии статистических подходов к этой проблеме, предполагается, что для многих практических задач возможно применение алгоритмов, точно отражающих на выходе семантико-синтаксическую структуру входного текста. В частности, это важно для разработки ЕЯ-интерфейсов прикладных систем, управляющих выполнением определенных действий (см. заключительный раздел данной статьи).

Рассмотрим центральные идеи метода анализа текстов, предложенного в [9] и лежавшего в основе разработки мультилингвистического алгоритма ССА *SemSynt1*. Он является композицией алгоритмов, называемых *BuildMatr1* и *BuidlSem1*. Алгоритм *BuildMatr1* можно квалифицировать как *оригинальный алгоритм выявления семантических ролей*. Входные тексты могут быть вопросами многих видов, командами и описаниями фактов (ситуаций)

из практически интересных подязыков русского, английского и немецкого языков. Выход алгоритма *BuildMatr1* (точнее, главная часть выходных данных) является специальной строково-числовой матрицей *Matr*, называемой матричным семантико-синтаксическим представлением (МССП) входного текста. Матрица *Matr* динамически связана со вспомогательной структурой данных — двумерным массивом *ArIs*. Этот массив устанавливает соответствие между лексическими единицами из входного текста и семантическими единицами. Если элементарная значащая единица текста (или токен) *wd* имеет *N* различных значений, массив *ArIs* включает *N* последовательных строк, где для $k = 1, \dots, N$ *k*-я строка хранит сведения, относящиеся к *k*-му значению единицы *wd*.

Конфигурация МССП *Matr* изменяется в ходе семантико-синтаксической обработки текста. Каждая конфигурация определяет, в частности, размеченный ориентированный граф с вершинами, являющимися выделенными элементарными значащими единицами текста (токенами), и задает отображение из подмножества вершин графа, соответствующих лексическим единицам, в множество значений (смыслов), связанных с данными лексическими единицами через массив *ArIs*.

Рис. 1 иллюстрирует эту ситуацию для команды "Download the green container on the platform" ("Сгрузи зеленый контейнер на платформу"). Здесь V1[1] — значение *downloading1* (считывание файла), V1[2] — значение *downloading2* (выгрузка перемещаемого физического объекта); V2[1] — значение *green-colour* (зеленый цвет), V2[2] — значение *not-ripe* (незрелый), V2[3] — значение *a-member-of-green-movement* (участник экологического движения зеленых); V3[1] — значение *thing-container* (контейнер-вещь), V3[2] — значение *data-structure-of-RDF* (контейнер — структура данных языка RDF); V4[1] — значение *computer-platform* (компьютерная платформа), V4[2] — значение *station-platform* (станционная платформа), V4[3] — значение *political-platform* (политическая платформа). Рис. 2 иллюстрирует финальную ситуацию.

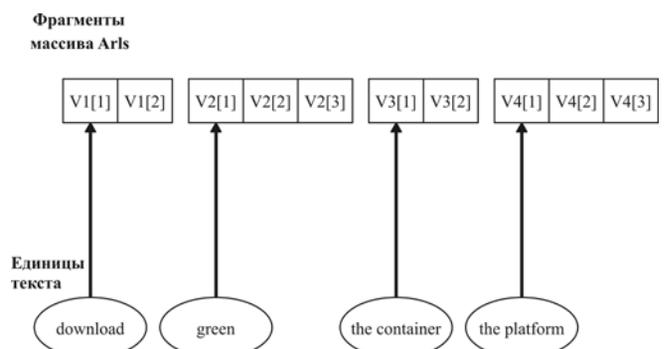


Рис. 1. Начальные граф и соответствие, заданные МССП *Matr*

Фрагменты
массива ArIs

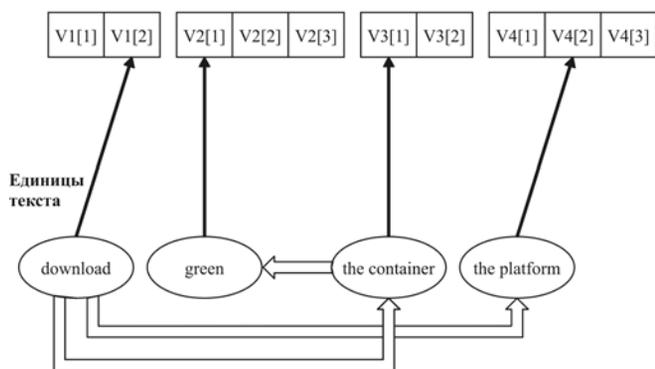


Рис. 2. Финальные граф и соответствие, заданные МССП matr

Выход (его главная часть Matr) алгоритма выявления семантических ролей BuildMatr1 является входом алгоритма семантической сборки BuildSem1. Этот второй алгоритм преобразует информацию, хранимую матрицей Matr, в возможное СП входного текста, являющееся его К-представлением.

Естественно-языковой интерфейс для управления файловой системой

Проблемы использования графических интерфейсов. В последние 15—20 лет стандартом пользовательского интерфейса де-факто является графический интерфейс пользователя (ГИП). Эволюционное усложнение программного обеспечения (ПО) по мере роста мощности вычислительной техники привело к тому, что ГИП стал все более и более усложняться, все чаще сталкиваясь с ограниченными возможностями отображения графики на экране. Это привело к двум неприятным последствиям:

- часть возможностей ПО оказывается неизвестной пользователю, так как он их не находит в бесконечных меню, вложенных друг в друга элементах интерфейса и открывающихся друг за другом окнах;
- поиск файлов по папкам или программ в меню системы все чаще превращается в утомительный процесс. Пользователь затрачивает длительное время на поиск или (если он помнит, где находится требуемый ему элемент интерфейса: кнопка, пункт меню, флажок и др.) на доступ к данному элементу.

Анализ показывает, что перспективным выходом из данной сложной ситуации является разработка интерфейсов, предоставляющих пользователю прикладной компьютерной системы (ПКС) возможность взаимодействия с ней на ограниченном ЕЯ — русском, английском и др. При этом ЕЯ-интерфейсы для управления ПКС рассматриваются как дополнения и/или альтернативы графическим интерфейсам пользователя. Большая часть работ в области ЕЯ-интерфейсов посвящена интерфейсам

к базам данных. Тема управления программным обеспечением исследована слабее, однако и в этом направлении ведутся работы, например [32].

В настоящее время имеются различные программы, использующие ЕЯ-интерфейс для управления программным обеспечением, в том числе: (а) Siri — средство речевого управления телефонами iPhone 4S/5 [33]; (б) ее русскоязычный аналог: *Собеседник HD* [34]; (в) *Ubiquity* — дополнение к Web-обозревателю Firefox [35]; (г) *Braina Project* — программное обеспечение для управления компьютером в целом [36]; (д) *NLUI Server* — серверное программное обеспечение для построения сценариев взаимодействия с программами на ЕЯ и встраивания поддержки ЕЯ-интерфейса в приложения [37].

Описанные решения выполняют простые одноактные команды: "Открыть файл [имя файла]", "Создать папку [наименование папки]", "Скопировать файл [имя файла] в папку [имя папки]" и т. д. В то же время диапазон пользовательских команд неизмеримо шире, он может включать в себя такие сложные конструкции, как "Скопировать все текстовые и музыкальные файлы, созданные в этом году, из папки А в папку Б, запаковать их и отправить по электронной почте на адрес `someperson@example.org`". Учень все многообразие возможных пользовательских команд, используя прямолинейный подход к обработке входных предписаний, невозможно.

Для создания ЕЯ-интерфейсов управления компьютерными системами необходимы разработка формального аппарата, описывающего управление ПО с помощью естественно-языковых предписаний (команд), а также программная реализация управления на его основе.

Метод извлечения смысловых структур из ЕЯ-текстов, охарактеризованный выше, был модифицирован [30, 31] и использован для разработки алгоритма семантико-синтаксического анализа SemSynt2. Отправной точкой стал алгоритм SemSynt1, описанный в гл. 9 и 10 монографии [9]. Мы разработали первую версию системы Natural Language Commander (NLC-1) — файлового менеджера с ЕЯ-интерфейсом. Его основным алгоритмом является SemSynt2. Главная цель проекта — создать работающую теорию построения ЕЯ-интерфейсов для прикладных компьютерных систем и практически полезную программную систему для человеко-машинного взаимодействия. Данное приложение конструирует первичное К-представление (КП), соответствующее инструкции, введенной пользователем, и преобразует его во вторичное КП.

В этом вторичном КП сложные понятия ("музыка", "видео" и т. д.) выражены через базовые понятия. Например, понятие "музыка" заменяется на "файл с расширением "mp3", "ogg" или "acc". Затем приложение трансформирует вторичное КП в сценарий командной оболочки операционной системы — в настоящее время это Bourne-again shell

(bash) и для Unix-подобных систем и для ОС семейства Windows — и исполняет данный сценарий.

Пример обработки команды. Рассмотрим обработку программой NLC-1 инструкции "Скопировать файлы из папки "My Video" в папку с названием "Video" на сетевой диск, если их размер не превышает свободное место на сетевом диске". Этой инструкции соответствует следующее первичное КП, сформированное алгоритмом SemSynt2:

*Если-то (Меньше (Размер (все фильм * (Расположение, не папка1 * (Наименование1, "My video")):o1), Свободное-место(нек диск1 * (Тип1, Сетевой1):o2)), Команда(#Оператор#, #Исполнитель#, #сейчас#, Копирование1 * (Источник1, o1)(Назначение1, не папка1 * (Наименование1, ("Video"))(Расположение, o2))).*

В этом случае, если база знаний NLC-1 содержит правила преобразования *Фильм* \vdash *Файл* * (*Расширение1*, ("avi" OR "mov" OR "mkv")), *диск1* * (*Тип*, *Сетевой*) \vdash *диск1* * (*Наименование1*, "N"), система NLC-1 преобразует первичное КП инструкции пользователя во вторичное КП вида

*Если-то (Меньше (Размер (все Файл1 * (Расширение1, ("avi" OR "mov" OR "mkv"))) (Расположение, не папка1 * (Наименование1, "My video")):o1), Свободное-место (нек диск1 * (Наименование1, "N"): o2)), Команда (#Оператор#, #Исполнитель#, #сейчас#, Копирование1 * (Источник1, o1)(Назначение1, не папка1 * (Наименование1, ("Video")) (Расположение, o2))).*

Тогда итоговый сценарий командной оболочки будет иметь вид *if [\$(du -cb "Download/*.avi" "Download/*.mov" "Download/*.mkv" | grep total) sed -e "s/ \.s.*\$/g") -le \$(free -space N:)]; then cp "Download/*.avi" "Download/*.mov" "Download/*.mkv" "N:/Video".fi.*

Разработанное на языке программирования Haskell [38—40] приложение NLC-1 является гибким и расширяемым приложением. Оно может быть настроено исследователем для различных областей применения и различных командных оболочек.

Заключение

Существенно расширены теоретические основы ветвей компьютерной семантики, называемых Выявлением семантических ролей и Фреймово-семантическим анализом. Класс СК-языков открывает новые перспективы для формализации лексической семантики, представления семантического содержания сложных (по-видимому, практически произвольных) предложений и дискурсов на ЕЯ, а также для создания моделей онтологий нового поколения и баз целей в самых разных научных центрах. Реализация системы NLC-1 с русскоязычным интерфейсом показывает, что метод и алгоритмы семантико-синтаксического анализа, предложенные в [9, 10, 24], являются полезными для приложений и обогащают ВСП и ФСА альтернативным подходом к автоматическому выявлению семантических ролей.

Многочисленные существующие проекты КОЕЯ получили адекватный теоретический аппарат для формального описания семантических структур предложений и дискурсов. Для разработки Мультилингвистического Семантического Веба также очень важно, что СК-языки дают удобный промежуточный уровень для перехода от входного ЕЯ-текста к выражениям языков RDF, RDFS и OWL из онтологий (см. гл. 6 монографии [9]).

Список литературы

1. Wang C., Xiong M., Zhou Q., Yu Y. PANTO: a portable NL-interface to ontologies // 4th European Semantic Web Conference Proceedings. Springer, 2007. P. 473—487.
2. Cimiano P., Haase P. et al. Towards Portable Natural Language Interfaces to Knowledge Bases — the Case of the ORAKEL System // Data and Knowledge Engineering. 2008. V. 65. N. 2. P. 325—354.
3. Aggarwal N., Polajnar T., Buitelaar P. Cross-Lingual Natural Language Querying over the Web of Data // Metais E., Mezziane F., Saraee M., Sugumaran V., Vadera S. (eds.). Natural Language Processing and Information Systems. 18th Intern. Conference on Applications of Natural Language to Information Systems, NLDB 2013, Salford, UK, June 2013. Proceedings. Lecture Notes in Computer Science. Berlin, Heidelberg: Springer. 2013. V. 7934. P. 152—163.
4. Ferre S. SQUAL: A Controlled Natural Language as Expressive as SPARQL 1.1 // Metais E., Mezziane F., Saraee M., Sugumaran V., Vadera S. (eds.). Natural Language Processing and Information Systems. NLDB 2013. Berlin. Proceedings. Lecture Notes in Computer Science. Salford, UK, June 2013. Heidelberg: Springer. 2013. V. 7934. P. 114—125.
5. Buitelaar P., Choi K.-S., Cimiano P., Hovy E. H. (Eds.) Report from Dagstuhl Seminar 12362 "The Multilingual Semantic Web" (2—9 September, 2012). Schloss Dagstuhl: Leibniz-Zentrum fuer Informatik. 2012. 94 p.
6. Clark P., Harrison P. Boeing's NLP System and the Challenges of Semantic Representation // Proc. SIGSEM Symposium on Text Processing (STEP'08), Venice, Italy, 2008. ACL. 2008. P. 263—276.
7. Marquez L., Carreras X., Litkowski K. C., Stevenson S. Semantic Role Labeling: an Introduction to the Special Issue // Computational Linguistics. 2008. V. 34, N. 2. P. 145—159.
8. Wintner S. What Science Underlies Natural Language Engineering? // Computational Linguistics. 2009. V. 35, N. 4. P. 641—644.
9. Fomichev V. A. Semantics-Oriented Natural Language Processing: Mathematical Models and Algorithms. New York, Dordrecht, Heidelberg, London: Springer, 2010. 354 p.
10. Фомичев В. А. Формализация проектирования лингвистических процессов. М.: МАКС Пресс, 2005. 368 с.
11. Фомичев В. А. Математические основы представления содержания посланий компьютерных интеллектуальных агентов. М.: ГУ-ВШЭ, ТЕИС. 2007. 176 с.
12. Das D., Chen D., Martins A. F. T., Schneider N., Smith N. A. Frame-Semantic Parsing // Computational Linguistics. 2014. V. 40, N. 1. P. 9—56.
13. Gildea D., Jurafsky D. Automatic Labeling of Semantic Roles // Computational Linguistics. 2002. V. 28, N. 3. P. 245—288.
14. Kingsbury P., Palmer M. 2002. From TreeBank to PropBank // Proceeding of Third Intern. Conference on Language Resources and Evaluation — LREC. 2002, Las Palmas, Spain. 2002. P. 1989—1993.
15. Marcus M. P., Marcinkiewicz M. A., Santorini B. Building a large annotated corpus of English: the Penn TreeBank // Computational Linguistics. 1993. V. 19, N. 2.
16. Punyakanok V., Roth D., Yih W. T. The importance of syntactic parsing and inferencing in semantic role labeling // Computational Linguistics. 2008. V. 34, N. 2. P. 257—287.
17. Blanco E., Moldovan D. Leveraging verb-argument structures to infer semantic relations // Proceedings of the 14th Conference of the European Chapter of the Association for Computational Linguistics, Gothenburg, Sweden, April 26—30, 2014. ACL, 2014. P. 145—154.
18. Yi S., Loper E., Palmer M. Can semantic roles generalize across genres? // Proceedings of the Human Language Technologies

Conference of the North American Chapter of the ACL. Rochester, NY, 2007. P. 548–555.

19. **Fillmore C., Johnson C. R., Petruck M. R. L.** Background to FrameNet // International Journal of Lexicography. 2003. V. 16, N. 3. P. 235–250.

20. **Fomichov V. A., Kirillov A. V.** A Formal Model for Constructing Semantic Expansions of the Search Requests about the Achievements and Failures // Artificial Intelligence: Methodology, Systems, and Applications / Ramsay A., Agre G. (Eds.). Lecture Notes in Computer Science. V. 7557. Berlin, Heidelberg: Springer, 2012. P. 296–304.

21. **Fomichov V. A.** A Mathematical Model for Describing Structured Items of Conceptual Level // Informatica. An International Journal of Computing and Informatics (Slovenia). 1996. V. 20, N 1. P. 5–32.

22. **Фомичев В. А.** Математические основы представления смысла текстов для разработки лингвистических информационных технологий. Часть I // Информационные технологии. 2002. № 10. С. 16–25.

23. **Фомичев В. А.** Математические основы представления смысла текстов для разработки лингвистических информационных технологий. Часть II // Информационные технологии. 2002. № 11. С. 34–45.

24. **Фомичев В. А.** Новый метод преобразования естественно-языковых текстов в семантические представления // Информационные технологии. 2005. № 10. С. 25–35.

25. **Fomichov V. A.** A Comprehensive Mathematical Framework for Bridging a Gap between Two Approaches to Creating a Meaning-Understanding Web // Intern. Journal of Intelligent Computing and Cybernetics. 2008. V. 1, N. 1. P. 143–163.

26. **Fomichov V. A.** Theory of K-representations as a Comprehensive Formal Framework for Developing a Multilingual Semantic Web // Informatica. An Intern. Journal of Computing and Informatics (Slovenia). 2010. V. 34, N. 3. P. 387–396.

27. **Fomichov V. A.** SK-languages as a Comprehensive Formal Environment for Developing a Multilingual Semantic Web // Decker H., Lhotská L., Link S., Spies M., Wagner R. R. (Eds.). Database and Expert Systems Applications, 25th Intern. Conference, DEXA 2014, Munich, Germany, September 1–4, 2014, Part I, Proceedings. Lecture Notes in Computer Science. Cham: Springer International Publishing Switzerland. 2014. V. 8644. P. 394–401.

28. **Правиков А. А., Фомичев В. А.** Разработка рекомендательной системы с естественно-языковым интерфейсом на ос-

нове математических моделей семантических объектов // Бизнес-информатика. Междисциплинарный научно-практический журнал ГУ-ВШЭ. 2010. № 4(14). С. 3–11.

29. **Захлебни И. В., Фомичев В. А.** Разработка метода семантического поиска специалистов в корпоративной базе данных по естественно-языковым запросам // Информационные технологии. 2015. № 5. С. 323–331.

30. **Fomichov V. A., Razorenov A. A.** A New Method of Extracting Structured Meanings from Natural Language Texts and Its Application // E. Metais, M. Roche, M. Teisseire (Eds.). Natural Language Processing and Information Systems. 19th International Conference on Applications of Natural Language to Information Systems, NLDB 2014, Montpellier, France, June 18–20, 2014, Proceedings. Cham: Springer International Publishing Switzerland. 2014. P. 81–84.

31. **Razorenov A. A., Fomichov V. A.** The Design of a Natural Language Interface for File System Operations on the Basis of a Structured Meanings Model // Procedia Computer Science, Elsevier. V. 31. P. 1005–1011; open access, URL: <http://authors.elsevier.com/sd/article/S1877050914005304>.

32. **Chong S., Pucella R.** A Framework for Creating Natural Language User Interfaces for Action-Based Applications // Proceedings of the Third International AMAST Workshop on Algebraic Methods in Language Processing. TWLT Report 21. 2003. P. 83–98.

33. **Домашняя** страница Siri: <http://www.apple.com/ios/siri/> — Электронный ресурс (проверено 17.12.2014).

34. **Домашняя** страница Sobesednik HD: <http://sobesednik.idevelops.com/> — Электронный ресурс (проверено 17.12.2014).

35. **Домашняя** страница Ubiquity Home Page: <https://wiki.mozilla.org/Labs/Ubiquity> — Электронный ресурс (проверено 17.12.2014).

36. **Домашняя** страница Braina Project Home Page: <http://www.brainasoft.com/braina/#overview> — Электронный ресурс (проверено 17.12.2014).

37. **Домашняя** страница NLUI Server Home Page: http://www.linguasys.net/web_production/server-item/NLUI%20Server — Электронный ресурс (проверено 17.12.2014).

38. **Marlow S.** Parallel and Concurrent Programming in Haskell. O'Reilly. 2013.

39. **O'Sullivan B., Stewart D., Goerzen J. J.** Real World Haskell. O'Reilly. 2008.

40. **Peyton Jones S.** Haskell 98 Language and Libraries: the Revised Report. Cambridge University Press. 2003.

V. A. Fomichov, Professor, e-mail: vfomichov@hse.ru,
A. A. Razorenov, Ph. D. student, e-mail: razorenov@mail.ru

National Research University Higher School of Economics (HSE), Moscow, Russia

The Significance of the K-Representations Theory for the Studies on Automatic Semantic Role Labeling

The paper shows an incompleteness of theoretical foundations of the Computational Semantics branches called Semantic Role Labeling and Frame-Semantic Parsing. This situation is a consequence of a seeming lack of a semantic formalism allowing to describe semantic structures of complex sentences and discourses pertaining to arbitrary application domains. It is concluded that the theory of K-representations (knowledge representations) provides a formalism of the kind, determining a new class of formal languages — the class of SK-languages (standard knowledge languages). Some new expressive mechanisms of SK-languages are illustrated. The central ideas of a method of semantic parsing of natural language (NL) texts proposed by the theory of K-representations are set forth. The method employs the class of SK-languages for constructing semantic representations of texts. The final part of the paper considers the application of the method to designing NL-interfaces for software management. A file manager with a NL-interface NLC-1 (Natural Language Commander — Version One) has been developed, the system is implemented with the help of the functional programming language Haskell.

Keywords: natural language, semantic-syntactic analysis of texts, semantic parsing, semantic role labeling, frame-semantic parsing, semantic representation, theory of K-representations, SK-language, linguistic database, software management, file system natural language management, Natural Language Commander, Haskell

References

1. Wang C., Xiong M., Zhou Q., Yu Y. PANTO: a portable NL-interface to ontologies. *4th European Semantic Web Conference Proceedings*. Springer, 2007. P. 473–487.
2. Cimiano P., Haase P. et al. Towards Portable Natural Language Interfaces to Knowledge Bases — the Case of the ORAKEL System. *Data and Knowledge Engineering*. 2008. V. 65, N. 2. P. 325–354.
3. Aggarwal N., Polajnar T., Buitelaar P. Cross-Lingual Natural Language Querying over the Web of Data. Metais E., Mezziane F., Saraee M., Sugumaran V., Vadera S. (eds.). *Natural Language Processing and Information Systems. 18th Intern. Conference on Applications of Natural Language to Information Systems, NLDB 2013*, Salford, UK, June 2013, Proceedings. Lecture Notes in Computer Science. Berlin, Heidelberg: Springer. 2013. V. 7934. P. 152–163.
4. Ferre S. SQUALL: A Controlled Natural Language as Expressive as SPARQL 1.1. Metais E., Mezziane F., Saraee M., Sugumaran V., Vadera S. (eds.). *Natural Language Processing and Information Systems. NLDB 2013*. Salford, UK, June 2013. Proceedings Lecture Notes in Computer Science. Berlin, Heidelberg: Springer. 2013. V. 7934. P. 114–125.
5. Buitelaar P., Choi K.-S., Cimiano P., Hovy E. H. (Eds.) *Report from Dagstuhl Seminar 12362 "The Multilingual Semantic Web" (2–9 September, 2012)*. Schloss Dagstuhl: Leibniz-Zentrum fuer Informatik. 2012. 94 p.
6. Clark P., Harrison P. Boeing's NLP System and the Challenges of Semantic Representation. *Proc. SIGSEM Symposium on Text Processing (STEP'08)*. Venice, Italy, 2008. ACL. 2008. P. 263–276.
7. Marquez L., Carreras X., Litkowski K. C., Stevenson S. Semantic Role Labeling: an Introduction to the Special Issue. *Computational Linguistics*. 2008. V. 34, N. 2. P. 145–159.
8. Wintner S. What Science Underlies Natural Language Engineering? *Computational Linguistics*. 2009. V. 35, N. 4. P. 641–644.
9. Fomichov V. A. Semantics-Oriented Natural Language Processing: Mathematical Models and Algorithms. New York, Dordrecht, Heidelberg, London: Springer, 2010. 354 p.
10. Fomichov V. A. Formalizatsiya proektirovaniya lingvisticheskikh protsessorov. Moscow: MAKS Press, 2005. 368 p.
11. Fomichov V. A. *Matematicheskie osnovy predstavleniya sodержaniya poslanii kompyuternykh intellektualnykh agentov*. Moscow: State University — Higher School of Economics, Publishing House "TEIS". 2007. 176 p.
12. Das D., Chen D., Martins A. F. T., Schneider N., Smith N. A. Frame-Semantic Parsing. *Computational Linguistics*. 2014. V. 40, N. 1. P. 9–56.
13. Gildea D., Jurafsky D. Automatic Labeling of Semantic Roles. *Computational Linguistics*. 2002. V. 28, N. 3. P. 245–288.
14. Kingsbury P., Palmer M. 2002. From TreeBank to PropBank. *Proc. LREC*. 2002.
15. Marcus M. P., Marcinkiewicz M. A., Santorini B. Building a large annotated corpus of English: the Penn TreeBank. *Computational Linguistics*. 1993. V. 19, N. 2.
16. Punyakanok V., Roth D., Yih W. T. The importance of syntactic parsing and inferring in semantic role labeling. *Computational Linguistics*. 2008. V. 34, N. 2. P. 257–287.
17. Blanco E., Moldovan D. Leveraging verb-argument structures to infer semantic relations. *Proc. of the 14th Conference of the European Chapter of the Association for Computational Linguistics, Gothenburg, Sweden, April 26–30, 2014*. ACL, 2014. P. 145–154.
18. Yi S., Loper E., Palmer M. Can semantic roles generalize across genres? *Proc. of the Human Language Technologies Conference of the North American Chapter of the ACL*. Rochester, NY, 2007. P. 548–555.
19. Fillmore C., Johnson C. R., Petruck M. R. L. Background to FrameNet. *International Journal of Lexicography*. 2003. V. 16, N. 3. P. 235–250.
20. Fomichov V. A., Kirillov A. V. A Formal Model for Constructing Semantic Expansions of the Search Requests about the Achievements and Failures. *Artificial Intelligence: Methodology, Systems, and Applications*. Ramsay A., Agre G. (Eds.). Lecture Notes in Computer Science. V. 7557. Berlin, Heidelberg: Springer, 2012. P. 296–304.
21. Fomichov V. A. A Mathematical Model for Describing Structured Items of Conceptual Level. *Informatica. An International Journal of Computing and Informatics (Slovenia)*. 1996. V. 20, N. 1. P. 5–32.
22. Fomichov V. A. Matematicheskie osnovy predstavleniya smysla tekstov dlya razrabotki lingvisticheskikh informatsionnykh tekhnologii. Part I. *Informatsionnye Tekhnologii*. 2002. N. 10. P. 16–25 (in Russian).
23. Fomichov V. A. Matematicheskie osnovy predstavleniya smysla tekstov dlya razrabotki lingvisticheskikh informatsionnykh tekhnologii. Part II. *Informatsionnye Tekhnologii*. 2002. N. 11. P. 34–45 (in Russian).
24. Fomichov V. A. Novyi metod preobrazovaniya yestestvenno-yazykovykh tekstov v semanticheskie predstavleniya. *Informatsionnye Tekhnologii*. 2005. N. 10. P. 25–35 (in Russian).
25. Fomichov V. A. A Comprehensive Mathematical Framework for Bridging a Gap between Two Approaches to Creating a Meaning-Understanding Web. *Intern. Journal of Intelligent Computing and Cybernetics*. 2008. V. 1, N. 1. P. 143–163.
26. Fomichov V. A. Theory of K-representations as a Comprehensive Formal Framework for Developing a Multilingual Semantic Web. *Informatica. An Intern. Journal of Computing and Informatics (Slovenia)*. 2010. V. 34, N. 3. P. 387–396.
27. Fomichov V. A. SK-languages as a Comprehensive Formal Environment for Developing a Multilingual Semantic Web. Decker H., Lhotská L., Link S., Spies M., Wagner R. R. (Eds.). *Database and Expert Systems Applications, 25th Intern. Conference, DEXA 2014, Munich, Germany, September 1–4, 2014. Part I*. Proceedings. Lecture Notes in Computer Science. Cham: Springer International Publishing Switzerland. 2014. V. 8644. P. 394–401.
28. Pravikov A. A., Fomichov V. A. Razrabotka rekomendatsionnoy sistemy s estestvenno-yazykovym interfeisom na osnove matematicheskikh modeli semanticheskikh obyektov. *Business Informatics. Interdisciplinary scientific-practical journal of State University — Higher School of Economics, Moscow*. 2010. N. 4(14). P. 3–11 (in Russian).
29. Zakhlebina I. V., Fomichov V. A. Razrabotka metoda semanticheskogo poiska spetsialistov v korporativnoy baze dannykh po estestvenno-yazykovym zaprosam. *Informatsionnye Tekhnologii*. 2015. N. 6. P. 323–331 (in Russian).
30. Fomichov V. A., Razorenov A. A. A New Method of Extracting Structured Meanings from Natural Language Texts and Its Application. E. Metais, M. Roche, M. Teisseire (Eds.). *Natural Language Processing and Information Systems. 19th International Conference on Applications of Natural Language to Information Systems, NLDB 2014, Montpellier, France, June 18–20, 2014*. Proceedings. Cham: Springer International Publishing Switzerland. 2014. P. 81–84.
31. Razorenov A. A., Fomichov V. A. The Design of a Natural Language Interface for File System Operations on the Basis of a Structured Meanings Model. *Procedia Computer Science, Elsevier*. V. 31. P. 1005–1011; open access, URL: <http://authors.elsevier.com/sd/article/S1877050914005304>.
32. Chong S., Pucella R. A Framework for Creating Natural Language User Interfaces for Action-Based Applications. *Proc. of the Third International AMAST Workshop on Algebraic Methods in Language Processing. TWLT Report 21*. 2003. P. 83–98.
33. Home Page Siri: <http://www.apple.com/ios/siri/> — Electronic resource (retrieved 17.12.2014).
34. Home Page Sobesednik HD: <http://sobesednik.idevelops.com/> — Electronic resource (retrieved 17.12.2014).
35. Ubiquity Home Page: <https://wiki.mozilla.org/Labs/Ubiquity> — Electronic resource (retrieved 17.12.2014).
36. Braina Project Home Page: <http://www.brainasoft.com/braina/#overview> — Electronic resource (retrieved 17.12.2014).
37. NLUI Server Home Page: http://www.linguasys.net/web_production/server-item/NLUI%20Server — Electronic resource (retrieved 17.12.2014).
38. Marlow S. *Parallel and Concurrent Programming in Haskell*. O'Reilly. 2013.
39. O'Sullivan B., Stewart D., Goerzen J. J. *Real World Haskell*. O'Reilly. 2008.
40. Peyton Jones S. *Haskell 98 Language and Libraries: the Revised Report*. Cambridge University Press. 2003.