

СОВРЕМЕННЫЕ СРЕДСТВА ФОРМАЛИЗАЦИИ СЕМАНТИКИ ОБЛАСТЕЙ ЗНАНИЙ НА ОСНОВЕ ОНТОЛОГИЙ

Загорулько Юрий Алексеевич

К.т.н., зав. лабораторией искусственного интеллекта,
Институт систем информатики им. А.П. Ершова СО РАН,
630090, г. Новосибирск, пр. Лаврентьева 6, e-mail: zagor@iis.nsk.su

Аннотация. В статье рассматриваются современные средства формализации семантики областей знаний на основе онтологий: дескриптивные логики, языки и инструменты формализации знаний, предоставляемые технологией Semantic Web, и другие. Обсуждаются достоинства и недостатки наиболее значимых и популярных из них. Рассматриваются проблемы, возникающие при использовании средств технологии Semantic Web для построения онтологий, и предлагаются пути их решения.

Ключевые слова: формализация семантики области знаний, онтология, дескриптивные логики, языки описания онтологий, технологии Semantic Web

Цитирование: Загорулько Ю.А. Современные средства формализации семантики областей знаний на основе онтологий // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2018. № 3 (11). С. 27–36. DOI:10.25729/2413-0133-2018-3-03

Введение. В настоящее время наиболее адекватным и эффективным средством формализации знаний являются онтологии [5]. Они повсеместно используются для построения формальных моделей различных областей знаний с целью представления и фиксации общего разделяемого всеми экспертами (или, по крайней мере, их большинством) знания о них [11].

Онтология выступает в качестве базового средства формализации знаний для широкого класса информационных и интеллектуальных систем, в частности, для экспертных систем, систем поддержки принятия решений, различных систем информационной поддержки научной и производственной деятельности, включая порталы знаний и интеллектуальные научные интернет-ресурсы [4]. При этом онтологии используются не только для структурирования моделируемых областей знаний, но и непротиворечивого описания семантики используемых в них понятий.

Ранее построенные онтологии могут использоваться при разработке новых интеллектуальных и информационных систем. Это позволяет повторно использовать уже проверенные на практике знания и тем самым обеспечивать высокое качество создаваемых систем.

В статье рассматривается понятие «онтология», анализируются наиболее значимые и популярные средства описания онтологий, предлагаются технологии и средства построения онтологий, которые не только повышают изобразительные возможности языков описания онтологий, но и облегчают и ускоряют процесс разработки онтологий.

1. Понятие онтологий. Понятие онтология, заимствованное из философии, сейчас активно применяется не только в информатике и искусственном интеллекте, но и в других

технических и гуманитарных дисциплинах, таких как компьютерная лингвистика, биоинформатика, медицина, энергетика, информационная безопасность, юриспруденция и др.

Самым популярным определением онтологии является определение, данное Т. Грубером. Согласно ему, онтология является точной спецификацией концептуализации [10]. Причем в этом определении под концептуализацией понимается некоторая абстракция, т.е. упрощенное представление какой-то части мира или предметной области (ПО), построенное для определенной цели. Концептуализация включает понятия, отношения и другие сущности, которые предполагаются существующими в рассматриваемой области. Спецификация концептуализации предполагает наличие ее формального описания на каком-то языке.

Обычно формальную модель онтологии O представляют тройкой вида [1]:

$$O = \langle C, R, A \rangle. \quad (1)$$

где C – конечное непустое множество понятий (концептов) предметной области, которую определяет онтология O ; R – конечное множество отношений между понятиями ПО; A – конечное множество аксиом, описывающих семантические и структурные свойства понятий и отношений онтологии O .

Из определения (1) следует, что множество C должно быть конечным и непустым. Напротив, множества R и A могут быть пустыми, что соответствует частным видам онтологии, когда она вырождается в простой словарь ($R = \{\}, A = \{\}$), таксономию понятий ($R = \{ "Isa" \}, A = \{\}$), «легкую» (light-weighted) онтологию ($R \neq \{\}, A = \{\}$) и т.д.

Таким образом, онтология должна на базовом уровне, прежде всего, обеспечивать словарь понятий (терминов) для представления и обмена знаниями о предметной области и множество отношений, установленных между понятиями в этом словаре.

В целом же онтология представляет собой систему, состоящую из множества сущностей (понятий и отношений) и утверждений (аксиом и правил), ограничивающих смысловые значения сущностей в рамках данной предметной области.

Заметим, что в современных системах представления знаний в онтологию включают не только понятия, отношения между понятиями, их свойства и утверждения, ограничивающие их использование, но и конкретные экземпляры понятий и отношений, включая значения их свойств.

2. Средства описания онтологий. Для описания онтологий разработано множество логических, языковых и программных средств. Рассмотрим самые значимые и популярные из них.

2.1. Дескриптивные логики. Дескриптивные логики (ДЛ) – это семейство логик, специально спроектированных для представления знаний о предметной области [7]. Необходимость в таких логиках возникла в связи с тем, что такие популярные формализмы представления знаний, как семантические сети, фреймы и исчисление предикатов, несмотря на их неоспоримые достоинства, имеют ряд недостатков. Так, семантические сети и фреймы, обладая высокими по выразительности средствами для представления знаний, обеспечивают только неформальное описание понятий и отношений, а исчисление предикатов, обеспечивая высокий уровень формализации описания знаний, не предоставляет удобных средств для выражения специфических знаний о предметной области.

ДЛ являются семейством языков представления знаний, которые позволяют удобно описывать знания о ПО формальным способом. Такие знания описываются последовательно: сначала вводятся необходимые понятия (терминология), а затем эти понятия используются для точного описания свойств объектов (индивидуумов, экземпляров), встречающихся в ПО.

Базовыми элементами ДЛ являются концепты (понятия) и роли. Каждый концепт представляет класс, категорию или сущность. Роли служат для описания свойств концептов и отношений между ними. В ДЛ также входят конструкторы (операции), с помощью которых можно строить из базовых элементов понятия и роли более высокого уровня. При этом в состав выражений включается базовый набор операций (дополнение, объединение и пересечение множеств) и количественные ролевые ограничения.

База знаний, построенная средствами дескриптивной логики представляется в виде пары *Tbox* и *Abox*. *Tbox* (terminological knowledge) – это набор утверждений, описывающих терминологический словарь базы знаний, т.е. набор классов, их свойства и отношения между ними (интенциональные знания). *Abox* (assertional knowledge) представляет собой реализацию схемы классов в виде набора экземпляров, содержащих утверждения об экземплярах понятий (экстенциональные знания). По существу *Tbox* является моделью того, что может быть истинным, а *Abox* является моделью того, что в настоящее время является истинным.

Дескриптивный язык ДЛ имеет модельно-теоретическую семантику [17], поэтому утверждения в *TBox* и *ABox* могут отождествляться с формулами логики первого порядка или их незначительными расширениями.

В рамках ДЛ могут быть построены различные формальные языки (логики), которые различаются набором используемых конструкторов для понятий и ролей, а также ограничениями на интерпретацию ролей.

Благодаря тому, что ДЛ имеют формальную семантику, они позволяют не только описать терминологию и утверждения, но также предоставляют возможности по выполнению на их основе логического вывода (автоматического доказательства). Автоматическое доказательство обеспечивает ответы на такие запросы, как: *выполнимость понятий* (может ли существовать некоторое понятие *C*, описание которого задано в *Tbox*?); *включение* (является ли некоторое понятие *C* частным случаем (подмножеством) понятия *D*?); *согласованность* (является ли вся БЗ согласованной?); *проверка экземпляра* (является ли некоторое утверждение истинным?).

Запросы к *Tbox* определяют классификацию и отношения между понятиями, а запросы к *Abox* определяют текущее состояние известных фактов. Выполнимость понятия является доказательством того, что понятие, или понятийное выражение является логически согласованным с БЗ. Кроме этого операция включения может использоваться для обнаружения отношений класс-подкласс, которые заданы в БЗ неявно.

Достоинством ДЛ является то, что они позволяют строить формальные декларативные языки, обладающие большой выразительной мощностью для представления знаний. Другое их достоинство – применяемые в них процедуры логического вывода, как правило, завершаются, как при положительных, так и при отрицательных ответах. В то же время ДЛ трудны для освоения экспертами, которые не являются специалистами в области математики и программирования.

2.2. Средства формализации знаний в технологии Semantic Web. Технология Semantic Web [12] предоставляет набор методов и средства, предназначенных для представления информации в пригодном для машинной обработки виде. В последнее время эти средства широко применяются для представления знаний и данных, не только в Интернет, но и в различных интеллектуальных приложениях.

Наиболее известным средством технологии Semantic Web является *RDF* (Resource Description Framework) – разработанный консорциумом W3C язык (модель) для представления данных. *RDF* [5] предоставляет формализм для описания свойств ресурсов в виде утверждений вида «субъект-предикат-объект» и задает способ их записи в XML-формате, что удобно для машинной обработки.

Недостатком *RDF* является то, что он не придает никакого конкретного смысла терминам (элементам словаря), служащим для описания свойств, например, таким как *subClassOf* (“подкласс”) или *type* (“тип”). Эти и подобные им свойства интерпретируются в *RDF* как произвольные бинарные отношения.

Для решения указанной проблемы был создан язык *RDFS* (RDF Schema), в котором определен словарь терминов и отношений между терминами, а самое главное – задана их семантика, т.е. правила их интерпретации. Благодаря таким качествам *RDFS* может использоваться для описания онтологий. Однако *RDFS* редко используется для этих целей, так как Semantic Web предоставляет язык *OWL* (Web Ontology Language) [6], который на данный момент является самым мощным средством описания онтологий. *OWL* обеспечивает большую выразительность и более богатую семантику, чем другие языки описания онтологий.

Язык *OWL* имеет три диалекта: *OWL Full*, *OWL DL* и *OWL Lite*.

OWL Full предоставляет максимальную выразительность, но не гарантирует завершение вычислений за конечное время, поэтому не используется в практических приложениях.

OWL DL обеспечивает хорошую выразительность при сохранении разрешимости. Он включает все языковые конструкции *OWL*, но накладывает ограничения на их использование. В основе *OWL DL* лежит логика *SHOIN(D)* [13], которая допускает использование стандартных типов данных и описание классов в виде перечисления их элементов. Важно также заметить, что *OWL DL* поддерживается всеми существующими машинами вывода и многими редакторами онтологий. Благодаря этому *OWL DL* является самым используемым диалектом.

OWL Lite является самым простым диалектом и поддерживает только классификационную иерархию понятий, элементарные ограничения и простейшие виды аксиом. Тем не менее, этот диалект также получил широкое распространение у создателей онтологий.

Для записи и хранения *OWL*-онтологий используются различные форматы: *RDF/XML Syntax*, *OWL/XML Syntax*, *Manchester OWL Syntax*, *Turtle Syntax* и др. Возможность представления онтологий в формате, совместимом с *RDF*, позволяет хранить их в *RDF*-хранилищах, которых создано немало. Как правило, в такие хранилища встроены машины вывода, что позволяет использовать все возможности языка *OWL DL*.

Для поиска информации в онтологии используются языки *DL Query* и *SPARQL*.

Язык *DL Query* предназначен для формулирования запросов к онтологии и основан на Манчестерском синтаксисе, что делает его понятным пользователям, хорошо владеющим логикой.

Рекомендованный консорциумом W3C язык *SPARQL* позволяет формулировать запросы к онтологиям и данным, представленным в модели *RDF*. Язык *SPARQL* имеет синтаксис и функциональность, подобные языку *SQL*, и так же, как *SQL*, поддерживает не только выполнение запросов, но и редактирование данных.

Логический вывод в OWL-онтологиях на основе представленных в них аксиом осуществляется средствами одной из машин вывода (Pellet, FaCT++, HermiT и др.). Эти машины позволяют выводить информацию, не содержащуюся явным образом в онтологии.

Так как есть знания, которые не могут быть заданы с помощью стандартных аксиом языка *OWL*, был разработан язык *SWRL* (Semantic Web Rule Language) [16], позволяющий задавать дополнительные правила вывода. Язык *SWRL* базируется на объединении языков *OWL DL* и *RuleML*. Ядром *RuleML* является язык *Datalog*, являющийся синтаксическим подмножеством языка *Prolog*, поэтому *SWRL*-правила представляют собой известные хорновские дизъюнкты.

Для разработки онтологий создано множество редакторов. Наиболее популярным из них является *Protégé* [14]. Онтологии, построенные в *Protégé*, могут быть экспортированы в различные форматы, включая перечисленные выше.

Таким образом, технология Semantic Web дает богатый набор средств формализации знаний, которые обладают не только значительной выразительностью, но еще и являются разрешимыми, что позволяет их использовать в практических приложениях.

Одной из проблем, ограничивающих использование средств технологии Semantic Web, является их высокая сложность для пользователей, не знакомых с современными логиками. Это затрудняет использование этих средств в технологиях построения информационных и интеллектуальных систем, ориентированных на экспертов.

2.3. Формализация знаний в технологии построения порталов научных знаний.

Рассмотрим подход к формализации семантики области знаний на основе онтологий, который использован в технологии построения порталов научных знаний (ПНЗ) [3], т.е. специализированных интернет-порталов, обеспечивающих интеграцию и систематизацию научных знаний и информационных ресурсов определенной области знаний, а также содержательный доступ к ним из любой точки интернет-пространства.

Особенностью данной технологии является то, что она ориентирована на создание и сопровождение порталов знаний экспертами, не являющимися специалистами в области информатики и программирования. Другой ее важной особенностью является обеспечение возможности декларативной настройки портала на заданную область знаний не только в процессе создания, но и в ходе эксплуатации. Создание технологии с такими свойствами стало возможным благодаря выбору онтологии в качестве средства формализации семантики области знаний и использованию ее в качестве концептуальной основы ПНЗ.

Для представления онтологии был предложен формализм, обеспечивающий описание понятий моделируемой области знаний, их свойств и разнообразных семантических связей (отношений) между ними. Он позволяет выстраивать понятия в иерархию «общее–частное», поддерживать наследование свойств по этой иерархии, а также задавать ограничения на

значения возможных свойств (атрибутов) объектов – экземпляров понятий онтологии. Таким образом по своим выразительным возможностям этот формализм покрывает *OWL Lite*.

Данный формализм также обеспечивает дополнительные возможности для представления сложно-структурированной информации. Он позволяет использовать атрибутированные бинарные отношения, т.е. бинарные отношения, снабженные дополнительными атрибутами, специализирующими связь между двумя сущностями (аргументами отношения). Примером такого отношения может быть, например, отношение, связывающее между собой персону и организацию, в которой эта персона работает. Дополнительные атрибуты здесь нужны для того, чтобы отразить, в какой должности работает данная персона в этой организации и с какого времени.

Описанный выше формализм поддерживается редактором онтологий, который реализован как web-приложение и доступен через Интернет. Этот редактор более прост и удобен в использовании, чем редактор Protégé, не требует дополнительных знаний по дескриптивной логике, поэтому им могут пользоваться эксперты.

Согласно предложенной методологии онтология ПНЗ создается не с нуля, а на основе небольшого набора базовых онтологий путем специализации и расширения имеющейся в них системы понятий. Это значительно облегчает создание онтологии и ее дальнейшее сопровождение.

Описанный выше подход к построению порталов научных знаний получил развитие в технологии разработки тематических интеллектуальных научных интернет-ресурсов (ИНИР) [2], которые, как и ПНЗ, предназначены для осуществления информационной поддержки научной и производственной деятельности в определенной области знаний.

2.4. Формализация знаний в технологии разработки тематических ИНИР.

Концептуальный базис ИНИР, как и порталов научных знаний, составляет онтология, на основе которой организуется удобная навигация по научным знаниям и информационным ресурсам, интегрированным в ИНИР, а также содержательный поиск требующихся знаний, данных и средств их интеллектуальной обработки.

При реализации основных компонентов ИНИР используются средства технологии Semantic Web. В частности, онтологии ИНИР описываются на языке *OWL DL*, знания и данные хранятся в RDF-хранилище Jena Fuseki [8], поддерживающем стандартный язык запросов *SPARQL 1.1* [15], логический вывод и редактирование данных. Для облегчения и удобства реализации навигации по контенту ИНИР, поиска в нем и его редактирования был реализован программный интерфейс, обеспечивающий доступ к хранилищу данных в терминах понятий онтологии.

Следует заметить, что построение онтологии средствами языка *OWL* вызывает затруднения не только у экспертов (специалистов в моделируемых областях знаний), но и у инженеров знаний, так как *OWL* обеспечивает представление только простых сущностей, а в онтологии необходимо представлять сложные понятия и отношения.

Для представления таких сущностей технология построения ИНИР предлагает набор паттернов онтологического проектирования [9, 14]. В частности, для представления бинарных атрибутированных отношений и областей допустимых значений атрибутов были разработаны специальные структурные паттерны, а в онтологию введены служебные классы *Отношение с атрибутами* и *Домен*.

Для облегчения и ускорения процесса разработки онтологий данная технология предлагает также набор паттернов содержания, которые задают способы представления типовых фрагментов базовых онтологий, на основе которых могут строиться онтологии моделируемых предметных областей. Паттерны содержания разработаны для представления таких сущностей (классов), входящих в базовые онтологии, как *Объект исследования*, *Метод исследования*, *Деятельность*, *Проект*, *Научный Результат* и др.

На Рис. 1 представлен паттерн, предназначенный для описания методов исследования, используемых в научной деятельности. Элементы описания этого паттерна представлены обязательными (*Деятельность*, *Задача*) и необязательными (*Научный Результат*, *Персона*, *Организация*, *Публикация* и др.) классами онтологии и соответствующими им отношениями *используетсяВ*, *реализуетсяВ*, *решает* и др.



Рис. 1. Паттерн метода исследования

Хотя, технология разработки ИНИР является более трудной для освоения, чем технология разработки ПНЗ, она предоставляет большие возможности, в частности, обеспечивает использование ранее разработанных сторонних OWL-онтологий и поддерживают логический вывод для получения новых знаний.

Заключение. В статье дан краткий обзор современных средств формализации семантики областей знаний на основе онтологий. Обсуждены достоинства и недостатки наиболее значимых и популярных из них. Отмечено, что построение онтологии средствами языка OWL вызывает затруднения не только у экспертов, но и у инженеров знаний, из-за его недостаточной выразительности. Для решения этой проблемы предлагается технология построения онтологий, базирующаяся на паттернах онтологического проектирования. Эта технология не только повышает изобразительные возможности OWL, обеспечивая представление сложных понятий и отношений, но и облегчает и ускоряет сам процесс разработки онтологий.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 16-07-00569) и Президиума СО РАН (Блок 36.1. Комплексной программы ФНИ СО РАН II.1).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гаврилова Т.А., Хорошевский В.Ф. Базы знаний интеллектуальных систем. Учебник. Питер: СПб., 2000. 384 с.
2. Загорулько Ю.А., Загорулько Г.Б., Боровикова О.И. Технология создания тематических интеллектуальных научных интернет-ресурсов, базирующаяся на онтологии // Программная инженерия. 2016. № 2. С. 51–60.
3. Загорулько Ю.А., Боровикова О.И. Подход к построению порталов научных знаний // Автометрия. 2008. № 1. Т. 44. С. 100–110.
4. Загорулько Ю.А., Боровикова О.И., Загорулько Г.Б. Применение паттернов онтологического проектирования при разработке онтологий научных предметных областей // Аналитика и управление данными в областях с интенсивным использованием данных: сборник научных трудов XIX Международной конференции DAMDID/RCDL'2017 (10-13 октября 2017 года, Москва, МГУ, Россия) / под. ред. Л.А. Калиниченко, Я. Манолопулоса, Н.А. Скворцова, В.А. Сухомлина. М.: Изд-во ФИЦ ИУ РАН, 2017. С. 332–340. Режим доступа: <http://ceur-ws.org/Vol-2022/paper42.pdf>
5. Лапшин В.А. Онтологии в компьютерных системах. М.: Научный мир, 2010. 224 с.
6. Antoniou G., Harmelen F. Web Ontology Language: OWL // Handbook on Ontologies. Berlin: Springer Verlag. 2004. Pp. 67–92.
7. Baader F., Calvanese D., McGuinness D.L., Nardi D., Patel-Schneider P.F. The Description Logic Handbook: Theory, Implementation, Applications. Cambridge. 2003. 574 p.
8. Fuseki: serving RDF data over HTTP. Available at: http://jena.apache.org/documentation/serving_data/
9. Gangemi A., Presutti V. Ontology Design Patterns // Handbook on Ontologies. Berlin: Springer. 2009. Pp. 221–243.
10. Gruber T.R. Toward Principles for the Design of Ontologies Used for Knowledge Sharing // International Journal of Human-Computer Studies. 1995. Vol. 43. Iss. 5–6. Pp. 907–928.
11. Guarino N. Understanding, building and using ontologies // International Journal of Human-Computer Studies 46(2-3). Pp. 293–310. February 1997. DOI: 10.1006/ijhc.1996.0091
12. Hitzler P., Krötzsch V., Rudolph S. Foundations of Semantic Web Technologies. Chapman & Hall/CRC. 2009. 455 p.
13. Horrocks I. Applications of Description Logics: State of the Art and Research Challenges // Dau F., Mugnier ML., Stumme G. (eds.) Conceptual Structures: Common Semantics for Sharing Knowledge. ICCS-ConceptStruct 2005. Lecture Notes in Computer Science. vol. 3596. Berlin. Heidelberg: Springer. Pp. 78–90.
14. Protégé. A free, open-source ontology editor and framework for building intelligent systems. Available at: URL: <http://protege.stanford.edu/>
15. SPARQL Query Language for RDF. W3C Recommendation 15 January 2008. Available at: <http://www.w3.org/TR/rdf-sparql-query/>
16. SWRL: A Semantic Web Rule Language Combining OWL and RuleML. W3C Member Submission 21 May 2004. Available at: <http://www.w3.org/Submission/SWRL/>

UDK 004.822:004.89

**MODERN MEANS FOR FORMALIZING THE SEMANTICS OF KNOWLEDGE
AREAS ON THE BASIS OF ONTOLOGIES**

Yury A. Zagorulko

Dr., Head of Artificial Intelligence Laboratory

A.P. Ershov Institute of Informatics Systems of

Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences

6, Acad. Lavrentjev av., 630090, Novosibirsk, Russia, e-mail: zagor@iis.nsk.su

Abstract. The paper contains a short overview of modern means for formalizing the semantics of knowledge areas on the basis of ontologies: descriptive logics, languages and formalization tools provided by Semantic Web technology, and others. The advantages and disadvantages of the most significant and popular ones are discussed. The problems that arise when using the tools of Semantic Web technology for building ontologies are considered, and ways of their solution are suggested.

Keywords: formalization of the semantics of knowledge area, ontology, descriptive logics, ontology languages, Semantic Web technologies.

References

1. Gavrilova T.A., Horoshevskij V.F. Bazy znaniy intellektual'nyh sistem. Uchebnik [Knowledge bases of intelligent systems. Textbook]. Piter: SPb., 2000. 384 p. (in Russian).
2. Zagorulko Yu.A., Zagorulko G.B., Borovikova O.I. Tehnologija sozdaniya tematicheskikh intellektual'nyh nauchnyh internet-resursov, bazirujushhajasja na ontologii [Technology for building subject-based intelligent scientific internet resources based on ontology] // Programmnaja inzhenerija = Software Engineering. 2016. no. 2. Pp. 51–60. (in Russian).
3. Zagorulko Yu.A., Borovikova O.I. Podhod k postroeniyu portalov nauchnyh znaniy [An approach to constructing knowledge portals] // Avtometriya = Autometry. 2008. No.1. vol. 44. Pp. 100–110. (in Russian).
4. Zagorulko Yu., Borovikova O., Zagorulko G. Application of Ontology Design Patterns in the Development of the Ontologies of Scientific Subject Domains // Selected Papers of the XIX International Conference on Data Analytics and Management in Data Intensive Domains (DAMDID/RCDL 2017) Moscow, Russia, October 9-13, 2017. Leonid Kalinichenko, Yannis Manolopoulos, Nikolay Skvortsov, Vladimir Sukhomlin (Eds.). Pp. 258–265. Available at: <http://ceur-ws.org/Vol-2022/paper42.pdf>
5. Lapshin V.A. Ontologii v komp'yuternyh sistemah [Ontologies in computer systems]. Moscow. Nauchnyj mir = Science world. 2010. 224 p. (in Russian).
6. Antoniou G., Harmelen F. Web Ontology Language: OWL // Handbook on Ontologies. Berlin: Springer Verlag. 2004. Pp. 67–92.
7. Baader F., Calvanese D., McGuinness D.L., Nardi D., Patel-Schneider P.F. The Description Logic Handbook: Theory, Implementation, Applications. Cambridge. 2003. 574 p.

8. Fuseki: serving RDF data over HTTP. Available at: http://jena.apache.org/documentation/serving_data/
9. Gangemi A., Presutti V. *Ontology Design Patterns // Handbook on Ontologies*. Berlin: Springer, 2009. Pp. 221–243.
10. Gruber T.R. *Toward Principles for the Design of Ontologies Used for Knowledge Sharing // International Journal of Human-Computer Studies*. 1995. Vol. 43. Iss. 5–6. Pp. 907–928.
11. Guarino N. *Understanding, building and using ontologies // International Journal of Human-Computer Studies* 46(2-3). Pp. 293–310. February 1997. DOI: 10.1006/ijhc.1996.0091
12. Hitzler P., Krötzsch V., Rudolph S. *Foundations of Semantic Web Technologies*. Chapman & Hall/CRC. 2009. 455 p.
13. Horrocks I. *Applications of Description Logics: State of the Art and Research Challenges // Dau F., Mugnier ML., Stumme G. (eds.) Conceptual Structures: Common Semantics for Sharing Knowledge. ICCS-ConceptStruct 2005. Lecture Notes in Computer Science. vol. 3596. Berlin. Heidelberg: Springer. Pp. 78–90.*
14. Protégé. A free, open-source ontology editor and framework for building intelligent systems. Available at: URL: <http://protege.stanford.edu/>
15. SPARQL Query Language for RDF. W3C Recommendation 15 January 2008. Available at: <http://www.w3.org/TR/rdf-sparql-query/>
16. SWRL: A Semantic Web Rule Language Combining OWL and RuleML. W3C Member Submission 21 May 2004. Available at: <http://www.w3.org/Submission/SWRL/>
17. Tarski A. *Logic, Semantics, Metamathematics*. Oxford: Oxford University Press. 1956. 258 p.