

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования
БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

Факультет Информационных технологий и управления
Кафедра Интеллектуальных информационных технологий

ОТЧЁТ
по ознакомительной практике

Выполнил:

А. А. Крамич

Студент группы
421701

Проверил:

Н. В. Малиновская

Минск 2025

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
1 Формализация и сравнительный анализ языков представления информации в интеллектуальных системах: SPARQL и OWL	4
2 Формализация и сравнительный анализ инструментов для разработки интеллектуальных систем: Virtuoso и Blazegraph	9
Заключение	14
Список использованных источников	16

ВВЕДЕНИЕ

Цель:

Провести сравнительный анализ современных технологий разработки интеллектуальных систем, закрепить навыки формализации информации, а также приобрести и развить навыки исследования, анализа и сравнения технологических решений.

Задачи:

1. Изучить языки графового и онтологического программирования (SPARQL и OWL) как инструменты формализации декларативных знаний, провести анализ их особенностей, выявить сходства и различия между ними.
2. Рассмотреть современные инструменты для работы с графовыми базами данных (Virtuoso и Blazegraph), выявить их функциональные возможности и подходы к представлению знаний, сходства и отличительные особенности.
3. Формализовать полученные результаты в виде SCn-кода.
4. Оформить библиографические источники к полученным результатам по ГОСТ 7.1-2003.

1 ФОРМАЛИЗАЦИЯ И СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЯЗЫКОВ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ: SPARQL И OWL

SPARQL

- :=** [Язык запросов для семантической паутины, стандартизированный консорциумом W3C]
- :=** [SPARQL (Protocol and RDF Query Language)]
- ∈** *язык запросов*
- ∈** *семантические технологии*
- ⇒** *разработчик**:
 - *Рабочая группа W3C RDF*
 - *Эрик Прюдомм*
 - *Энди Ситон*
- ⇒** *год стандартизации**:
2008
- ⇒** *основная парадигма**:
декларативный поиск в графах
- ⇒** *описание**:
[SPARQL — реляционный язык запросов для работы с данными в формате RDF. Позволяет извлекать и манипулировать данными через сопоставление графовых шаблонов, поддерживает рекурсивные запросы и интеграцию распределенных источников.]
- ⇒** *описание**:
[Основная концепция SPARQL заключается в сопоставлении тройных паттернов (subject-predicate-object) с возможностью фильтрации, агрегации и композиции результатов через механизм FEDERATED QUERY.]
- ⇒** *назначение**:
[Стандарт де-факто для запросов к связанным данным, интеграции онтологий, построения семантических хранилищ и анализа графов знаний.]
- ⇒** *основные конструкции**:
 - {• [SELECT]
 - [CONSTRUCT]
 - [WHERE]
 - [FILTER]
 - [OPTIONAL]
 - [UNION]
 - [GRAPH]
 - [SERVICE]
 - }
- ⇒** *стратегия выполнения**:
pattern matching с оптимизацией join-order
- ⇒** *поддержка**:
 - [рекурсивные запросы (property paths)]
 - [модульность через подзапросы]
 - [транзакционные обновления (SPARQL Update)]
- ⇒** *применение**:
 - *семантические хранилища*

- интеграция гетерогенных данных
 - анализ графов знаний
 - верификация онтологий
 - когнитивная аналитика
- ⇒ *примеры использования**:
- {• [Извлечение связанных данных из DBpedia и Wikidata]
 - [Построение рекомендательных систем на графах]
 - [Валидация RDF-данных через SHACL-ограничения]
 - [Динамическая композиция микросервисов в Industry 4.0]
 - [Тематический анализ научных публикаций]
 - }
- ⇒ *реализации**:
- {• *Apache Jena*
 - *Virtuoso Universal Server*
 - *Blazegraph*
 - *GraphDB*
 - *Stardog*
 - }
- ⇒ *особенности**:
- {• [интеграция с OWL-онтологиями]
 - [поддержка федеративных запросов]
 - [расширяемость через пользовательские функции]
 - [кроссплатформенность]
 - [оптимизация распределенных вычислений]
 - }
- ⇒ *ограничения**:
- {• [сложность обработки больших графов (>1В триплов)]
 - [отсутствие встроенной временной логики]
 - [ограниченная поддержка потоковых данных]
 - }
- ⇒ *библиографические источники**:
- {• [SPARQL 1.1 Overview [Электронный ресурс] // W3C. 2013. URL: <https://www.w3.org/TR/sparql11-overview/> (дата обращения: 25.05.2025)]
 - [Harris S., Seaborne A. SPARQL 1.1 Query Language // W3C Recommendation. 2013.]
 - [Pérez J. et al. Semantics and Complexity of SPARQL // ACM Transactions on Database Systems. 2009.]
 - [Губанов Д.А. Семантические технологии и Linked Data. – М.: ДМК Пресс, 2022.]
 - [SPARQL 1.1 Protocol [Технический отчет] / W3C SPARQL Working Group. W3C, 2013. (W3C Recommendation). URL: <https://www.w3.org/TR/sparql11-protocol/> (дата обращения: 25.05.2025)]
 - [SPARQL 1.1 Entailment Regimes [Технический отчет] / W3C SPARQL Working Group. W3C, 2013. (W3C Recommendation). URL: <https://www.w3.org/TR/sparql11-entailment/> (дата обращения: 25.05.2025)]
 - }

OWL

- := [Web Ontology Language]
 := [OWL]

- ∈ язык онтологий
- ∈ семантические технологии
- ⇒ разработчик*:
 - Консорциум W3C
 - Джеймс Хендлер
 - Дебора МакГинесс
- ⇒ год стандартизации*:
 - 2004
- ⇒ основная парадигма*:
 - логическое описание онтологий
- ⇒ описание*:
 - [OWL — формальный язык для представления онтологий в семантической паутине. Обеспечивает строгую логическую основу для описания классов, свойств и отношений между ними с поддержкой автоматического вывода.]
- ⇒ описание*:
 - [Поддерживает три профиля (OWL Lite, OWL DL, OWL Full) с разным балансом выразительности и вычислительной сложности. Интегрирован с RDF и SPARQL для работы с графами знаний.]
- ⇒ назначение*:
 - [Создание сложных онтологий для семантической интеграции данных, автоматизации логического вывода и построения интеллектуальных систем управления знаниями.]
- ⇒ основные конструкции*:
 - {
 - [Класс (Class)]
 - [Объектное свойство (ObjectProperty)]
 - [Свойство данных (DataProperty)]
 - [Аксиома эквивалентности (EquivalentClasses)]
 - [Ограничения (Restrictions)]
 - [Аннотации (Annotations)]
- ⇒ стратегия вывода*:
 - автоматический логический вывод через алгоритмы tableaux
- ⇒ поддержка*:
 - [иерархии классов и свойств]
 - [кардинальные ограничения]
 - [транзитивные свойства]
 - [дизъюнкция классов]
 - [отрицание по дополнению]
- ⇒ применение*:
 - семантический веб
 - интеграция гетерогенных данных
 - биомедицинские онтологии
 - экспертные системы
 - умные каталоги продукции
- ⇒ примеры использования*:
 - {
 - [Онтология Gene Ontology для аннотации генов]
 - [База знаний DBpedia на основе Wikipedia]
 - [Медицинские онтологии SNOMED CT]
 - [Промышленные онтологии для Industry 4.0]
 - [Системы рекомендаций с семантической логикой]

- ⇒ }
реализации*:
 - *Protégé* (редактор онтологий)
 - *HermiT Reasoner*
 - *Pellet Reasoner*
 - *OWL API*
 - *TopBraid Composer*
- ⇒ }
особенности*:
 - [строгая формальная семантика]
 - [поддержка OWL-DL как фрагмента SHOIN(D)]
 - [расширяемость через SWRL-правила]
 - [модульность через owl:imports]
 - [поддержка многоязычных меток]
- ⇒ }
ограничения*:
 - [вычислительная сложность для больших онтологий]
 - [ограниченная поддержка временной логики]
 - [сложности с нечеткими онтологиями]
 - [проблемы версионности онтологий]
- ⇒ }
библиографические источники*:
 - [OWL 2 Web Ontology Language Document Overview [Электронный ресурс] // W3C. 2012. URL: <https://www.w3.org/TR/owl2-overview/> (дата обращения: 25.05.2025)]
 - [OWL 2 Web Ontology Language Structural Specification [Технический отчет] / W3C OWL Working Group. W3C, 2012. (W3C Recommendation). URL: <https://www.w3.org/TR/owl2-syntax/> (дата обращения: 25.05.2025)]
 - [Hitzler P. et al. OWL 2 Primer // W3C Working Group Note. 2009.]
 - [Антуфьев В.А. Семантические технологии и онтологический инжиниринг. – М.: НОЦ "Контроллинг 2020.]
 - [Horrocks I. et al. From SHIQ and RDF to OWL: The making of a web ontology language // Web semantics. 2003.]

Сравнение языков семантической паутины OWL и SPARQL

- = { • *OWL*
• *SPARQL*
}
- ⇒ сходства*:
 - [Оба стандартизированы W3C для работы с семантическими технологиями]
 - [Используют RDF в качестве базовой модели данных]
 - [Интегрируются в стек семантического веба (Linked Data)]
 - [Поддерживают расширяемость через пользовательские словари]
 - [Применяются для интеграции гетерогенных источников данных]
- ⇒ различия*:
 - [OWL - язык описания онтологий, SPARQL - язык запросов]
 - [OWL фокусируется на логическом выводе, SPARQL - на извлечении данных]
 - [OWL использует Description Logic, SPARQL - графовые паттерны]

- [OWL определяет TBox (схему данных), SPARQL работает с ABox (экземплярами)]
- [OWL поддерживает автоматическую классификацию, SPARQL - агрегацию и фильтрацию]
- [OWL требует reasoner'ов (HermiT), SPARQL - query engine'ов (Jena)]

}

⇒ *рекомендации по выбору*:*

- { • [Используйте OWL для формального описания доменных онтологий]
- [OWL подходит для автоматизации логического вывода]
- [Рекомендуется использовать OWL для создания иерархий классов с ограничениями]
- [Используйте OWL для валидации согласованности знаний]
- [Используйте SPARQL для извлечения данных из RDF-графов]
- [Рекомендуется использовать SPARQL для федеративных запросов к распределенным источникам]
- [SPARQL подходит для анализа связей между сущностями]
- [SPARQL подходит для динамической трансформации данных (CONSTRUCT)]
- [Комбинируйте OWL и SPARQL для построения интеллектуальных хранилищ знаний]
- [Можно использовать OWL и SPARQL для создания объяснимых ИИ-систем]
- [Рекомендуется использовать OWL и SPARQL для решения задач интеграции Big Data]
- [Комбинируйте OWL и SPARQL для реализации когнитивных сервисов Industry 4.0]

}

2 ФОРМАЛИЗАЦИЯ И СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ИНСТРУМЕНТОВ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ: VIRTUOSO И BLAZEGRAPH

Virtuoso

- := [Универсальный сервер баз данных с поддержкой семантических технологий]
- := [Virtuoso Universal Server]
- ∈ *семантическое хранилище*
 - := [гибридная СУБД]
- ∈ *инструмент для работы с Linked Data*
- ⇒ *разработчик**:
OpenLink Software
- ⇒ *год создания**:
1998
- ⇒ *текущая стабильная версия**:
[8.3]
- ⇒ *дата выпуска текущей версии**:
[15 марта 2024]
- ⇒ *лицензия**:
GPL v2 / Коммерческая
- ⇒ *язык разработки**:
C
- ⇒ *назначение**:
[Интеграция реляционных и графовых данных с поддержкой семантических запросов в масштабе предприятия.]
- ⇒ *варианты исполнения**:
 - { • *Virtuoso Cluster Edition*
 - := [Распределенная версия для больших данных]
 - ⇒ *примечание**:
[Поддержка горизонтального масштабирования с автоматическим шардированием.]
 - *Virtuoso Cloud Edition*
 - := [Управляемая облачная служба]
 - ⇒ *примечание**:
[Интеграция с AWS и Azure, SLA 99.95% доступности.]
- }
 - ⇒ *функциональные возможности**:
 - { • [хранение RDF-графов]
 - := [Поддержка триплетных хранилищ до 100+ миллиардов записей]
 - ⇒ *пример использования**:
[Хостинг DBpedia и Wikidata]
 - [выполнение SPARQL-запросов]
 - ⇒ *оптимизации**:
 - { • [индексация свойств]
 - [параллельная обработка]
 - [кэширование результатов]

- [гибридный SQL/RDF движок]
 - ⇒ *особенность**:
 - [Совместная обработка реляционных и графовых данных в единых запросах]
 - [поддержка бизнес-аналитики]
 - ⇒ *интеграции**:
 - {
 - [Tableau]
 - [Power BI]
 - [Qlik Sense]
- ⇒ *поддерживаемые стандарты**:
- {
 - SPARQL 1.1
 - RDF 1.1
 - SQL:2016
 - OWL 2 RL
 - JSON-LD
- ⇒ *экосистема расширений**:
- {
 - Virtuoso Faceted Browser
 - ⇒ *назначение**:
 - [Визуальный интерфейс для навигации по графам знаний.]
 - ODBC/JDBC драйверы
 - := [Поддержка 30+ языков программирования]
 - RDF ETL Toolkit
 - ⇒ *особенность**:
 - [Преобразование CSV/XML в RDF с маппингом]
- ⇒ *преимущества**:
- {
 - [высокая производительность запросов]
 - [поддержка ACID-транзакций]
 - [встроенный веб-сервер и SOAP/REST API]
 - [интеграция с Apache Kafka]
 - [поддержка геопространственных данных]
- ⇒ *недостатки**:
- {
 - [высокий порог вхождения]
 - [ограниченная документация для opensource-версии]
 - [высокие требования к RAM для больших графов]
- ⇒ *библиографические источники**:
- {
 - [Erling O., Mikhailov I. Virtuoso: RDF Support in a Native RDBMS // Semantic Web Information Management. 2010.]
 - [Virtuoso Documentation [Электронный ресурс] // URL: <https://docs.openlinksw.com/virtuoso/> (дата обращения: 25.05.2025)]
 - [Virtuoso RDF Store Architecture [Технический отчет] // OpenLink Software. 2023. 28 с. URL: <https://virtuoso.openlinksw.com/whitepapers/>]
 - [Erling O., Averbuch A. The Virtuoso Universal Server: SQL/RDF/XML Integration // IEEE Data Engineering Bulletin. 2006. Vol. 29, №4. P. 7-13.]

}

Blazegraph

- :=** [Высокопроизводительная графовая база данных для семантических вычислений]
- :=** [Blazegraph Database]
- ∈** *семантическое хранилище*
 - :=** [RDF-ориентированная СУБД]
- ∈** *инструмент для работы с Big Data*
- ⇒** *разработчик**:
SYSTAP LLC (приобретена Amazon Web Services)
- ⇒** *год создания**:
2006
- ⇒** *текущая стабильная версия**:
[2.1.6]
- ⇒** *дата выпуска текущей версии**:
[15 сентября 2023]
- ⇒** *лицензия**:
GPL v2 / Коммерческая
- ⇒** *язык разработки**:
Java
- ⇒** *назначение**:
[Обработка крупномасштабных графов знаний с субсекундной задержкой для аналитических и операционных задач.]
- ⇒** *варианты исполнения**:
 - {
 - *Blazegraph Database*
 - :=** [Базовый вариант с поддержкой RDF/SPARQL]
 - ⇒** *примечание**:
[Оптимизирован для кластерных развертываний с горизонтальным масштабированием.]
 - *Blazegraph GPU*
 - :=** [Ускоренная версия с использованием видеокарт]
 - ⇒** *примечание**:
[До 50x ускорение графовых алгоритмов через CUDA.]
- ⇒** *функциональные возможности**:
 - {
 - [хранение триплетов RDF]
 - ⇒** *емкость**:
[Поддержка графов >100 миллиардов триплов]
 - ⇒** *пример использования**:
[Бэкенд Wikidata Query Service]
 - [расширенная поддержка SPARQL 1.1]
 - ⇒** *особенности**:
 - {
 - [Property Paths]
 - [FEDERATED QUERY]
 - [агрегационные функции]
 - [интеграция с Big Data стеком]
 - ⇒** *поддержка**:
 - {
 - [Apache Kafka]

- [Apache Spark]
 - [Apache Hadoop]
- }
- [расширения для аналитики]
 - ⇒ *уточнение**:
 - [Встроенные алгоритмы: PageRank, Shortest Path, Community Detection]
- }
- ⇒ *поддерживаемые стандарты**:
 - {
 - *RDF 1.1*
 - *SPARQL 1.1*
 - *JSON-LD*
 - *TinkerPop 3*
- }
- ⇒ *экосистема расширений**:
 - {
 - *Blazegraph Workbench*
 - ⇒ *назначение**:
 - [Веб-интерфейс для администрирования и визуализации графов.]
 - *NanoSparqlServer*
 - := [Легковесный HTTP-сервер для REST API]
 - *GraphML Integration*
 - ⇒ *особенность**:
 - [Импорт/экспорт графов в формате GraphML]
- }
- ⇒ *преимущества**:
 - {
 - [линейная масштабируемость]
 - [поддержка транзакций ACID]
 - [интеграция с Apache Jena]
 - [оптимизация для GPU]
 - [поддержка геопространственных запросов]
- }
- ⇒ *недостатки**:
 - {
 - [ограниченная документация]
 - [высокий порог вхождения]
 - [требования к памяти (>64GB RAM для больших графов)]
- }
- ⇒ *библиографические источники**:
 - {
 - [Blazegraph Database Documentation [Электронный ресурс] // GitHub. URL: <https://github.com/blazegraph/database/wiki> (дата обращения: 25.05.2025)]
 - [Thompson B. Blazegraph™ Technical Overview [Технический отчет] // SYSTAP. 2014. 35 с.]
 - [Thompson B., Personick M. Blazegraph GPU: High Performance Graph Analytics // Proceedings of IEEE Big Data Conference. 2016. С. 942-951]
 - [Thompson B., Personick M. Scaling Blazegraph for Government-Scale Knowledge Graphs [Статья] // ISWC Conference Proceedings. 2017. С. 112-127]
- }

Сравнение семантических хранилищ Virtuoso и Blazegraph

- = {
 • *Virtuoso Universal Server*

- *Blazegraph Database*
- }
- ⇒ *сходства**:
 - {• [Обе являются высокопроизводительными RDF-хранилищами]
 - [Поддерживают стандарты W3C (SPARQL 1.1, RDF 1.1)]
 - [Обеспечивают обработку графов знаний в промышленных масштабах]
 - [Поддерживают ACID-транзакции]
 - [Имеют механизмы горизонтального масштабирования]
 - [Интегрируются с Apache Kafka и другими Big Data-инструментами]
 - [Используются в крупных проектах (DBpedia, Wikidata и др.)]
 - [Предоставляют REST API для доступа к данным]
 - [Поддерживают геопространственные запросы]
 - }
- ⇒ *различия**:
 - {• [Virtuoso — гибридная СУБД (SQL+RDF), Blazegraph — специализированное графовое хранилище]
 - [Virtuoso имеет более развитые инструменты администрирования, Blazegraph — более простую архитектуру]
 - [Virtuoso поддерживает больше форматов импорта/экспорта, Blazegraph фокусируется на RDF]
 - [Blazegraph имеет GPU-ускорение для графовых алгоритмов, Virtuoso оптимизирован для SQL-запросов]
 - [Virtuoso лучше подходит для смешанных (реляционных+RDF) нагрузок, Blazegraph — для чистых графовых операций]
 - [Virtuoso имеет более зрелую экосистему, Blazegraph — более прост в развертывании]
 - [Virtuoso поддерживает больше СУБД в качестве бэкенда, Blazegraph использует собственную модель хранения]
 - [Virtuoso имеет коммерческую поддержку от OpenLink, Blazegraph развивается сообществом]
 - [Virtuoso лучше подходит для OLTP-сценариев, Blazegraph — для аналитических задач]
 - }
- ⇒ *рекомендации по выбору**:
 - {• [Virtuoso рекомендуется для промышленных хранилищ данных, требующих высокой отказоустойчивости и интеграции SQL/RDF]
 - [Virtuoso оптимален для гибридных систем, где необходимо сочетать реляционные и графовые запросы]
 - [Virtuoso предпочтителен для OLTP-систем с интенсивной транзакционной нагрузкой]
 - [Blazegraph целесообразен для аналитических задач на крупных графах знаний]
 - [Blazegraph рекомендуется для исследовательских проектов, требующих GPU-ускорения]
 - [Blazegraph оптимален для открытых решений с требованиями горизонтального масштабирования]
 - }

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведённого исследования был осуществлён сравнительный анализ современных технологий работы с семантическими данными: языков запросов к графам знаний и инструментов для хранения и обработки RDF-данных.

В первом разделе работы были подробно рассмотрены языки SPARQL и OWL. Проведён детальный анализ их функциональных возможностей: SPARQL как языка запросов к графам данных и OWL как языка описания онтологий. Выявлены ключевые особенности их взаимодействия и комплементарности в семантических системах. Результаты анализа были формализованы с помощью SCn-кода.

Во втором разделе исследованы промышленные решения для работы с семантическими данными - Virtuoso Universal Server и Blazegraph. Проведён сравнительный анализ их архитектурных особенностей, поддерживаемых стандартов (SPARQL 1.1, RDF 1.1), возможностей масштабирования и интеграции с Big Data-стеком. Информация о каждом инструменте также была формализована на SCn-коде.

Результаты данного исследования могут быть успешно применены при проектировании современных систем обработки семантических данных, где требуется эффективное сочетание возможностей SPARQL-запросов к графам знаний и OWL-онтологий для формального описания предметных областей. Полученные выводы позволяют обоснованно выбирать между промышленными решениями Virtuoso и Blazegraph в зависимости от конкретных требований к масштабируемости, производительности и функциональным возможностям. Особую практическую ценность представляет анализ архитектурных особенностей этих систем, их интеграции с Big Data-стеком и поддержки современных стандартов W3C.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- [1] Group, W3C SPARQL Working. Sparql 1.1 overview: W3c recommendation / W3C SPARQL Working Group: W3C, 2013. — Дата обращения: 25.05.2025. <https://www.w3.org/TR/sparql11-overview/>.
- [2] Harris, Steve. Sparql 1.1 query language: W3c recommendation / Steve Harris, Andy Seaborne: W3C, 2013. — Дата обращения: 25.05.2025. <https://www.w3.org/TR/sparql11-query/>.
- [3] Group, W3C SPARQL Working. Sparql 1.1 protocol: W3c recommendation / W3C SPARQL Working Group: W3C, 2013. — Дата обращения: 25.05.2025. <https://www.w3.org/TR/sparql11-protocol/>.
- [4] Group, W3C SPARQL Working. Sparql 1.1 entailment regimes: W3c recommendation / W3C SPARQL Working Group: W3C, 2013. — Дата обращения: 25.05.2025. <https://www.w3.org/TR/sparql11-entailment/>.
- [5] Pérez, Jorge. Semantics and complexity of sparql / Jorge Pérez, Marcelo Arenas, Claudio Gutiérrez // ACM Transactions on Database Systems. — 2009. — Vol. 34, № 3. — P. 1–45.
- [6] Губанов, Д.А. Семантические технологии и Linked Data / Д.А. Губанов. — М.: ДМК Пресс, 2022.
- [7] Group, W3C OWL Working. Owl 2 web ontology language document overview: W3c recommendation / W3C OWL Working Group: W3C, 2012. — Дата обращения: 25.05.2025. <https://www.w3.org/TR/owl2-overview/>.
- [8] Group, W3C OWL Working. Owl 2 web ontology language structural specification: W3c recommendation / W3C OWL Working Group: W3C, 2012. — Дата обращения: 25.05.2025. <https://www.w3.org/TR/owl2-syntax/>.
- [9] Owl 2 primer: W3c working group note / Pascal Hitzler [et al.]: W3C, 2009. — Дата обращения: 25.05.2025. <https://www.w3.org/TR/owl2-primer/>.
- [10] Антуфьев, В.А. Семантические технологии и онтологический инжиниринг / В.А. Антуфьев. — М.: НОЦ "Контроллинг 2020.
- [11] Horrocks, Ian. From shiq and rdf to owl: The making of a web ontology language / Ian Horrocks, Peter F. Patel-Schneider, Frank van Harmelen // Web Semantics: Science, Services and Agents on the World Wide Web. — 2003. — Vol. 1, № 1. — P. 7–26.

[12] Erling, Orri. Virtuoso: Rdf support in a native rdbms / Orri Erling, Ivan Mikhailov // Semantic Web Information Management. — Springer, 2010. — P. 385–406.

[13] Software, OpenLink. — Virtuoso Universal Server Documentation, 2024. — Дата обращения: 25.05.2025. <https://docs.openlinksw.com/virtuoso/>.

[14] Software, OpenLink. Virtuoso rdf store architecture: Tech. rep. / OpenLink Software: OpenLink Software, 2023. <https://virtuoso.openlinksw.com/whitepapers/>.

[15] Erling, Orri. The virtuoso universal server: Sql/rdf/xml integration / Orri Erling, Alex Averbuch // IEEE Data Engineering Bulletin. — 2006. — Vol. 29, № 4. — P. 7–13.

[16] Team, Blazegraph. — Blazegraph Database Documentation. — Blazegraph, 2023. — Дата обращения: 25.05.2025. <https://github.com/blazegraph/database/wiki>.

[17] Thompson, Bryan. BlazegraphTM technical overview: Tech. rep. / Bryan Thompson: SYSTAR, LLC, 2014. — Дата обращения: 25.05.2025. https://www.researchgate.net/publication/265073683_Blazegraph_Technical_Overview.

[18] Thompson, Bryan. Blazegraph gpu: High performance graph analytics / Bryan Thompson, Mike Personick // Proceedings of IEEE Big Data Conference. — IEEE, 2016. — P. 942–951.

[19] Thompson, Bryan. Scaling blazegraph for government-scale knowledge graphs / Bryan Thompson, Mike Personick // ISWC Conference Proceedings. — 2017. — P. 112–127.