

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И
ОПТИКИ

На правах рукописи

Раздьяконов Даниил Сергеевич

**МЕТОД ВИЗУАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ
ОНТОЛОГИЧЕСКИМИ ДАННЫМИ В ТРЕХМЕРНОМ
ВИРТУАЛЬНОМ ПРОСТРАНСТВЕ**

РЕЗЮМЕ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата компьютерных наук

Научный руководитель:
кандидат технических наук, доцент
Муромцев Дмитрий Ильич

Санкт-Петербург — 2024

Резюме

Актуальность темы исследования. В настоящее время все больше программных систем включают в себя компоненты, предназначенные для работы со слабоструктурированными данными. Для хранения и обработки данных подобные системы используют графовые форматы и алгоритмы, а в качестве схем или моделей данных используются онтологии. Организация человеко-машинного взаимодействия в подобных системах посредством стандартных форм и таблиц не является достаточно эффективной, так как слабо структурированная информация не предполагает фиксированного пользовательского интерфейса для отображения, поэтому в подобных системах широко применяются различные форматы визуализации, в том числе интерактивные.

Согласно работе «О визуализации информации» [0], зрительная система человека способна эффективно воспринимать данные, представленные в графическом виде, то есть визуализация помогает идентифицировать образы, строить гипотезы и извлекать закономерности из данных, что позволяет сделать более эффективным, так называемый, процесс исследования данных, или, другими словами, итеративное построение запросов к системам и анализ получаемых результатов. Важно отметить, что задача исследования данных сильно зависит от типа данных и разработка интерфейсов для её решения не может быть выполнена с помощью единого шаблона.

Системы, построенные на онтологиях, применяются во многих сферах, таких как биоинженерия, энергетическая промышленность, приборостроение, биология, системы учета коммунальных услуг, культурное наследие и др. В настоящее время существует несколько подходов к визуализации онтологий. Это могут быть UML или node-link-диаграммы, либо более специализированные системы, позволяющие формировать онтологический граф, например инструменты WebVOWL [0] или Ontodia [0]. Многие промышленные задачи визуализации данных решаются с применением систем виртуальной реальности. В большинстве своём в качестве данных для подобных визуализаций выступают объекты реального мира, прямое взаимодействие с которыми по тем или иным причинам нецелесообразно или невозможно. Примерами могут служить учебные тренажеры для работы в сложных условиях, характеризующихся зна-

чительными затратами времени и ресурсов. Воспроизведение подобных условий посредством очков виртуальной реальности в рамках учебной программы является значительно менее ресурсоёмким, но при этом достаточным для получения необходимых навыков. Другим примером может быть визуализация данных, получаемых в реальном времени от дрона или системы дистанционного пространственного сканирования, находящихся на значительном расстоянии от оператора. Ещё одним примером является взаимодействие с микромиром посредством визуализации частиц и молекул, что невозможно в физической реальности.

Существующие системы виртуальной реальности используют заранее подготовленные фиксированные модели и не предлагают возможностей для работы со слабоструктурированными данными, такими как онтологические базы знаний. Этот факт является существенным ограничением систем виртуальной реальности, так как не позволяет динамически подключать новые источники данных к визуализируемым моделям.

Различные инструменты работы с данными в виртуальном пространстве рассмотрены в статьях «Immersive and Collaborative Data Visualization Using Virtual Reality Platforms» [0] и «Virtual Reality: Beyond Visualization» [0]. В первой статье рассматриваются возможности совместной работы над данными в виртуальной реальности, а также способы выражение свойств данных, а во второй способы применения виртуальной реальности в научной среде. Однако перечисленные в статьях инструменты не затрагивают тему визуализации онтологий.

Примерами визуализации, где частично используются онтологические данные, например, могут служить приложения, разработанные Британским Музеем, который проводит виртуальные туры, или приложения Американской Ассоциации Музеев, предоставившей возможность посещения музеев в условиях пандемии с использованием технологий виртуальной реальности. На первый взгляд данные примеры никак не связаны с визуализацией онтологических данных, но, учитывая тот факт, что данные музеев хранятся в онтологическом виде, данные виды визуализации можно назвать кастомизированным способом визуализации онтологических данных. Таким образом задача визуализации онтологических данных в виртуальном пространстве является актуальной наравне с другими видами визуальных представлений, но на данный момент не суще-

ствуется готовых решений, позволяющих работать с онтологическими данными в виртуальной реальности. При этом подобные визуализации не могут быть получены простым преобразованием двухмерных диаграмм в трехмерные в силу развитой и богатой семантики элементов визуализации, что требует специальных методов и средств для формирования наглядных представлений.

Проблемами в данной области являются: сложность формирования запросов к онтологическим базам знаний посредством управления трехмерной визуализацией, порождающей избыточное количество параметров поиска, обработка анонимных узлов онтологий, а также отсутствие объективных механизмов оценки построенных визуализаций. Данная работа посвящена исследованию перечисленных проблем.

Степень разработанности проблемы. Теме визуализации и визуализации онтологий посвящено множество работ ученых со всего мира. Визуализации, например, посвящены работы таких российских ученых как М.М. Матюшин, Т.Г. Вакурина, В.В. Котеля, П.А. Ломов, М.Г. Шишаев, Н.С. Вагарина, Д.С. Маринин, З.В. Апанович, П.С. Винокуров, Т.А. Кислицина, Е.Е. Котова, И.А. Писарев. В то же время на тему визуализации онтологий пишется множество зарубежных статей. Среди авторов этих статей присутствуют такие ученые как А. Katifori, С. Halatsis, G. Lepouras, С. Vassilakis, J. Sevilla, P. Casanova-Salas, S. Casas-Yrurzum, Т.В.А. Vasyliuk, N.O.P. Vago, M. Sacaj, M. Sadeghi, S. Kalwar, M.G. Rossi, L. Asprino, С. Colonna, M. Mongiovì, M. Porena. Тема метрик визуализации была затронута в работах следующих российских авторов: М.В. Коломеец, А.А. Проноза, А.А. Чечулин, но более распространена в работах зарубежных авторов. Зарубежные авторы, затрагивающие тему метрик визуализаций – это такие ученые как С. Lewerentz, F. Simon, G. Melançon, A. Sallaberry, E. Bertini, A. Tatu, D. Keim, R. Brath, E. Bertini, G. Santucci.

Целью диссертационной работы является ускорение интерактивного поиска по онтологическим базам знаний. Для достижения поставленной цели были решены следующие **задачи**:

1. Аналитический обзор методов репрезентации онтологических данных в трехмерном пространстве.
2. Разработка модели интерактивной визуализации и метрики трудоемкости поиска для оценки и обоснования релевантности разрабатываемого метода.

3. Исследование возможностей применения языковых моделей для векторизации запросов к базам знаний и ранжирования элементов визуализации.
4. Исследование проблемы неполного покрытия пространства данных в областях, содержащих анонимные узлы.
5. Разработка плана эксперимента и программного прототипа, реализующего предложенные в диссертации методы и сборка экспериментального стенда.
6. Проведение испытаний, подтверждающих актуальность и эффективность разработанного метода.
7. Обработка и обобщение результатов экспериментальных исследований.

Объектом исследования являются человеко-машинное взаимодействие, интерактивный поиск в онтологических базах знаний и способы визуализации онтологических данных.

Предметом исследования выступают модели визуализаций, методы построения и оценки интерактивных визуализаций онтологических данных, а также алгоритмы обработки анонимных узлов онтологий.

Методы исследования, использованные в работе: методы статистической обработки экспериментальных данных, прототипное проектирование, теория графов, метод глубокого обучения, мозговой штурм, векторизация данных, теория множеств, онтологический инжиниринг, тестирование и работа с группами испытуемых.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Метод визуального управления онтологическими данными на основе агентной модели процесса интерактивной визуализации, позволяющий снизить трудоемкость выполнения пользовательских сценариев за счет сведения пошагового построения визуализаций к задаче поиска в пространстве состояний.
2. Метрики трудоемкости поиска для оценки качества интерактивных визуализаций, обеспечивающие независимую от типа используемого инструмента оптимизацию процесса их построения.
3. Алгоритм ранжирования элементов интерактивной визуализации, использующий векторизацию запроса и механизм внимания, для автома-

тизированного расчета контекста визуализаций на основе семантической близости его элементов.

4. Алгоритм генерации контекстно зависимых идентификаторов для анонимных узлов онтологического графа, позволяющий расширить пространство данных, доступное для визуализации.

В данной работе мы объединяем понятия визуализация и управление визуализацией в термин «Интерактивная визуализация», предполагающая в ответ на действия пользователя изменение масштаба, угла обзора на данные, изменение фильтров и подсветка наиболее значимых для пользователя фрагментов и пр. Для интерактивных визуализаций лишь отчасти применимы метрики, создаваемые для статических визуализаций. При этом качество интерактивной визуализации, как и качество визуализации, – это субъективное понятие. Для того чтобы дать объективную оценку качества трехмерных интерактивных репрезентаций онтологических данных, была разработана модель на основе выявленных сценариев использования, а также разработан механизм интеллектуального выделения, позволяющий улучшить отдельные аспекты интерактивных визуализаций.

Научная новизна результатов исследований обуславливается следующим:

1. Предложен метод разработки средств интерактивной визуализации онтологических данных, основанный на модели, которая описывает целевую функцию процесса интерактивной визуализации в терминах скорости, трудоемкости и расстояния, что позволяет снизить трудоемкость построения интерактивных визуализаций онтологических данных.
2. Разработаны метрики трудоемкости интерактивной визуализации многомерного пространства данных, отличающиеся инвариантностью к управляющему воздействию пользователя на визуализацию онтологического графа.
3. Предложено новое применение языковой модели на архитектуре Трансформер для векторизации запросов, автоматически формируемых для заданных узлов онтологического графа, что позволяет сократить трудоемкость поиска в пространстве данных путём последовательного уточнения семантического контекста.

4. Предложен алгоритм формирования контекстно зависимых идентификаторов, на основе метода канонизации графа, отличающийся возможностью «ленивой» визуализации областей онтологий, содержащих анонимные узлы.

Личный вклад автора. Содержание диссертации и основные положения, выносимые на защиту, отражают персональный вклад автора в опубликованные работы. Автор лично разработал алгоритм ленивой визуализации анонимных узлов онтологических графов с применением контекстно зависимых идентификаторов. Алгоритм был внедрён в инструмент Ontodia при поддержке соавтора работы Морозова А.В, который реализовал в коде части алгоритма на языке typescript. Под руководством Герхард Вольгенант автор принимал непосредственное участие в исследовании и внедрении векторных представлений узлов графа в инструмент визуализации Ontodia. В ходе работы над диссертацией автором был разработан и исследован алгоритм ранжирования узлов визуализируемого онтологического графа, использующий векторизацию запроса и исходного графа, а также механизм внимания, для онтологических графовых данных. Автор самостоятельно написал основные содержательные части статей, которые легли в основу данного диссертационного исследования, а также лично представил на конференциях научные доклады по теме диссертации. Автором было разработано и интегрировано программное обеспечение, написанное в ходе исследования, а именно – программный модуль L3Graph и программный продукт Ontodia3d. Коммерческая интеграция частей диссертационной работы в программные продукты Ontodia и Metaphactory производилась при поддержке одного из соавторов Павлова Д.С, а Муромцевым Д.И. было предложено общее направление исследований.

Внедрение результатов. Результаты данного диссертационного исследования были внедрены в исследовательских проектах компании «Metaphacts GmbH» и её петербургского филиала ООО «Metaphacts East Europe», в том числе разработано экспериментальное расширение платформы «Metphactory» [0] для визуализации онтологических данных в виртуальном пространстве.

Достоверность и обоснованность результатов, полученных в рамках диссертационной работы, подтверждается сформированным на начальной стадии работ аппаратом оценки результатов исследования, – метриками трудоёмкости поиска. В том числе достоверность подтверждается теоретическими

выкладками, доказывающими состоятельность научных результатов, а также непротиворечивостью экспериментальных данных, полученных на разработанном автором испытательном стенде. Обоснованность результатов исследований подтверждается апробацией результатов исследований на российских и международных конференциях, а также их согласованностью с ранее полученными результатами исследования других авторов в данной предметной области.

Апробация работы. Результаты работы были апробированы на международных и российских конференциях. Список конференций, на которых были представлены результаты следующий:

1. ESWC 2019 – Extended Semantic Web Conference (2019).
2. KESW 2017 – Knowledge Engineering and Semantic Web (2017).
3. ESWC 2016 – Extended Semantic Web Conference (2016).
4. ISWC 2015 – International Semantic Web Conference (2015).
5. X КМУ ИТМО – Конгресс молодых ученых.

Теоретическая значимость полученных результатов состоит в обосновании целесообразности учета управляющего воздействия пользователя на визуализацию, а также его фокуса внимания при построении модели интерактивной визуализации онтологических данных. Кроме того, показаны способы сокращения трудоемкости поиска в пространстве онтологических данных за счет ранжирования векторизованных узлов и языковой модели на архитектуре «трансформер».

Практическая значимость результатов диссертационной работы заключается в создании разработке экспериментального стенда для визуализации онтологически данных в виртуальном пространстве и расчета метрик трудоемкости интерактивного поиска по графу, а также в реализации программной библиотеки для методов визуализации, использующих алгоритм выдачи контекстно зависимых идентификаторов и механизм внимания для упорядочивания узлов. Предложен набор рекомендаций для улучшения интерактивной визуализации в соответствии с метриками трудоемкости поиска на разных шагах. Кроме того, автором обучена нейросеть для упорядочивания узлов, используемая в алгоритме выдачи контекстно зависимых идентификаторов.

Ценность научных работ определяется тем, что впервые было предложена программная архитектура и построена система интерактивной визуализации онтологических данных в трехмерном пространстве. Предложенные

решения открывают новые возможности практического применения баз знаний в системах виртуальной реальности, как для образовательных или исследовательских задач, так и в производственных процессах, где подобные технологии находят все большее применение. Также рассматриваются новые алгоритмы, позволяющие ускорить интерактивный поиск по онтологическим базам знаний за счет контекстно зависимой обработки анонимных узлов и ранжирования элементов онтологического графа на основе векторизации запросов и механизма внимания. Предложены инвариантные по отношению к управляющему воздействию пользователя метрики трудоемкости интерактивной визуализации многомерного пространства данных. Предложенные модели и алгоритмы, представленные в научных работах, имеют высокую практическую и научную ценность, что подтверждается многочисленными выступлениями на конференциях.

Публикации. По теме диссертационной работы автором опубликовано 7 статей, из них 1 работа издана в журнале, рекомендованном перечнем ВАК, 6 в изданиях, входящих в списки Web of Science/Scopus. В опубликованных работах отражены основные положения диссертации. Рассматривается алгоритм формирования контекстно зависимых идентификаторов для пустых узлов онтологического графа, векторизация узлов, а также результаты экспериментальной проверки полученных научных результатов.

Научные издания, входящие в международные реферативные базы данных и системы цитирования:

1. Razd'Yakonov D., Morozov A., Pavlov D., Muromtsev D. Approach to Blank Node Processing in Incremental Data Visualization by the Example of Ontodia // Programming and Computer Software - 2020, Vol. 46, No. 6, pp. 384-396
2. Razdyakonov D., Wohlgenannt G., Emelyanov Y., Pavlov D., Mouromtsev D. A New Tool for Linked Data Visualization and Exploration in 3D/VR Space // Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics) - 2019, Vol. 11762, pp. 167-171
3. Razdyakonov D. S., Muromcev D. I. Application of an Agent-Based Model to Develop Ontological Data Visual Management Tool (2023). Scientific Visualization 15.5: 73 - 88, DOI: 10.26583/sv.15.5.07

4. Wohlgenannt G., Klimov N., Mouromtsev D.I., Razdyakonov D., Pavlov D., Emelyanov Y. Using word embeddings for visual data exploration with ontodia and wikidata // CEUR Workshop Proceedings - 2017, Vol. 1932
5. Wohlgenannt G., Klimov N., Mouromtsev D., Razdyakonov D., Pavlov D., Emelyanov Y. Using word embeddings for search in linked data with Ontodia // CEUR Workshop Proceedings - 2017, Vol. 1963, pp. 16-24
6. Mouromtsev D., Pavlov D., Emelyanov Y., Morozov A., Razdyakonov D., Parkhimovich O. Workflow supporting toolset for diagram-based collaborative ontology development implemented in the open budget domain // Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics) - 2016, Vol. 9989, pp. 178-182
7. Mouromtsev D., Pavlov D., Emelyanov Y., Morozov A., Razdyakonov D., Galkin M. The simple, web-based tool for visualization and sharing of semantic data and ontologies // CEUR Workshop Proceedings - 2015, Vol. 1486, pp. 77

Научные издания, входящие в перечень российских рецензируемых журналов:

7. Раздьяконов Д.С., Морозов А.В., Павлов Д.С., Муромцев Д.И. Подход к обработке пустых узлов при порционной визуализации данных на примере инструмента ONTODIA // Программирование - 2020. - № 6. - С. 16-29
8. Раздьяконов Д. С., Муромцев Д. И. Применение агентной модели интерактивной визуализации для создания средств визуального управления онтологическими данными (2023). Научная визуализация 15.5: 73 - 88, DOI: 10.26583/sv.15.5.07

Введение посвящено описанию основных составляющих диссертационной работы. Здесь определяется актуальность работы, цель и задачи, которые необходимо выполнить для её достижения. Приводятся положения, выносимые на защиту, и описывается научная новизна предложенных методов и алгоритмов. В первой главе произведен тщательный обзор предметной области, даны определения и описания основных терминов, методов и алгоритмов. В диссертационной работе затрагиваются области знаний, связанные с визуализацией онтологических графов и метриками оценки построенных визуализаций. На

стадии построения представлений используются языковые модели для улучшения восприятия и оптимизации значений метрик. В работе решается проблема визуализации анонимных узлов, поэтому данная область знаний также подлежит разбору в первой главе. Учитывая вышеперечисленные области исследования, глава имеет соответствующую структуру. В начале главы идёт обзор актуальных метрик визуализации, включающий обзор метрик представленные в статьях «Empirical evaluation of aesthetics based graph layout» [0], «Shape-Based Quality Metrics for Large Graph Visualization» [0], «Quality metrics for information visualization» [0] и «Quality metrics in high-dimensional data visualization: An overview and systematization» [0]. В последнем разделе приводятся примеры метрик для визуализации онтологий, которые описаны в статье «Developing 12 Non-Empirical Metrics and Tools for Ontology Visualizations Evaluation and Comparing» [0]. Следующий раздел первой главы посвящён средствам визуализации графов. При выполнении обзора средств визуализации было выявлено, что количество средств визуализации онтологических данных в трехмерном пространстве крайне мало. В тоже время средства визуализации трехмерных графов могут быть адаптированы для визуализации онтологических графов, поэтому было принято решение включить средства визуализации трехмерных графов в данный обзор. Обзор средств визуализации велся по следующим критериям: используемый алгоритм компоновки, объем визуализируемых данных, средства навигации, средства управления данными. Были рассмотрены следующие средства визуализации: «Plotly: Сетевая диаграмма 3D», «Cy3d», «Force Atlas 3D», «Mayavi-2010», «Walrus», «Сетевые инструменты 3D-визуализации для Mac OS X», «KiNG Display Software», «3d-force-graph (от Васко Астуриано)», «Graph-Visualization (от Дэвида Пиерга)», «Graphosaurus (от Кори Фарвел)», «Ngraph.pixel (от Андрея Кашка)», «DiVE (от NLeSC)», «OntoSphere3d». В конце раздела приведена сводная таблица инструментов визуализации. Следующий раздел главы посвящён проблеме обработки пустых узлов (анонимных узлов). Материал подробно рассматривался в статьях «Подход к обработке пустых узлов при порционной визуализации данных на примере инструмента Ontodia» и «Approach to Blank Node Processing in Incremental Data Visualization by the Example of Ontodia», написанных в рамках работы над диссертацией. Завершает раздел определение механизма внимания и его применение в современных языковых моделях. Также даётся краткий обзор различных языковых

моделей, построенных на базе архитектуры «Трансформер». Представлен обзор следующих языковых моделей: PT-2, GPT-3, RuGPT-3, GPT-GNN, Microsoft T-NLG, Google mT5-XXL, Nvidia MegatronLM.

Вторая глава диссертационной работы посвящена описанию модели интерактивной визуализации онтологических данных и описанию ориентированных на задачу метрик трудоемкости поиска, основанных на разработанной модели. В первой части главы даётся определение таксономии визуализации. Основной таксономии является онтологический граф G , где G – это набор триплетов формата $\langle s, p, o \rangle$. Граф G определяет многомерное пространство данных, где каждое измерение соответствует предикату из онтологии. Любое представление данных, согласно нашей модели, представляет собой кортеж из двух элементов: **функция визуализации данных и функция управления.**

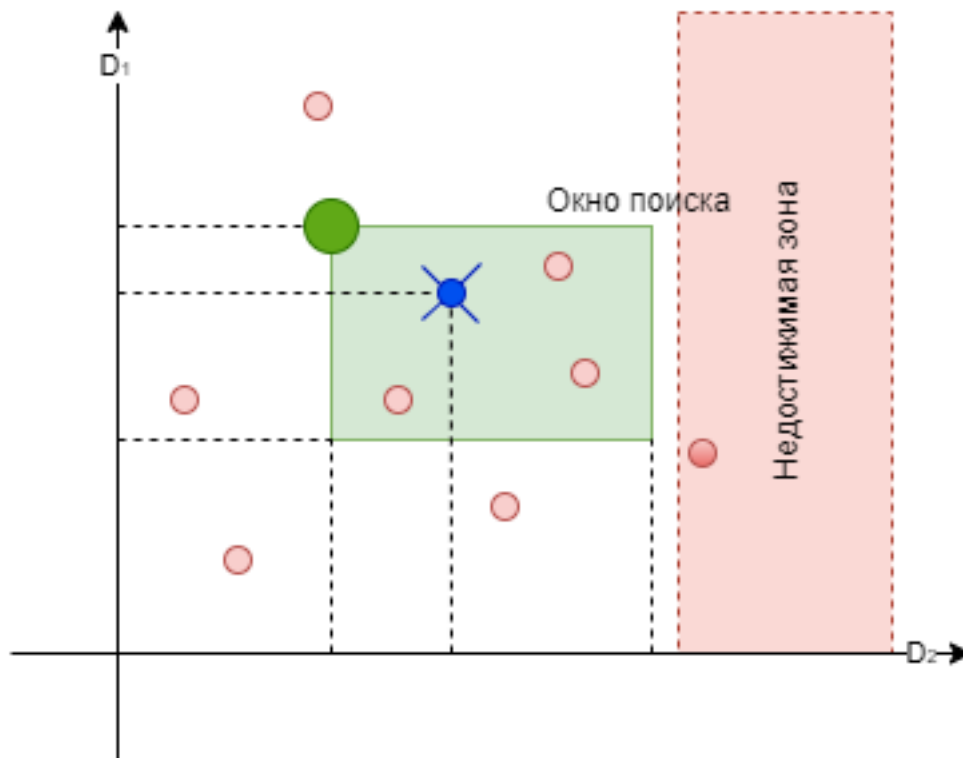


Рисунок 1 — Пространство данных в двух измерениях

Конечная картинка, которую мы видим на экране – это обычно не всё пространство данных D , а проекция части пространства данных на плоский экран монитора V_D . Область пространства данных, которая отображается на экране – называется окном поиска SF , которое имеет позицию и ширину для каждого измерения пространства данных D_i . На рисунке 1 представлено пространство из двух измерений с окном поиска в нём, а на рисунке 2 – трехмерное

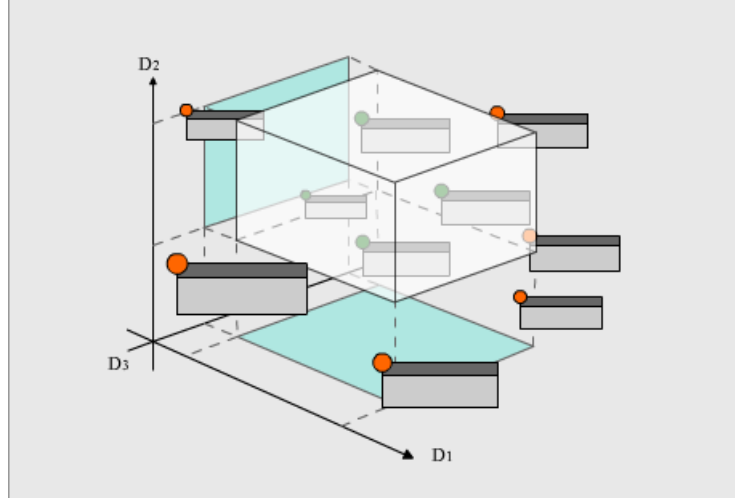


Рисунок 2 — Пространство данных в трёх измерениях

пространство с окном поиска в нём. Функция визуализации $V_D(SF)$ отвечает за вычисление данной проекции, и результатом работы функции визуализации является статическая (классическая) визуализация V_D . Функция управления $T_D(SF, Input)$ реализуется за счёт инструментов управления и помогает осуществлять перенос окна поиска в пространстве, тем самым изменяя визуализацию. Наличие функции управления в данной модели и делает визуализацию интерактивной. Функция управления и функция визуализации состоят из подфункций управления и визуализации для каждого измерения пространства D : $T_{D_1}(\langle p, w \rangle_{D_1}, Input)$ и $V_{D_1}(\langle p, w \rangle_{D_1})$.

$$D_i = \{o \in \langle s, p, o \rangle \in G \mid i = p\}$$

$$P_D = \langle V_D(SF), T_D(SF, Input) \rangle$$

$$V_D(SF) \rightarrow V_D$$

$$SF = \langle \langle p, w \rangle_{D_1}, \langle p, w \rangle_{D_2}, \dots, \langle p, w \rangle_{D_i} \rangle$$

$$SP \in SF$$

$$V_D(SF) = \langle V_{D_1}(\langle p, w \rangle_{D_1}), V_{D_2}(\langle p, w \rangle_{D_2}), \dots, V_{D_i}(\dots) \rangle$$

$$T_D(SF, Input) \rightarrow SF$$

$$T_D(SF, Input) = \langle T_{D_1}(\langle p, w \rangle_{D_1}, Input), T_{D_2}(\langle p, w \rangle_{D_2}, Input), \dots T_{D_i}(\langle p, w \rangle_{D_i}, Input) \rangle$$

Далее во второй главе идёт описание задача-ориентированных метрик качества интерактивных визуализаций. В статье «Quality metrics for information visualization» авторы предлагают оценивать качества репрезентации по трём входным параметрам: Данные, Пользователь, Задача. Тем самым в статье озвучивается тот факт, что визуализация данных не может быть качественной, если она не позволяет решить изначально поставленную перед ней задачу. Используя данную идею как основу, выделяются основные сценарий использования визуализаций онтологических данных. Большинство сценариев сводится к поиску одного, двух или множества элементов представления, поэтому операция поиска берется за основу. В операции поиска выделяются четыре типа шагов, которые могут быть скомпонованы в различном порядке: «Ввод», «Визуализация», «Осмотр» и «Восприятие». Простейшая схема поиска с описанием того, как применяются результаты диссертационной работы, представлена на рисунке 3.

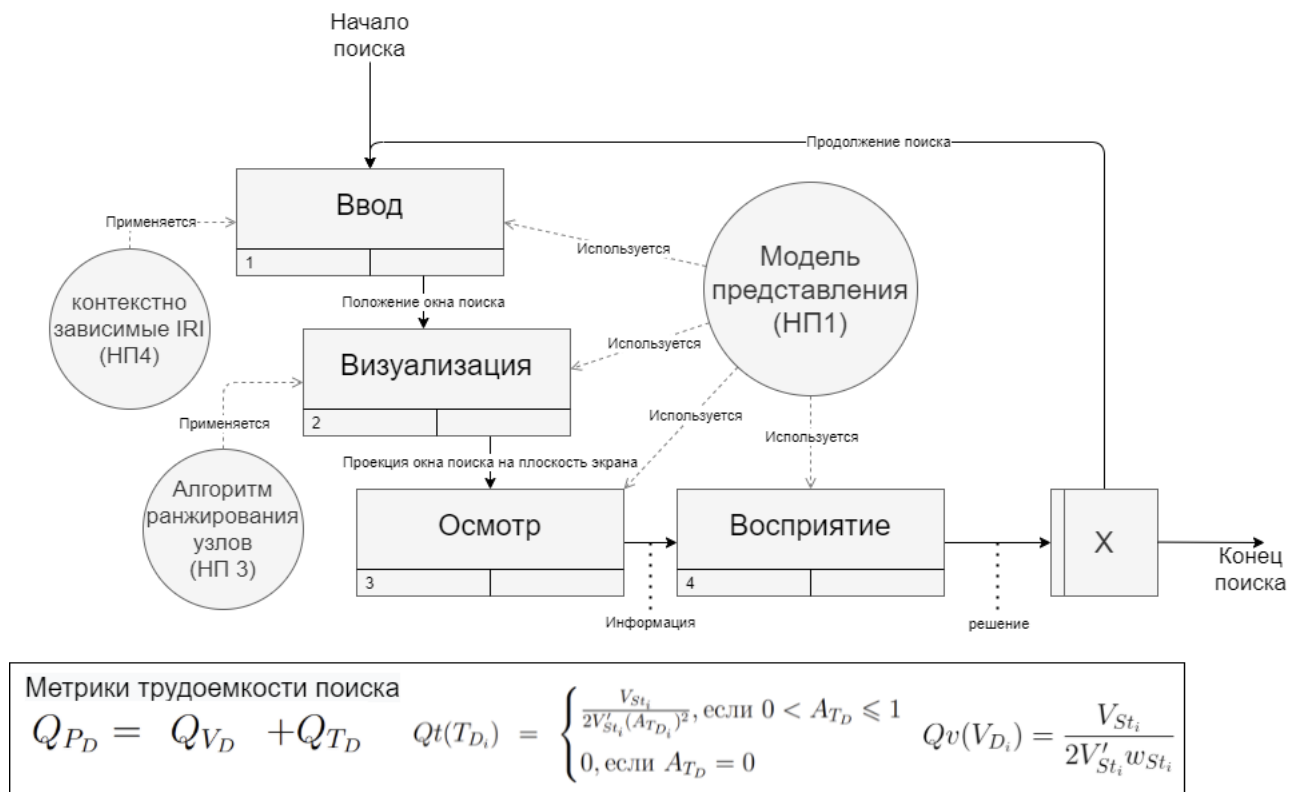


Рисунок 3 — Метод визуализации онтологических данных и процедура поиска

На шаге «Ввод» пользователь производит ввод данных, тем самым перемещая окно поиска. Оценка данного шага рассчитывается исходя из дистанции, на которую сместился пользователь в пространстве, и того, сколько простейших операций он выполнил для этого. На шаге «Визуализация» производится расчёт визуализации. Визуализацию можно оценивать по таким метрикам, как метрики эстетичности и метрики форм. «Осмотр» – это перемещение пользователя в пространстве данных в рамках окна поиска. Положение пользователя в пространстве данных определяется точкой поиска (SP). SP может быть рассчитана из той точки на экране, в которую устремлен взгляд пользователя. Картинка на экране – это проекция окна поиска на экран пользователя. То есть, если выполнить обратную проекцию, мы получим положение пользователя в пространстве данных (SP). Точка на экране может быть установлена с помощью технологии EyeTracking. «Восприятие» – это шаг существует для окончания поиска или принятия решения о новом поиске. Процедура поиска лежит в основе задача-ориентированных метрик качества или метрик трудоемкости поиска. Согласно метрикам, качество интерактивной визуализации складывается из двух составляющих: качества визуализации (статической) и качества инструментов управления. На рисунке ?? представлена взаимосвязь научных результатов, модели интерактивной визуализации и метрик трудоемкости поиска, а также основные шаги процедуры поиска.

Качество элемента управления для интерактивной визуализации складывается из среднего значения качества каждого инструмента управления, где качество каждого отдельного элемента управления – это отношение скорости выполнения шага поиска, соответствующего этому элементу управления, к идеальной скорости, для всех возможных операций поиска, умноженное на квадрат охвата пространства. Где охват пространства – это отношение объёма доступного пространства поиска к объёму всего пространства, а идеальная скорость равна максимальному расстоянию между позициями в пространстве данных.

$$Qt(T_D) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Qt(T_{D_i}) |$$

$$Qt(T_D) \in \mathbb{R}, \quad 0 \leq Qt(T_D) \leq 0.5$$

$$Qt(T_{D_i}) = \begin{cases} \frac{V_{St_i}(A_{T_{D_i}})^2}{2V_{max}}, & \text{если } 0 < A_{T_D} \leq 1 \\ 0, & \text{если } A_{T_D} = 0 \end{cases},$$

$$St_i \in [Input], \quad 0 \leq Qt(T_{D_i}) \leq 0.5$$

V_{max} – Идеальная скорость. $V_{max} = [S_s] \mid Qt(T_{D_i}) \in \mathbb{R}, \quad 0 \leq Qt(T_{D_i}) \leq 0.5$.

$A_{T_{D_i}} \mid A_{T_{D_i}} \in \mathbb{R}, \quad 0 \leq A_{T_{D_i}} \leq 1$ – Отношение существующего пространства данных к доступному для инструмента, соответствующего измерению данных D .

Общий охват ($A_{T_D} \mid A_{T_D} \in \mathbb{R}, \quad 0 \leq A_{T_D} \leq 1$) равен отношению всего пространства данных к доступному.

Качество визуализации оценивается иным образом. Функции визуализации, как составляющей интерактивной визуализации, соответствуют шаги процесса поиска типа **Визуализация**, однако их качество оценивается по шагам типа **Осмотр**, следующих за шагом визуализации. **Качество визуализации для представления складывается из среднего значения качества каждого аспекта визуализации для всех возможных операций поиска, где качество каждой отдельной визуализации – это половина отношение скорости выполнения шага осмотр, следующего за шагом визуализации к идеальной скорости, умноженной на относительную ширину окна поиска. При этом идеальная скорость равна максимальному расстоянию между позициями в пространстве данных, а относительная ширина окна поиска – это значение ширины окна поиска для каждого шага поиска измеряемого от нуля до единицы относительно максимальной ширины окна поиска**

$$Qv(V_D) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Qv(V_{D_i}) \mid Qv(V_D) \in \mathbb{R},$$

$$0 \leq Qv(V_D) \leq 0.5$$

$$Qv(V_{D_i}) = \frac{V_{St_i}}{2V_{max}w_{St_i}} \mid$$

$$St_i \in [Overview, Perception] \mid Qv(V_{D_i}) \in \mathbb{R},$$

$$0 \leq w_{St_i} \leq 1$$

$$0 \leq Qv(V_{D_i}) \leq 0.5$$

V_{max} – Идеальная скорость $V_{max} = [S_s]$.

Третья глава начинается с описание сути диссертационной работы, то есть метода визуального управления онтологическими данными в трехмерном виртуальном пространстве. В работе метод – это технический способ разработки средств визуального управления онтологическими данными. Метод основывается на модели интерактивной визуализации и активно применяется на этапе разработки интерфейсов средств визуального управления онтологическими данными.

Затем следует описание прототипа, разработанного в ходе выполнения диссертационной работы, который позволяет протестировать сформированный в ходе работы метод визуального управления онтологическими данными. Прототип построен на базе существующего инструмента *Ontodia*, поэтому сначала приводится обоснование выбора данного инструмента в качестве базового. Затем следует описание базового инструмента *Ontodia*, – его технологического стека, архитектуры, путей циркуляции данных. Архитектура *Ontodia* представлена на рисунке 4. Как видно из рисунка 4 базовый инструмент *Ontodia* состоит из трёх основных частей (Модель, Представление и Контроллер), одна из которых (Контроллер) разбивается на две подчасти (*DiagramView* и *EditorController*).

Далее приводится архитектура разработанного на основе метода прототипа. Архитектура *Ontodia3d* представлена на рисунке 5. Как видно из рисунка 5 архитектура не сильно отличается от базовой архитектуры, но расширяет её. Часть объекта *Workspace*, которая отвечает за представления графа, дублируется. В прототипе существует две взаимозаменяемые реализации, что даёт возможность переключаться из двухмерного представления в трёхмерное. Также трёхмерное представление имеет более сложную внутреннюю архитектуру, подобную архитектуре базового инструмента. Перед тем как приступить к построению представления, модель базового инструмента транслируется во внутреннюю модель инструмента *L3 – Graph*.

Во второй части третьей главы описывается алгоритм формирования контекстно зависимых идентификаторов для анонимных узлов, позволяющий увеличить покрытие пространства данных метода интерактивной визуализации.

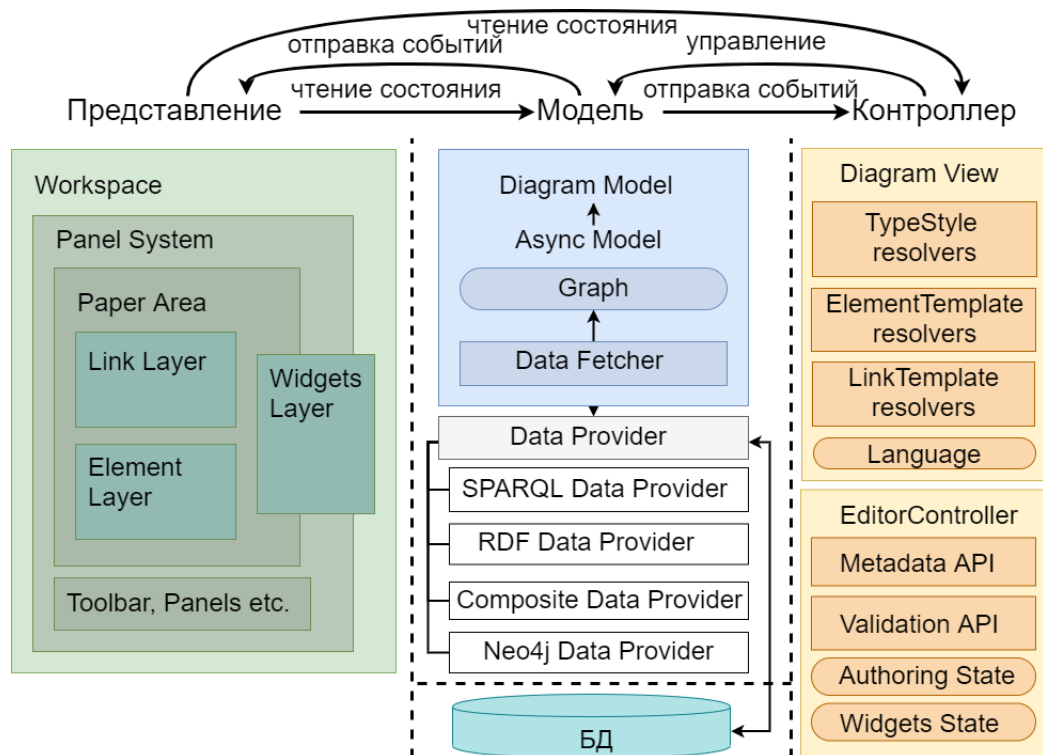


Рисунок 4 — Архитектура инструмента Ontodia

Основной материал по этому разделу был представлен в статьях «Подход к обработке пустых узлов при порционной визуализации данных на примере инструмента Ontodia» и «Approach to Blank Node Processing in Incremental Data Visualization by the Example of Ontodia». Контекст ПУ (Анонимного узла) – это подграф основного графа, который включает целевой анонимный узел, а также транзитивно все анонимные узлы, заключенные между обычными узлами, окружающими данный подграф и включающий их (см. рис. 6). То есть контекст для целевого анонимного узла – это граф, который содержит целевой анонимный узел и всех его соседей, и соседей его соседей, вплоть до первого обычного узла.

Решение, которое мы предлагаем для отображения анонимных узлов, состоит в том, чтобы ввести стадию предобработки запросов и выдать контекстно зависимые идентификаторы пустым узлам. Стадия предобработки включает в себя несколько шагов: сбор контекста, формирование контекстно зависимых идентификаторов, сохранение результатов предобработки для последующей выдачи. Идентификаторы должны быть составлены так, чтобы было возможно восстановить контекст напрямую из каждого сгенерированного идентификатора и однозначно сравнить узлы. Кратко алгоритм заключается в следующем: берется граф контекста, затем он канонизируется (с использованием

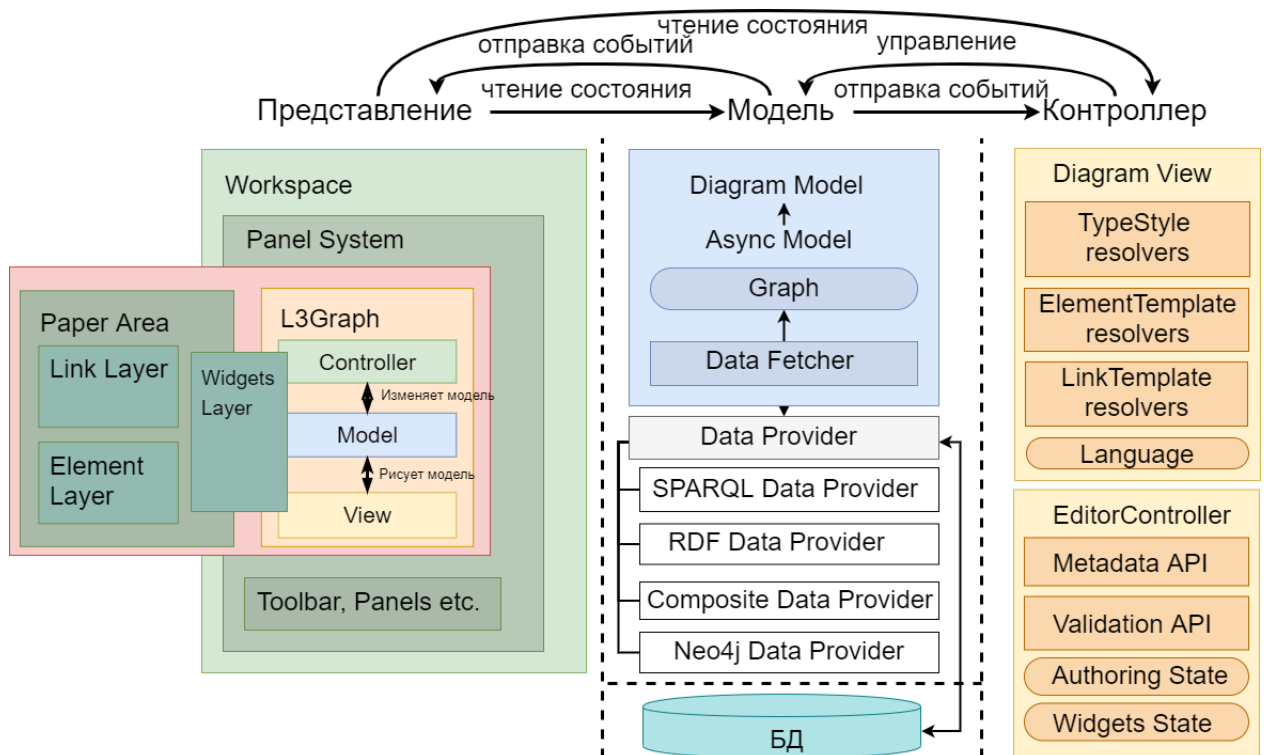


Рисунок 5 — Архитектура инструмента Ontodia3d

алгоритма, взятого из статьи «Canonical Forms for Isomorphic and Equivalent RDF Graphs: Algorithms for Learning and Labelling Blank Nodes»). Идентификаторы канонизированного графа кодируются с использованием js-функции `encodeURIComponent`, затем выделяется словарь терминов и сжимается с использованием префиксного дерева. Далее заменяются «опасные символы», и добавляются индексы элементов. Теперь, во-первых, есть возможность сравнивать узлы, во-вторых, лениво визуализировать их. То есть, дешифровывая идентификатор, выдавать следующие за ним узлы.

Далее описывается последняя составляющая метода, а именно алгоритм ранжирования узлов, использующий векторизацию запроса и исходного графа, а также механизм внимания для онтологических графовых данных. Алгоритм основан на использовании нейросети с архитектурой «Трансформер» для уменьшения трудоемкости шагов поиска типа «осмотр». Механизм внимания – разновидность механизма внимания, задачей которой является выявление закономерности между входными и выходными данными. Пользователь в ходе выполнения операции поиска выполняет запрос к системе, используя графический интерфейс. Разработанный прототип формирует JSON-объект, который с помощью набора шаблонов (шаблоны для подстановки приведены в таблице 1) мы переводим в естественный текст и затем отправляем его в языковую мо-

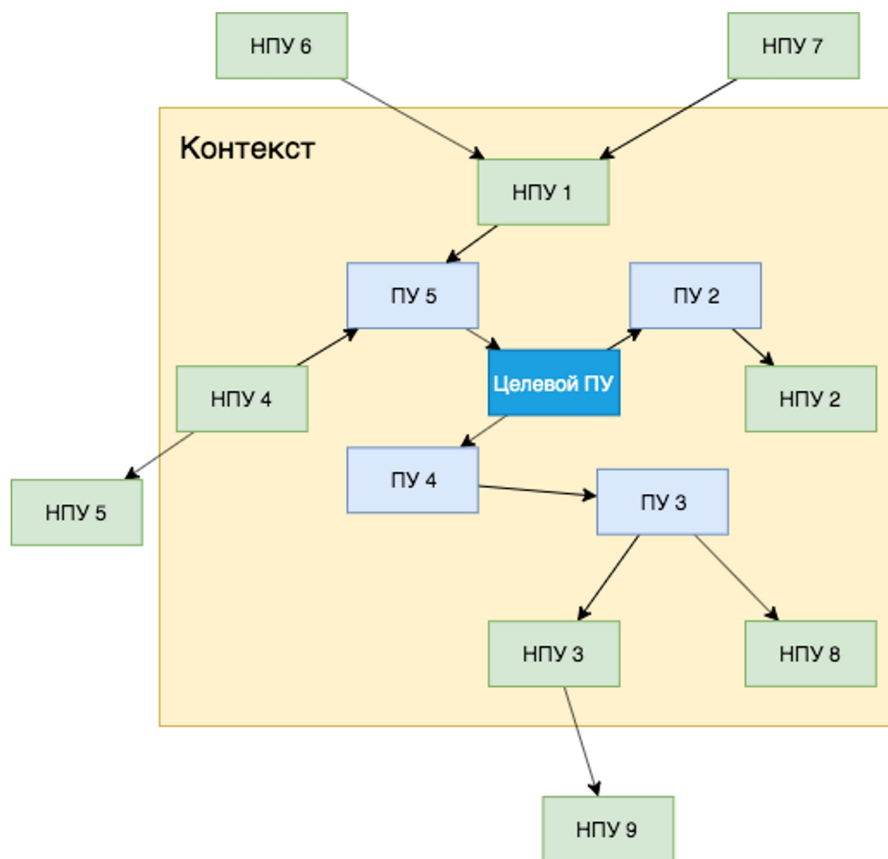


Рисунок 6 — Представление контекста ПУ

дель GPT-2, где он векторизуется и обрабатывается. GPT-2 достраивает текст наиболее естественным образом в соответствии со своей функциональностью. Достроенный текст мы разбиваем на термы и пытаемся выделить IRI, используя lookup механизм (Reconciliation API), реализованный в прототипе. После этого мы получаем набор весовых коэффициентов и ранжируем элементы в соответствии с ними.

Научную ценность здесь представляет метод обучения нейросети. GPT-2 сама по себе способна давать адекватные ответы на поставленные вопросы, однако с дополнительным обучением результаты получаются более точными. Как известно онтологические данные часто представляются в виде троек $\langle s, p, o \rangle$ \langle субъект, предикат, объект \rangle . Каждый из них обычно имеет именную метку или сам является литералом. При этом предикаты обычно представляются в виде глаголов, поэтому мы можем формировать предложения естественного языка практически формируя предложения из троек. Единственной проблемой является то, что не все предикаты представлены в глагольной форме. Для таких случаев мы вручную ввели именные метки (они представлены в таблице 2).

Параметр	Шаблон
	Example:The wine which is the instance of the Example:class Loire and which has property locatedIn and Example:located in Anjou Region is...
Start	The whine which is...
typeInput	Instance: ...instance of the class {type}... Class: ...is a subclass of {type}...
propertiesInput	...and which has property {property}[and]...
subjectTypeInput	Instance: ...is the instance of the class... Class: ...is the class of wines... and is a subclass of Предложения соединяются через союз «and».
searchKey	and {searchKey}...

Таблица 1 — Шаблоны для формирования естественного языка

Iri	Метка
<i>rdfs : label</i>	has label;
<i>rdf : type</i>	has type;
<i>rdfs : subclassOf</i>	is subclass of.
<i>owl : intersectionOf</i>	is intersection of
<i>owl : unionOf</i>	is union of
<i>owl : Restriction</i>	is restriction of

Таблица 2 — Дополнительные метки предикатов

Также нейросеть способна запоминать результаты процедур поиска и попытаться учесть их при следующем поиске. Последняя часть главы предоставляет набор рекомендаций для улучшений интерактивной визуализации в соответствии с метриками трудоемкости поиска на разных шагах. Рекомендации разделены на два типа: для шага «Ввод» и для шага «Визуализация». Данный раздел содержит описания подходов к визуализации элементов диаграммы, способы формирования информативных подписей к элементам и рекомендации по подбору алгоритмов компоновки.

В четвертой главе приведено подробное описание экспериментальной части исследования. Глава начинается с описания испытательного стенда, подготовленного на базе платформы «Metaphacts Platform». «Metaphacts Platform» – это платформа для создания WEB-приложений, управляющих графами знаний. Платформа нацелена на поддержку различных категорий пользователей графов знаний за счет реализации соответствующих служб, обеспечивающих управление графами знаний, и за счёт предоставления богатого и настраиваемого пользовательского интерфейса, который обеспечивает возможность быстрого создания приложений для конкретных сценариев использования. Платформа построена на открытых стандартах, что обеспечивает возможность её повторного использования в различных областях, а также упрощает интеграцию графов знаний с различными частями организационных инфраструктур данных и программного обеспечения. Сразу после описания платформы приводится обоснование её выбора и способы применения её функциональности. Затем описываются программные расширения для платформы, подготовленные в ходе выполнения диссертационной работы. Среди программных расширений присутствуют следующие компоненты: Компонент расчёта и визуализации метрик трудоемкости поиска и компонент Ontodia3D, реализующий описанный метод. Затем описывается пространство поиска, сформированное для эксперимента, которое состоит из таких измерений как Три размерности пространства, Тип элементов, Тип объекта (Экземпляр или Класс), Объектные свойства и Атрибуты. Следующий раздел главы посвящен набору данных, который используется для проведения эксперимента – это онтология вин (<http://www.w3.org/TR/owl-guide/wine.rdf>). Здесь кратко описывается структура онтологии вин и основные составляющие. Далее следует описание способа формирования выборок для тестирования. На основе описания онтологии был раз-

работан стандартный список вопросов для различных экземпляров онтологии. Вопросы для тестирования составлялись следующим образом:

1. Выбираем экземпляр вина X;
2. Выбираем два свойства из списка [производитель, сорта винограда, регион, цвет, сахар, консистенция];
3. Даём задание типа: Постройте диаграмму, отвечающую на вопрос: «Какое значение свойств 1 и 2 имеет вино с идентификатором X?».

Следующий раздел главы посвящён методике испытаний. Метрики являются задача-ориентированными и рассчитывают качество интерактивной визуализации на основе скорости выполнения процедуры поиска. Соответственно, для проверки метрик и работы на стенде был сформулирован список поисковых задач, которые решались пользователями на основе предоставленного набора данных. Задачи формулировались по принципу, описанному в статье «A diagrammatic approach for visual question answering over knowledge graphs» [0]. Испытуемым задаётся ряд вопросов, ответ на которые нужно дать, используя визуализацию. Всем участникам был проведён инструктаж по работе с разработанным прототипом, и дано краткое введение в область онтологий, семантических технологий и теории графов. В результате испытуемые показывали в среднем одинаковый результат при работе с прототипом, поэтому решено было отказаться от деления испытуемых по группам и проводить испытания на одной группе из двадцати одного человека. Следом за методикой испытаний идёт раздел, описывающий инструменты управления стенда, иными словами функцию управления прототипа.

Испытательный стенд представлен на рисунке 7. На рисунке 7 буквами отмечены инструменты управления, соответствующие определенным ранее измерениям пространства. **a** – инструмент управления в пространстве типов, который является частью панели фильтров в платформе Metaphacts и реализован на основе компонента фасетного поиска. **b** – инструмент управления в пространстве типов объектов (класс/экземпляр), также как и инструмент **a** является частью панели фильтров. **c** – инструмент управление в пространстве свойств и атрибутов, также как и инструменты **a** и **b** является частью панели фильтров. **d** – инструмент управления тремя измерениями пространства. Этот инструмент встроен в базовый прототип и позволяет изменять точку обзора на трехмерную диаграмму. Инструмент в первой реализации позволял перемещаться

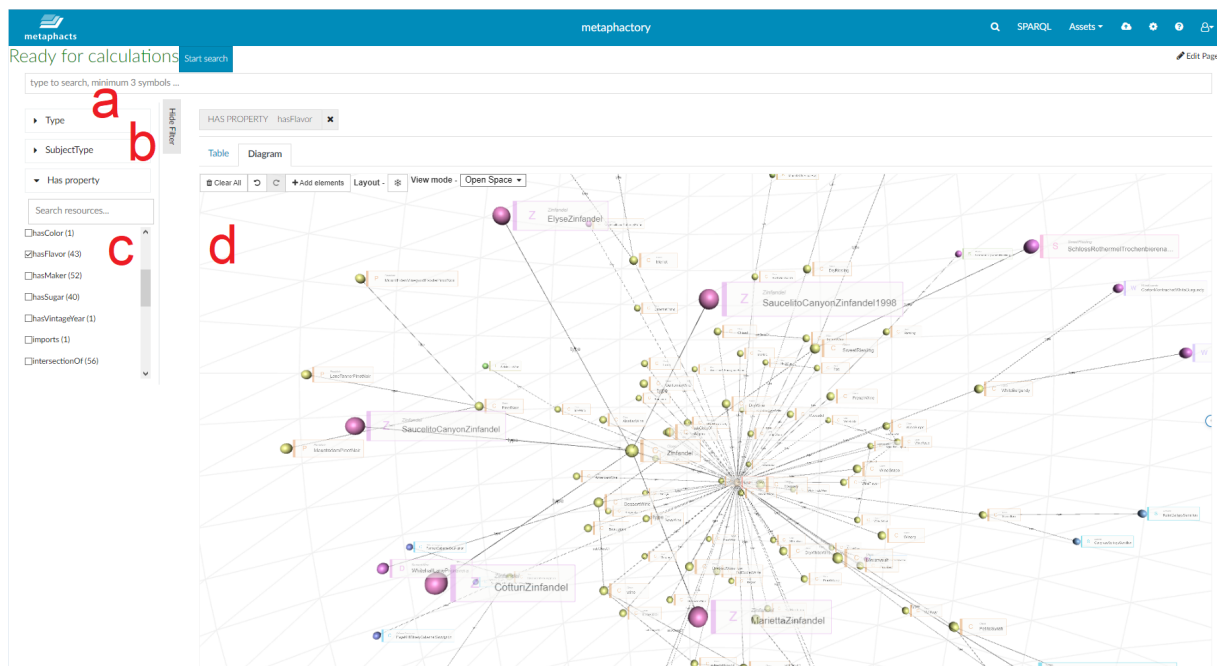


Рисунок 7 — Испытательный стенд: а – инструмент управления в пространстве типов; б – инструмент управления в пространстве типов объектов (класс экземпляр); с – инструмент управление в пространстве свойств и атрибутов; д – инструмент управления для трёх измерений пространства.

пользователю по трём осям пространства без возможности изменения угла обзора. Перемещение осуществлялось как посредством компьютерной мыши, так и клавиатуры.

Следующие два раздела четвертой главы посвящены результатам предварительных и финальных испытаний, после чего идёт сравнение результатов. В разделе приводятся графики испытаний и сравниваются результаты испытаний базового инструмента и инструмента, воплощающего предложенные методы и алгоритмы. На рисунке 8 представлен усредненный график приближения к цели в ходе выполнения операции поиска.

Прототип модифицировался в два этапа. Сначала в прототип был интегрирован модуль, который позволял формировать контекстно зависимые идентификаторы для анонимных узлов. Затем интерфейс был расширен модулем, обеспечивающим ранжирование узлов с использованием механизма внимания и векторизации запроса исходного графа. Из диаграмм на рисунках 9 и 10 мы видим, что общее количество переключений между шагами «ввод» и «осмотр» уменьшилось на одно переключение. Как видно из диаграммы на рисунке 11, средняя трудоемкость шагов ввода снизилась на 22% от изначальной, что говорит об увеличении качества инструментов управления. Пользователи меньше

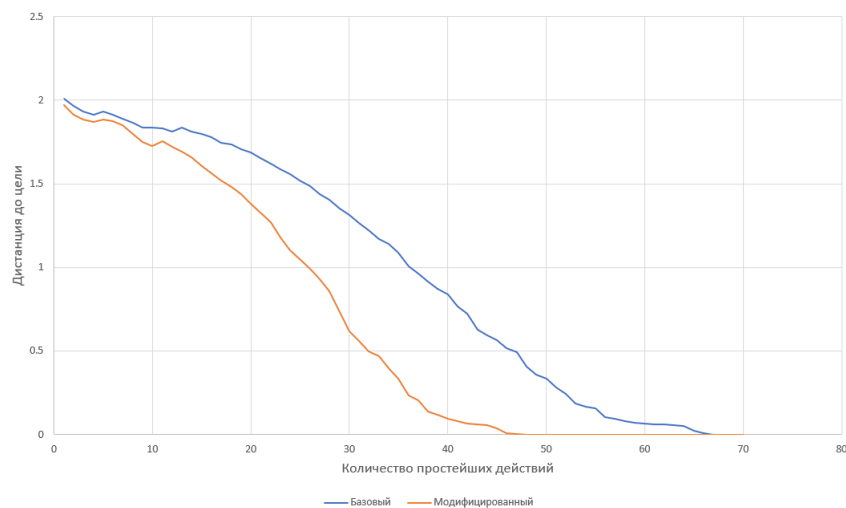


Рисунок 8 — Сравнение графиков приближения к цели

стали использовать панель фильтров, но все больше стали прибегать к использованию компонента фильтра по ключу, который обеспечивает интеллектуальную фильтрацию и поддерживает ранжирование элементов в соответствии со значениями коэффициентов внимания. Это снизило общую трудоемкость на шагах ввод. Подстраивание точки обзора теперь начало занимать меньше действий, то есть стало менее трудоемко. Сравнение графиков приближения к цели в ходе процесса поиска представлено на диаграмме «Сравнение графиков приближения к цели» (см. рисунок 8)

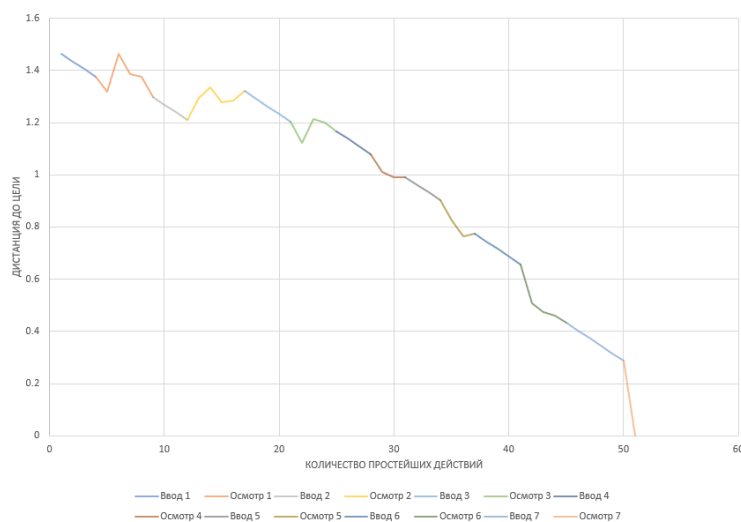


Рисунок 9 — График приближения на примере одной процедуры поиска (базовая версия инструмента)

Величина изначального покрытия была равна 31% из-за невозможности навигации в зоны анонимных узлов. С введением контекстно-зависимых идентификаторов величина покрытия приняла максимальное значение, что увеличи-

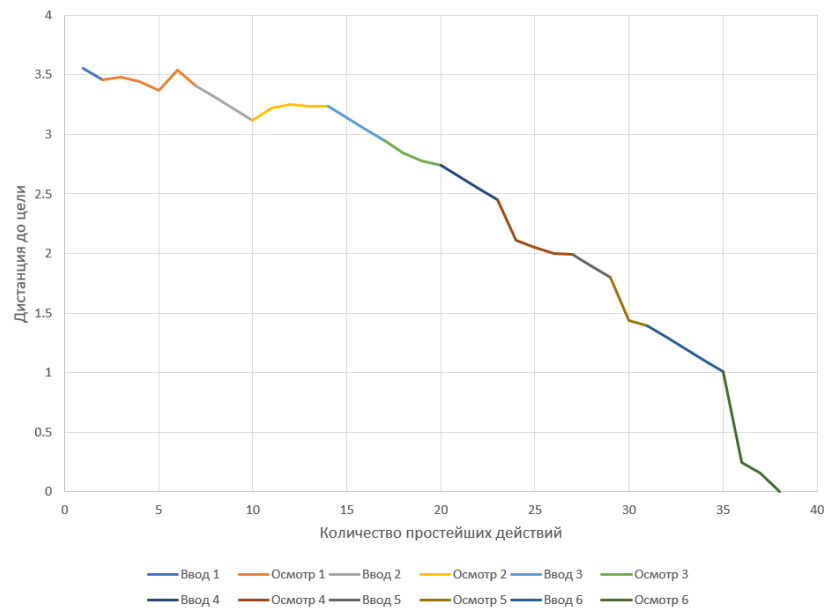


Рисунок 10 — График приближения на примере одной процедуры поиска (модифицированная версия инструмента)

чило значение метрик качества элементов управления. На диаграмме «Сравнение результатов расчёта метрик трудоёмкости поиска для различных версий инструмента» (см. рисунок 12) представлены результаты расчёта метрик качества интерактивной визуализации, а также качества элементов управления и визуализации.

Переходя к оценке трудоёмкости на шагах «осмотр» сразу стоит отметить, что метод формирования контекстно зависимых идентификаторов разрабатывался для визуализации в рамках глобальной визуализации, поэтому на качество визуализации в нашем случае не повлиял. В тоже время добавление модуля, обеспечивающего ранжирование элементов визуализации с использованием механизма внимания, значительно уменьшило трудоёмкость шагов «осмотр». Целевые элементы после выполнения шагов «ввод» находились визуально ближе к пользователю на экране, поэтому пользователь начинал процедуру осмотра с них и быстрее находил целевой элемент. Изменение средней трудоёмкости при сравнении базовой и модифицированной версий инструментов приведено на диаграмме на рисунке 11. Уменьшение трудоёмкости дало прирост качества визуализации, что, в свою очередь, положительно повлияло на качество интерактивной визуализации (см. диаграмму на рисунке 12).

Диаграмма на рисунке 12 иллюстрирует сравнения качества визуализации инструментов и интерактивной визуализации в целом для базовой версии ин-

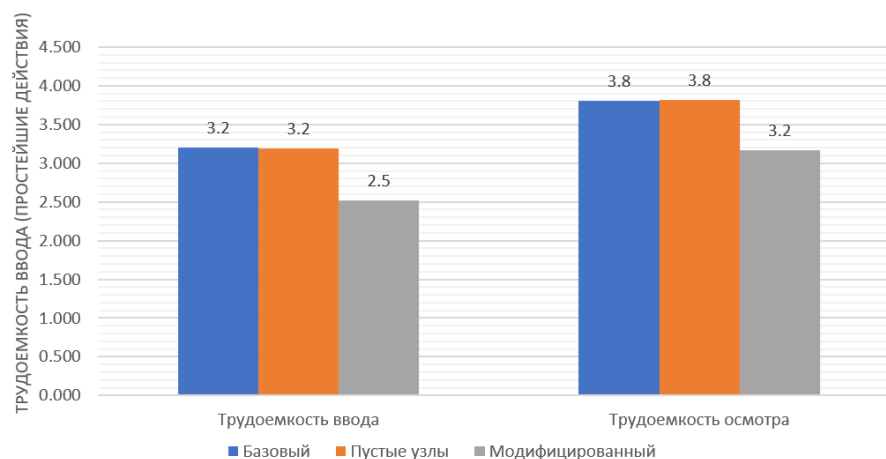


Рисунок 11 — Сравнение средних трудоемкостей поиска на шагах ввод и осмотр

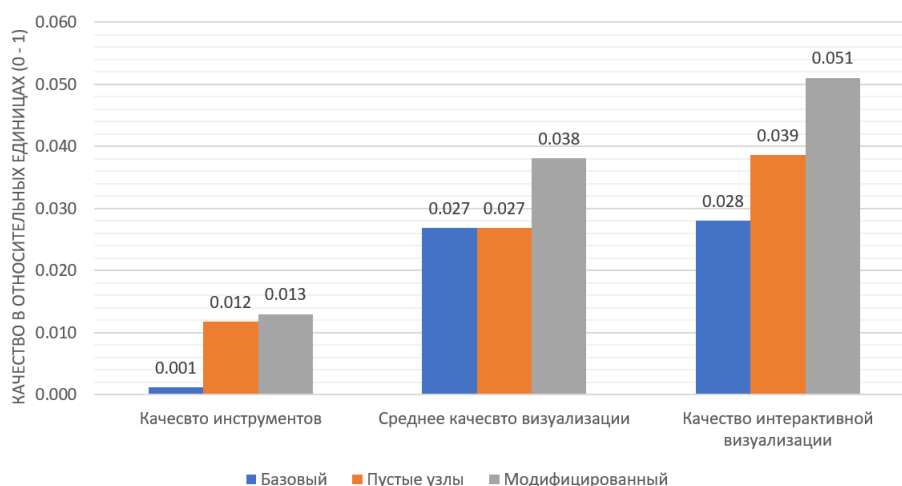


Рисунок 12 — Сравнение результатов расчёта метрик трудоемкости поиска для различных версий инструмента

струмента, версии инструмента со включенным модулем для анонимных узлов и для финальной версии инструмента с модулем, обеспечивающим ранжирование узлов.

Заключительный раздел главы описывает практическую ценность и сценарии использования прототипа и сопутствующих методов улучшения интерактивных визуализаций. Прототип написан в виде программного модуля, который может быть встроен в различные web-приложения, однако, как наиболее полезный сценарий использования, отмечается возможность использования прототипа в проектах британского музея. В ходе сотрудничества с Музеем в нескольких смежных проектах, сотрудниками музея были предоставлены трехмерные снимки местности (см. рисунок 13), прототип хорошо показал себя на

этапе испытаний и раскрыл широкий потенциал возможностей для сотрудничества с Британским Музеем в области отображения трехмерных моделей и онтологических данных.

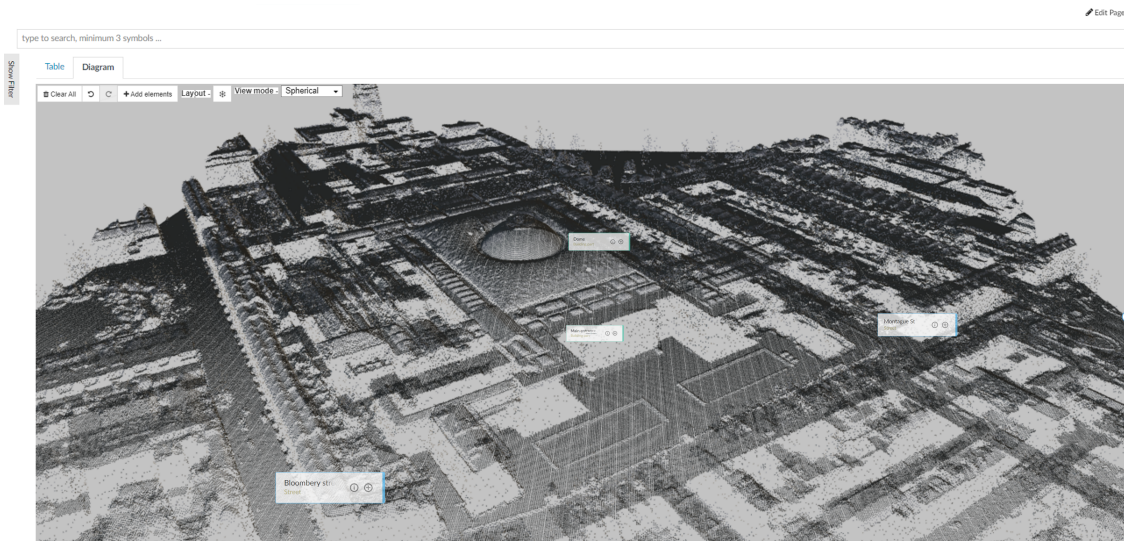


Рисунок 13 — Трехмерный снимок местности вокруг Британского Музея, выполненный с помощью технологии LIDAR

Пример визуализации данных британского музея представлен на рисунке 14. Для формирования рисунка 14 в базовую функциональность прототипа была добавлена возможность настройки фонового изображения и определения текстур трехмерных объектов.

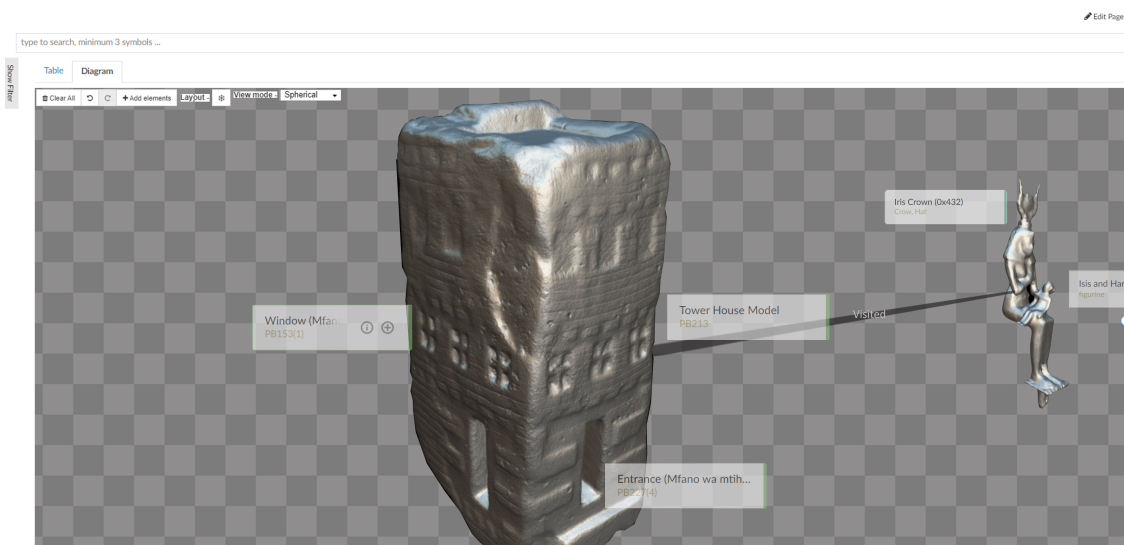


Рисунок 14 — Визуализация трехмерной модели Башни и её связи с статуэткой Iris

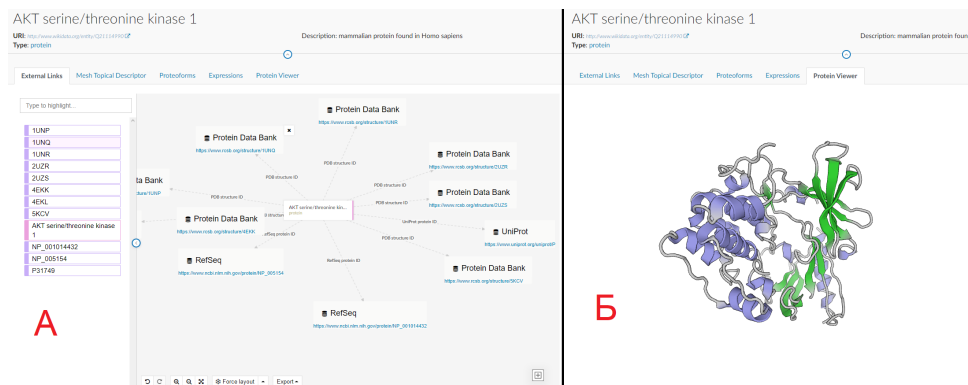


Рисунок 15 — Визуализация биоинженерных данных 2D

Другим возможным способом применения оказался сценарий, связанный с визуализацией биоинженерных данных. *Wikidata* предоставляет в открытом онтологическом виде данные о строении белков и их взаимосвязях. Так некоторые фармацевтические компании заинтересованы в визуальной репрезентации транзитивных связей мутаций определенных белков с болезнями, которые эти мутации вызывают. Платформа *Metphactory* поддерживает данный сценарий использования и предоставляет двухмерную визуализацию биоинженерных данных, и трехмерную визуализацию белков (<https://wikidata.metaphacts.com/resource/wd:Q21114990?view=page>), однако на данный момент это два отдельных сценария использования (см. рис. 15 А и Б), что предполагает потерю некоторого контекста при переключении между сценариями. Разработанный прототип позволяет объединить представленные на рисунке 15 сценарии использования и произвести совмещённую визуализацию данных, подкреплённую трехмерными визуализации белков (см. рисунки 16 и 17).

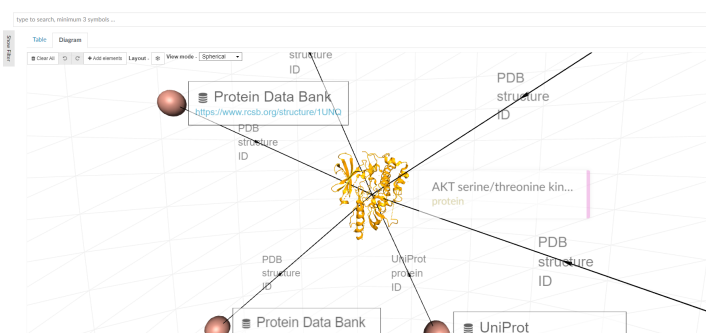


Рисунок 16 — Визуализация биоинженерных данных 3D (1)

Заключение

В рамках данной работы получены решения, позволяющие сократить время и трудоемкость интерактивного поиска по онтологическим базам данных с

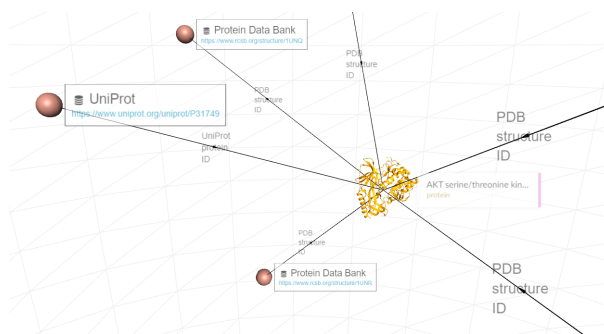


Рисунок 17 — Визуализация биоинженерных данных 3D (2)

использованием инструментов построения трехмерных визуализаций в виртуальной реальности.

В ходе аналитического обзора методов репрезентации онтологических данных в трехмерном пространстве были выявлены ограничения существующих решений и сформулированы требования к построению методов и средств визуального управления онтологическими данными в трехмерном пространстве, а также перечень характеристик инструментов визуализации, включенных в прототип экспериментального стенда.

Разработанная модель интерактивной визуализации, включающая структурные компоненты и функции управления онтологическими данными в многомерном пространстве данных, позволила математически описать способы оценки трехмерных интерактивных визуализаций данных, а разработанные на основе модели метрики позволили объективно подойти к вопросу оценки построенных визуализаций и доказать состоятельность разработанного метода. Были определены параметры визуализации, на которые следует опираться в процессе принятия технических решений.

Исследованы доступные языковые модели на основе нейронных сетей и архитектуры «Трансформер». С учётом требований, накладываемых процессом формирования текстового представления онтологических данных, а также особенностями векторизации семантических запросов была выбрана языковая модель *GPT – 2*. На основе данной модели разработан алгоритм ранжирования векторизованных узлов онтологического графа, что позволило сократить трудоёмкость поиска в пространстве данных, за счёт снижения количества релевантных простейших операций.

Решена проблема неполного покрытия пространства онтологических данных в процессе ленивой визуализации фрагментов онтологий, содержащих анонимные узлы. Решение основано на формировании контекстно-зависимых иден-

тификаторов анонимных узлов, которые позволяют восстанавливать канонизированный контекст этих узлов и продолжать навигацию в зоны онтологий ранее недоступные для поиска.

Был спланирован эксперимент и разработан прототип инструмента визуализации для экспериментального стенда, на котором были проведены испытания. Испытания показали улучшение значений метрик трудоемкости поиска для интерактивных визуализаций, что объективно показало работоспособность предложенного подхода.

Расчёт метрик трудоемкости поиска для базового прототипа позволил выявить узкие места и определить пути улучшения интерактивной визуализации. Так первым из узких мест было покрытие инструментами поиска пространства данных. Оказалось, что изначальное покрытие составляет 31%, – такое низкое значение получилось из-за недоступности для инструментов поиска зон пространства данных, содержащих анонимные узлы.

Вторым узким местом является трудоемкость процесса управления построенной визуализацией. Для уменьшения трудоемкости поиска был разработан набор рекомендаций по построению визуализации, а также алгоритм ранжирования узлов, который использует языковые модели и механизм внимания. Результаты экспериментов показали уменьшение трудоемкости поиска на различных этапах от 36% до 46%.

Реализованная программная библиотека для методов визуализации, использующих алгоритм выдачи контекстно зависимых идентификаторов и механизм внимания для упорядочивания узлов была использована в ряде сценариев работы с реальными онтологическими базами знаний и трехмерными графическими моделями.

Оценка сценариев использования практической составляющей работы продемонстрировало возможность применения прототипа как в задачах визуализации данных, представленных на языке Web Ontology Language, так и для представления связных данных в целом. В частности, продемонстрировано применение результатов для исследовательских данных о культурном наследии Британского Музея, а также для работы с онтологическими данным в области биоинженерии.

Таким образом, цель работы достигнута, а все поставленные в рамках данного диссертационного исследования задачи выполнены.

Список публикаций по теме диссертации

1. Раздьяконов Д.С., Морозов А.В., Павлов Д.С., Муромцев Д.И. Подход к обработке пустых узлов при порционной визуализации данных на примере инструмента ONTODIA // Программирование - 2020. - № 6. - С. 16-29
2. Razd'Yakonov D., Morozov A., Pavlov D., Muromtsev D. Approach to Blank Node Processing in Incremental Data Visualization by the Example of Ontodia // Programming and Computer Software - 2020, Vol. 46, No. 6, pp. 384-396
3. Razdyakonov D., Wohlgenannt G., Emelyanov Y., Pavlov D., Mouromtsev D. A New Tool for Linked Data Visualization and Exploration in 3D/VR Space // Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics) - 2019, Vol. 11762, pp. 167-171
4. Razdyakonov D. S., Muromtsev D. I. Application of an Agent-Based Model to Develop Ontological Data Visual Management Tool (2023). Scientific Visualization 15.5: 73 - 88, DOI: 10.26583/sv.15.5.07
5. Раздьяконов Д. С., Муромцев Д. И. Применение агентной модели интерактивной визуализации для создания средств визуального управления онтологическими данными (2023). Научная визуализация 15.5: 73 - 88, DOI: 10.26583/sv.15.5.07
6. Раздьяконов, Д. С. "МЕТОД РАЗРАБОТКИ СРЕДСТВ УПРАВЛЕНИЯ ОНТОЛОГИЧЕСКИМИ ДАННЫМИ В ТРЕХМЕРНОМ ВИРТУАЛЬНОМ ПРОСТРАНСТВЕ."Актуальные вопросы современной науки: теория, технология, методология и практика. 2023.
7. Wohlgenannt G., Klimov N., Mouromtsev D.I., Razdyakonov D., Pavlov D., Emelyanov Y. Using word embeddings for visual data exploration with ontodia and wikidata // CEUR Workshop Proceedings - 2017, Vol. 1932
8. Wohlgenannt G., Klimov N., Mouromtsev D., Razdyakonov D., Pavlov D., Emelyanov Y. Using word embeddings for search in linked data with Ontodia // CEUR Workshop Proceedings - 2017, Vol. 1963, pp. 16-24
9. Mouromtsev D., Pavlov D., Emelyanov Y., Morozov A., Razdyakonov D., Parkhimovich O. Workflow supporting toolset for diagram-based collaborative ontology development implemented in the open budget

- domain // Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics) - 2016, Vol. 9989, pp. 178-182
10. Mouromtsev D., Pavlov D., Emelyanov Y., Morozov A., Razdyakonov D., Galkin M. The simple, web-based tool for visualization and sharing of semantic data and ontologies // CEUR Workshop Proceedings - 2015, Vol. 1486, pp. 77