

## МОДЕЛЬ ОНТОЛОГИИ В ЗАДАЧЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СВОЙСТВ АМОРФНЫХ СПЛАВОВ

Дилла Дагим Силеши<sup>1</sup>,  
e-mail: dilla.d@dvfu.ru

Артемяева Ирина Леонидовна<sup>1</sup>,  
д-р техн. наук, профессор,  
e-mail: artemeva.il@dvfu.ru

Пустовалов Евгений Владиславович<sup>1</sup>,  
д-р физ.-мат. наук, доцент,  
e-mail: pustovalov.ev@dvfu.ru

Крестникова Ольга Александровна<sup>1</sup>,  
e-mail: krestnikova.oal@dvfu.ru

<sup>1</sup>Дальневосточный федеральный университет, Институт математики и компьютерных технологий,  
г. Владивосток, Россия

Исследование аморфных сплавов методами электронной микроскопии высокого разрешения генерирует большие массивы изображений. Однако отсутствие унифицированной структуры представления экспериментальных данных затрудняет их интерпретацию, воспроизводимость исследований и повторное использование результатов. В работе предложена многоуровневая модель онтологии, обеспечивающая формализацию полного цикла эксперимента – от параметров микроскопа и характеристик сплава до результатов кластеризации и анализа атомной структуры. При описании модели в качестве формализма использован язык прикладной логики. Модель включает три взаимосвязанных уровня, которые позволяют определить терминологию предметной области; методы и их параметры, требуемые при обработке результатов экспериментов; структуру представления информации о конкретных экспериментах, их сериях изображений, обнаруженных кластерах и атомных точках. Модульная трехуровневая архитектура модели онтологии обеспечивает расширяемость, повторное использование компонентов и строгую семантическую целостность данных. Разработанная модель легла в основу инструментального программного комплекса, поддерживающего обработку и анализ электронно-микроскопических данных. **Ключевые слова:** онтология предметной области, аморфные сплавы, электронная микроскопия, инструментальный комплекс, атомная структура, метаонтология

## AN ONTOLOGY MODEL FOR STUDYING THE PROPERTIES OF AMORPHOUS ALLOYS

Dilla D.S.<sup>1</sup>,  
e-mail: dilla.d@dvfu.ru

Artemieva I.L.<sup>1</sup>,  
doctor of technical sciences, professor,  
e-mail: artemeva.il@dvfu.ru

Pustovalov E.V.<sup>1</sup>,  
doctor of physical and mathematical sciences, professor,  
e-mail: pustovalov.ev@dvfu.ru

Krestnikova O.A.<sup>1</sup>,  
e-mail: krestnikova.oal@dvfu.ru

<sup>1</sup>Far Eastern Federal University, Institute of Mathematics and Computer Technologies, Vladivostok, Russia

*High-resolution electron microscopy (HREM) investigations of amorphous alloys generate extensive image datasets. However, the absence of a standardized data representation framework impedes interpretation, compromises research reproducibility, and limits the reuse of experimental results. This study proposes a multi-level ontology model that formalizes the complete experimental workflow, encompassing microscope parameters, alloy characteristics, clustering outcomes, and atomic structure analysis. The model is described using applied logic language as formalism. The model comprises three interconnected levels that define the domain-specific terminology, the methods and their parameters required for processing experimental data, and the structure for representing information about specific experiments, associated image series, identified clusters, and atomic points. The modular, three-tiered architecture of ontology ensures extensibility, component reuse, and strict semantic integrity of data. The developed model forms the basis of a software complex supporting end-to-end processing and analysis of electron microscopy image data.*

**Keywords:** domain ontologies, amorphous alloys, electron microscopy, instrumental complex, atomic structure, meta-ontology

## Введение

Исследование аморфных сплавов на атомном уровне является одной из актуальных задач современного материаловедения, поскольку свойства этих материалов в значительной степени определяются локальной и средней упорядоченностью атомной структуры. Современные методы электронной микроскопии высокого разрешения позволяют получать большие массивы изображений, отражающих эволюцию структуры материала в процессе эксперимента, однако интерпретация таких данных требует применения сложных процедур обработки, анализа и формализации результатов в соответствии с принципами FAIR [1].

Одной из ключевых проблем в данной области является отсутствие унифицированной структуры представления информации об экспериментах, сериях изображений, параметрах съемки, методах обработки и результатах анализа. Как правило, данные хранятся в разнородных форматах, а логические связи между этапами эксперимента, вариантами обработки и полученными результатами фиксируются неявно или утрачиваются. Это существенно затрудняет воспроизводимость исследований, сравнительный анализ результатов и повторное использование накопленных данных.

Существующие методы исследований и анализа результатов электронной микроскопии в большей степени ориентированы на материалы, обладающие упорядоченной структурой, как, например, кристаллические или органические с некоторым повторяющимся мотивом.

Существующие методы исследований и анализа результатов электронной микроскопии в большей степени ориентированы на материалы, обладающие упорядоченной структурой, – например, кристаллические вещества или органические соединения с повторяющимся мотивом. Такие подходы основаны на модификациях метода распознавания образов [2; 3] и анализе Фурье-спектров [4]. При исследовании аморфных материалов эти методы способны выявлять лишь отдельные области с кристаллическим упорядочением или общие изменения плотности структуры, но не обеспечивают детального описания стохастической иерархии атомных кластеров. Однако структура аморфных сплавов может содержать области упорядочения с неповторяющимся мотивом, что делает затруднительным применение существующих программных инструментов и методологий. Разрабатываемое в настоящее время программное обеспечение преимущественно ориентировано на обработку интегрированных данных [5–9]; даже анализ атомных структур, получаемых методами атомной томографии (*atom probe tomography*), проводится, как правило, для кристаллических систем без сравнительного анализа степени структурного порядка [10].

Существующие предметные онтологии в области материаловедения, такие как ЕММО [11] или онтологии в рамках ОВО Foundry [12], предоставляют общие термины для описания материалов, но не детализируют специфический экспериментальный цикл для аморфных систем: от параметров фокусировки микроскопа до статистических характеристик распределения атомных кластеров. Отсутствие такой детализации затрудняет воспроизводимость исследований и повторное использование накопленных данных, поскольку логические связи между этапами эксперимента фиксируются неявно.

Для исследования свойств аморфных сплавов необходим инструментальный комплекс, позволяющий накапливать методы обработки и анализа результатов экспериментов, выбирать оптимальные параметры обработки и наиболее подходящие аналитические процедуры для изучения закономерностей взаимосвязи «технология – структура – свойства». В процессе эксплуатации такого комплекса набор методов и их параметров должен адаптироваться под конкретные исследовательские задачи. Следовательно, программная архитектура должна поддерживать модификацию как информационных, так и программных компонентов.

Для обеспечения гибкости состава компонентов и поддержки эволюционного развития системы её разработка должна основываться на модели онтологии прикладной области «Исследование структуры аморфных сплавов», что и определяет актуальность тематики данной статьи. Онтология указанной предметной области должна позволять вводить новые термины: названия методов, их параметры, критерии интерпретации. Вследствие этого структура представления информации о проводимых экспериментах также должна быть расширяемой: добавление новых параметров требует механизмов формирования их значений при использовании новых методов обработки и анализа. Возможность динамического изменения онтологии в процессе эксплуатации программных систем обеспечивается многоуровневой онтологической архитектурой, в которой онтологии верхнего уровня определяют метатермины, используемые для описания модулей онтологий нижних уровней.

Модель онтологии (формальное описание предметной области средствами выбранного логического формализма) является теоретической основой для создания программных и информационных компонентов инструментального комплекса. На её основе будет описываться весь цикл анализа аморфных сплавов – от исходных параметров эксперимента до координат атомов и результатов структурной классификации. Разрабатываемая многоуровневая онтологическая модель имеет также практическую значимость, поскольку позволяет систематизировать и накапливать информацию о методах и их параметрах, наиболее эффективных для решения задач исследования свойств аморфных сплавов.

## 1. Современное состояние исследований в области онтологического моделирования

Формализация знаний предметной области с использованием онтологий является одним из ключевых направлений исследований в области представления знаний и интеллектуальных информационных систем. Онтологии обеспечивают явное задание понятийного аппарата, атрибутов объектов и отношений между ними, что особенно важно при работе со сложными, многокомпонентными экспериментальными данными. Для представления моделей онтологий используются различные формализмы: семантические сети, системы фреймов, объектно-ориентированные формализмы и логические модели.

Первые три класса формализмов позволяют представить модель онтологии в виде некоторого графа, вершины которого определяют понятия области, а дуги задают разные отношения между понятиями (например, таксономию понятий или их иерархию; возможны и другие типы отношений для таких моделей). Типы вершин и дуг фиксируются языком формализации модели онтологии. В объектно-ориентированных формализмах в вершинах определяются классы (равно понятиям), дуги позволяют задать связи между вводимыми классами (например, иерархию классов).

Логические модели основаны на логике предикатов. Для представления понятий прикладной области в этом случае используются объектные, функциональные или предикатные имена (термины прикладной области). Многосортные логические языки позволяют для имен формально задать сорт (область значения имени), фиксируя смысл вводимых терминов. Модель онтологии в таких моделях представляет собой логическую теорию, зависимости между значениями терминов задаются формулами такой теории.

Один из классов логических моделей и многосортных языков для их формального представления предложен в работах [13; 14]. Авторы выделяют ключевые структурные элементы онтологий, рассматривают различные интерпретации понятий и подчеркивают необходимость строгой логической формализации для обеспечения однозначности и воспроизводимости моделей. На основе логических моделей созданы модели онтологий, инструментальные и прикладные программные системы для раз-

личных сложных прикладных областей (описанных, например, в работах [15–18]). Примерами сложно-структурированных областей, для которых созданы логические модели онтологий указанного класса, являются медицинская диагностика, физическая, органическая и аналитическая химия, оптимизация программ, опубликованные в более ранних работах.

Современные исследования в области материаловедения демонстрируют возрастающий интерес к применению онтологий для структурирования экспериментальных данных и интеграции методов анализа. В работе [19] предложен модульный онтологический фреймворк, ориентированный на объединение знаний в области «Наука о материалах». Авторы демонстрируют возможность стандартизации терминологии и обеспечения совместимости между различными предметными доменами, включая дифракционные методы и фотоэлектрические исследования. Данный подход подтверждает актуальность использования онтологий для представления сложных экспериментальных и аналитических процессов в материаловедении.

В статье [20] представлена онтология лабораторного оборудования материаловедения, предназначенная для унификации описаний измерительных устройств и экспериментальных условий. Особое внимание уделяется приборам, используемым в электронно-микроскопических исследованиях. Предложенная модель может служить основой для стандартизированного описания параметров эксперимента и технических характеристик оборудования, что является важным аспектом при анализе и сопоставлении результатов различных исследований.

Интересным примером смежного применения онтологического подхода является работа [21], в которой демонстрируется возможность семантической интерпретации изображений на основе онтологий. Несмотря на ориентацию данной работы на область строительства и архитектуры, используемые в ней принципы связывания визуальных объектов с формализованными понятиями предметной области представляют методологический интерес и могут быть адаптированы для задач интерпретации электронно-микроскопических изображений.

Таким образом, анализ литературы показывает, что классические формальные модели онтологий остаются актуальной теоретической основой, тогда как современные онтологии в материаловедении демонстрируют практическую реализуемость онтологического подхода для описания оборудования, экспериментальных процессов и результатов анализа данных. В то же время вопросы построения онтологий, охватывающих полный цикл обработки и анализа электронно-микроскопических изображений аморфных сплавов, остаются недостаточно исследованными и в литературе не представлены.

## **2. Многоуровневая модель онтологии, положенная в основу разработки инструментальной системы**

В рамках решения задачи формализации представления знаний об экспериментальных исследованиях аморфных сплавов разработана многоуровневая онтологическая модель, предназначенная для описания структуры данных и знаний инструментальной системы обработки и анализа электронно-микроскопических изображений. Модель основана на использовании класса языков прикладной логики [13–14] и ориентирована на формальное задание терминологии, допустимых значений параметров и связей между объектами эксперимента.

Модель онтологии разделена на три уровня. Онтология третьего уровня задает модули, содержащие определения терминов, с помощью которых описываются различные методы (например, методы получения сплавов, методы воздействия на сплав в процессе эксперимента), используемые при анализе и обработке информации, полученной в результате экспериментов, параметры методов и их области значений. Эта онтология является метаонтологией (онтологией для множества онтологий). Структура метаонтологии представлена на рисунке 1.

Значения терминов метаонтологии задаются в онтологиях второго уровня, эти значения позволяют определять названия конкретных методов, конкретных параметров методов, которые будут использоваться при анализе информации, получаемой в процессе проведения экспериментов.

Онтологии второго уровня могут быть различными, что позволяет создавать различные версии систем обработки такой информации. Структура онтологий второго уровня представлена на рисунке 2.

Онтология первого уровня содержит модули (рисунок 3), каждый из которых задает терминологию для описания структуры представления информации об экспериментах, их сериях, последовательностях исходных и обработанных изображений, кластерах и атомных точках. Связи между модулями всех уровней представлены на рисунке 4.

### 2.1. Модули метаонтологии

Как сказано выше, модули метаонтологии определяют термины, с помощью которых описываются различные параметры с их областями значений (например, типы микроскопов, типы получения сплавов), которые используются на втором уровне при задании структуры представления информации об экспериментах, их сериях, результатах обработки изображений, серий и экспериментов.

Приведем состав модулей метаонтологии (рисунок 1):

- параметры микроскопа;
- методы получения сплавов;
- методы воздействия на сплав в процессе эксперимента;
- методы предварительной обработки последовательности изображений;
- методы обработки последовательности изображений;
- определение структуры результатов анализа серии;
- определение структуры результатов анализа эксперимента.

#### 2.1.1. Пример модуля метаонтологии: методы предварительной обработки последовательности изображений серии

Термины данного модуля позволяют определить структуру представления информации о том, какие методы предварительной обработки могут использоваться в экспериментах. Данная структура задается модулем онтологии, описывающей названия конкретных методов предварительной обработки, их параметров и последовательности применения.



Рисунок 1 – Компоненты метаонтологии (онтологии третьего уровня)



Рисунок 2 – Компоненты онтологии второго уровня



С каждым методом предварительной обработки связан свой набор параметров метода.

Сорт Параметры для метода предварительной обработки: Методы предварительной обработки  $\rightarrow \{ \}$   
 Параметры предварительной обработки  $\setminus \emptyset$

Термин «Параметры для представления результатов предварительной обработки» обозначает непустое множество названий параметров. Каждый параметр имеет свой уникальный идентификатор.

Сорт Параметры для представления результатов предварительной обработки:  $\{ \} N \setminus \emptyset$

Термин «Область возможных значений параметров для представления результатов предварительной обработки» обозначает функцию, сопоставляющую параметру для представления результатов предварительной обработки область его допустимых значений. Значением параметра может быть качественное значение (элемент множества  $N$ ) либо количественное вещественное (элемент множества кортежей, первый элемент которого принадлежит вещественному интервалу  $[ ] R$ , а второй элемент задает размерность – термин) или целое (число из целочисленного интервала  $[ ] I$ ) значение.

Сорт Область возможных значений параметров для представления результатов предварительной обработки:

Параметры для представления результатов предварительной обработки  $\rightarrow \{ \} N \cup ([ ] R \times N) \cup [ ] I$

С каждым методом предварительной обработки связан свой набор параметров для представления результатов метода.

Сорт Результаты для метода предварительной обработки: Методы предварительной обработки  $\rightarrow \{ \}$   
 Параметры для представления результатов предварительной обработки

Термин «Алгоритмы применения методов предварительной обработки» обозначает непустое множество названий алгоритмов.

Сорт Алгоритмы применения методов предварительной обработки:  $\{ \} N \setminus \emptyset$

Термин «Методы предварительной обработки для алгоритма» обозначает непустое множество названий методов, связанных с алгоритмом.

Сорт Методы предварительной обработки для алгоритма:

Алгоритмы применения методов предварительной обработки  $\rightarrow \{ \}$

Методы предварительной обработки  $\setminus \emptyset$

Термин «Параметры алгоритмов применения методов предварительной обработки» обозначает непустое множество идентификаторов параметров алгоритма. Каждый параметр имеет свой уникальный идентификатор.

Сорт Параметры алгоритмов применения методов предварительной обработки:  $\{ \} N \setminus \emptyset$

Примеры определения значений терминов метаонтологии для отдельных модулей приведены в подразделе 2.2.

## 2.2. Модули онтологии второго уровня

Количество модулей онтологии второго уровня совпадает с количеством модулей метаонтологии. Состав модулей онтологии второго уровня приведен на рисунке 2. Они позволяют определить:

- конкретные типы микроскопов, их параметры и области возможных значений параметров;
- набор конкретных методов получения сплавов, названия параметров этих методов и их области возможных значений;
- набор конкретных методов воздействия на сплав в процессе эксперимента, названия параметров этих методов и их области возможных значений;
- набор конкретных методов предварительной обработки последовательности изображений, названия параметров этих методов и их области возможных значений;
- набор конкретных методов обработки последовательности изображений, названия параметров этих методов и их области возможных значений;
- набор параметров для описания результатов анализа серии изображений с их областями возможных значений;
- набор параметров для описания результатов анализа эксперимента с их областями возможных значений.

Как было отмечено выше, онтологии второго уровня, терминология которых будет использоваться при описании конкретных экспериментов, могут быть разными. Онтология второго уровня может быть определена при создании программной системы либо в системе может присутствовать программная подсистема для редактирования значений терминов метаонтологии. Такая программная система будет иметь смысл редактора онтологий.

Приведем некоторые примеры определения терминов онтологии «Параметры микроскопа». Следующее множество названий типов микроскопов используется при проведении экспериментов.

{ПЭМ, СТЭМ, ВРПЭМ, НАADF-СТЭМ} ⊂ Типы микроскопа

Конкретизируем типы параметров микроскопа. Следующие параметры имеют вещественные значения.

{Ускоряющее напряжение, увеличение, длина камеры, размер диафрагмы, угол схождения, угол сбора, время экспозиции, усиление} ⊂ Параметры микроскопа с вещественными значениями

Следующие параметры имеют качественные значения.

{тип детектора} ⊂ Параметры микроскопа с качественными значениями

Следующие параметры имеют целочисленные значения.

{биннинг} ⊂ Параметры микроскопа с целочисленными значениями

Среди параметров микроскопа есть группа, которая определяет названия параметров калибровки.

{количество пикселей по оси x, количество пикселей по оси y, единица измерения расстояния между пикселями, метод калибровки, эталон калибровки, точность калибровки, размер пикселя x, размер пикселя y} ⊂ Параметры калибровки

Для перечисленных параметров калибровки задан тип их значений.

{количество пикселей по оси x, количество пикселей по оси y} ⊂ Параметры микроскопа с целочисленными значениями

{единица измерения расстояния между пикселями, метод калибровки, эталон калибровки} ⊂ Параметры микроскопа с качественными значениями

{точность калибровки, размер пикселя x, размер пикселя y} ⊂ Параметры микроскопа с вещественными значениями

Зададим области возможных значений некоторых параметров микроскопа и параметров калибровки.

Область возможных значений параметров микроскопа с вещественными значениями (ускоряющее напряжение) =  $R$  [минимальное значение ускоряющего напряжения, максимальное значение ускоряющего напряжения] × {кВ, В}

Область возможных значений параметров микроскопа с вещественными значениями (время экспозиции) =  $R$  [минимальное значение времени экспозиции, максимальное значение времени экспозиции] × {с, мс, мкс}

Область возможных значений параметров микроскопа с качественными значениями (единица измерения расстояния между пикселями) = {нм, ангстрем, пм}

### 2.3. Цикл проведения эксперимента

На рисунке 5 приведен цикл проведения эксперимента. На вход поступает аморфный сплав, про который известно, с использованием каких методов он был получен и какие значения имеют параметры этих методов. Структура информация о сплаве задается модулем онтологии первого уровня «Аморфные сплавы».

Перед анализом сплава с помощью электронного микроскопа фиксируется тип микроскопа и набор значений его параметров. Также фиксируется набор методов воздействия на сплав, значения статических и динамических параметров методов. Далее с помощью микроскопа выбранного типа проводится эксперимент, в процессе которого производится воздействие на сплав выбранными методами. После проведения эксперимента будет получена серия исходных изображений. Для каждого изображения фиксируются значения параметров этого изображения (в соответствии с онтологией изображений).

При необходимости может быть произведён возврат к выбору методов воздействия и проведению нового эксперимента с получением новой серии изображений. Также может быть произведен возврат к выбору типа микроскопа или смене значений его параметров. Смена множества методов воздействия на сплав или параметров микроскопа приводит к созданию новой версии для серии изображений. Тем самым, может существовать несколько версий серий.

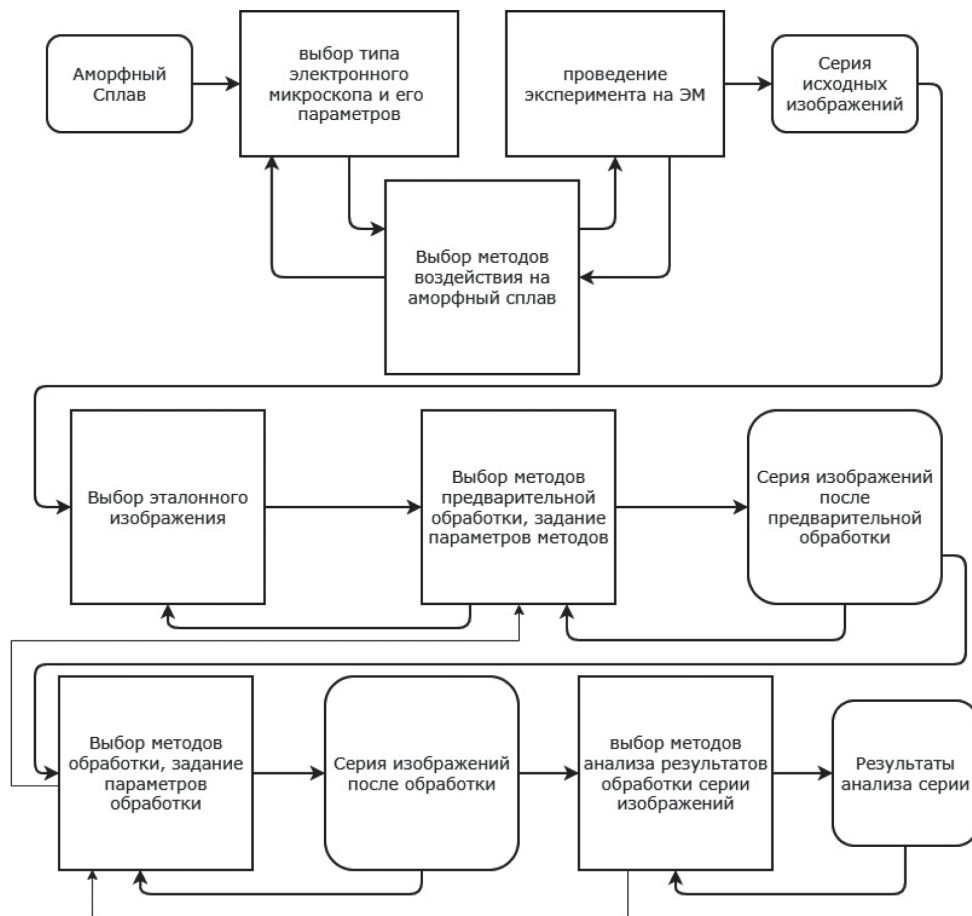


Рисунок 5 – Цикл проведения эксперимента

Далее для серии полученных с помощью электронного микроскопа изображений выбирается эталонное изображение. Фиксируются значения параметров этого изображения. Их значения будут использоваться при обработке всех изображений серии. Структура информации о серии изображений задается модулями онтологии первого уровня «Эксперимент», «Серия изображений» и «Изображение».

Серия изображений вместе с выбранным эталонным изображением поступает на предварительную обработку, перед началом которой фиксируются набор методов предварительной обработки и значения параметров методов. Выполняется предварительная обработка всех изображений серии, в результате которой формируется новая серия изображений, структура информации о которой задается модулем онтологии первого уровня «Варианты предварительной обработки серии изображений». При необходимости может быть произведён возврат к выбору методов предварительной обработки или смене параметров выбранных методов. Смена множества методов предварительной обработки или эталонного изображения приводит к созданию новой версии результатов предварительной обработки этой серии. Тем самым, может существовать несколько версий предварительной обработки одной и той же серии.

Для полученной после предварительной обработки серии изображений выбирается набор методов обработки (методов определения множества атомных точек, методов выделения кластеров, методов получения информации об изображениях), происходит обработка изображений серии выбранными

методами, структура информации о новой серии задается модулями онтологии первого уровня «Варианты обработки серии изображений», «Кластер» и «Атомная точка». При необходимости может быть произведен возврат к выбору методов обработки или смене параметров выбранных методов. Смена метода обработки или задание другого набора значений параметров приводит к созданию новой версии результатов обработки серии. Тем самым, может существовать несколько версий обработки одной и той же серии. Таким образом, в результате обработки серии формируется «лес» серий (рисунок 6), представляющих версии обработки исходных серий эксперимента.

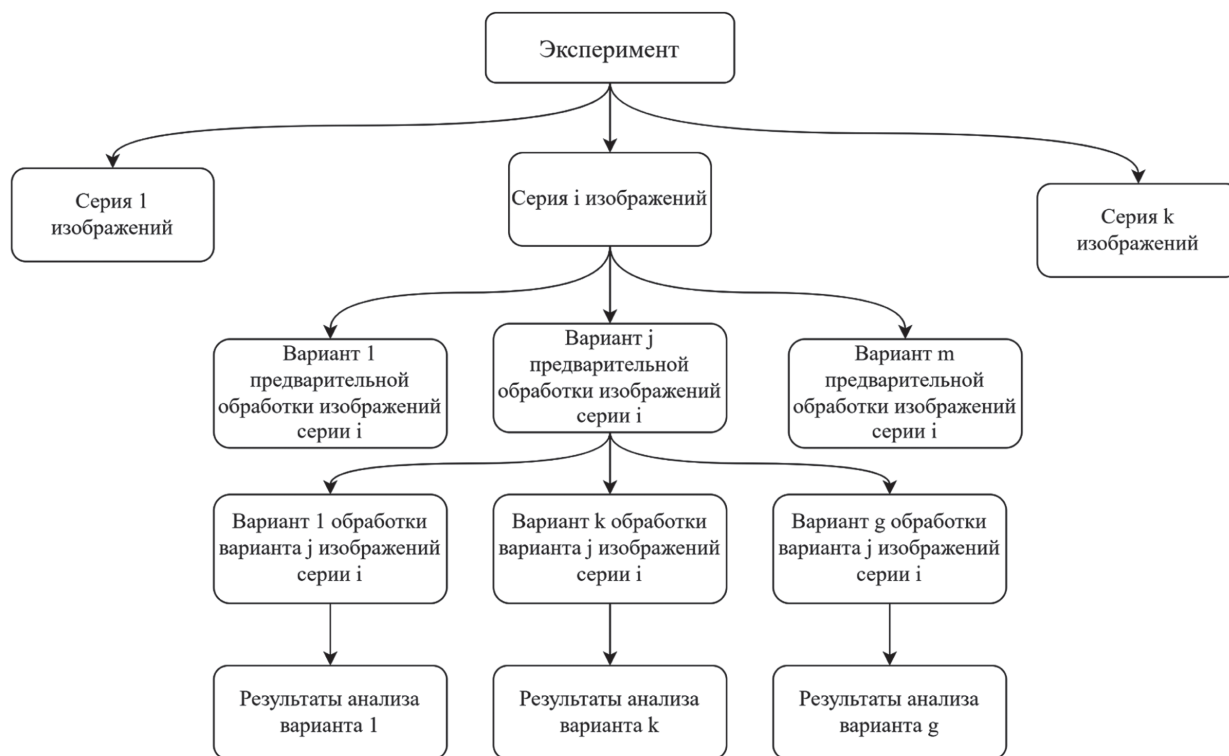


Рисунок 6 – «Лес» изображений после выполнения обработки эксперимента

Полученная после обработки серия изображений поступает на вход системы анализа серии изображений для получения различной информации о серии. Перед анализом серии также фиксируется набор используемых методов анализа, которые при необходимости могут быть изменены. Полученный в результате циклов «лес» серий поступает на вход системы анализа результатов эксперимента.

## 2.4. Модули онтологии первого уровня

Онтология первого уровня содержит модули (рисунок 3), каждый из которых задает терминологию для описания структуры представления информации об экспериментах, их сериях, последовательностях исходных и обработанных изображений, кластерах и атомных точках. В состав онтологии первого уровня также входит вспомогательный модуль, в котором определяются вспомогательные термины, задающие формат представления даты и времени.

### 2.4.1. Пример модуля онтологии первого уровня: Аморфные сплавы

Определим термины модуля онтологии Аморфные сплавы.

Термин «Аморфные сплавы» обозначает непустое множество идентификаторов аморфных сплавов. Каждый аморфный сплав имеет свой уникальный идентификатор.

Сорт Аморфные сплавы:  $\{N \setminus \emptyset\}$

Термин «Химические элементы» обозначает непустое множество идентификаторов химических элементов. Каждый химический элемент имеет свой уникальный идентификатор (определяемый таблицей Менделеева).

Сорт Химические элементы:  $\{N \setminus \emptyset\}$

Термин «Элементный состав» обозначает функцию, сопоставляющую аморфному сплаву множество химических элементов, входящих в его состав.

Сорт Элементный состав: Аморфные сплавы  $\rightarrow \{ \}$  Химические элементы  $\setminus \emptyset$

Термин «Атомный процент» обозначает функцию, сопоставляющую аморфному сплаву и химическому элементу, входящему в его состав, неотрицательное вещественное число, обозначающее атомный процент для этого элемента в этом сплаве.

Сорт атомный процент:  $(v1 \in \text{Аморфные сплавы}, v2 \in \text{Элементный состав}(v1)) \rightarrow R(0,100]$

Термин «Массовый процент» обозначает функцию, сопоставляющую аморфному сплаву и химическому элементу, входящему в его состав, неотрицательное вещественное число, обозначающее массовый процент для этого элемента в этом сплаве.

Сорт массовый процент:  $(v1 \in \text{Аморфные сплавы}, v2 \in \text{Элементный состав}(v1)) \rightarrow R(0, 100]$

Термин «Метод получения сплава» обозначает функцию, сопоставляющую аморфному сплаву метод. Набор методов, которые могут использоваться для получения сплавов, задается в модуле онтологии второго уровня «Определение набора конкретных методов получения сплавов». Структура представления информации о методах определяется модулем метаонтологии «Методы получения сплавов».

Сорт Метод получения сплава: Аморфные сплавы  $\rightarrow$  Методы получения сплавов

Термин «Значение параметра для сплава» обозначает функцию, сопоставляющую аморфному сплаву и параметру процесса получения значения этого параметра для этого сплава. Набор параметров для каждого метода задается в модуле онтологии второго уровня «Определение набора конкретных методов получения сплавов». Структура представления информации о параметрах методов определяется модулем метаонтологии «Методы получения сплавов».

Сорт Значение параметра для сплава:  $(a \in \text{Аморфные сплавы}, p \in \text{Параметры для метода получения сплава (Метод получения сплава}(a))) \rightarrow (N \cup (R \times N) \cup R \cup I)$

Для любого сплава значение любого параметра процесса получения принадлежит области возможных значений этого параметра. Область возможных значений параметра метода задается в модуле онтологии второго уровня «Определение набора конкретных методов получения сплавов». Структура представления информации об областях значений параметров определяется модулем метаонтологии «Методы получения сплавов».

$(\forall a \in \text{Аморфные сплавы}) (\forall p \in \text{Параметры для метода получения сплава (Метод получения сплава}(a)))$   
Значение параметра для сплава  $(a,p) \in$  Область возможных значений параметров процесса получения  $(p)$

#### 2.4.2. Пример модуля онтологии первого уровня: Эксперимент

Данный модуль онтологии определяет структуру представления информации об эксперименте, целью которого является получение экспериментальной серии изображений как результата воздействия на аморфный сплав.

Термин «Эксперименты» обозначает непустое множество идентификаторов экспериментов. Каждый эксперимент имеет свой уникальный идентификатор в системе.

Сорт Эксперименты:  $\{ N \setminus \emptyset \}$

Термин «Исследователь» обозначает функцию, сопоставляющую эксперименту исследователя, который выполняет анализ полученных серий изображений.

Сорт Исследователь: Эксперименты  $\rightarrow N$

Термин «Учреждение» обозначает функцию, сопоставляющую эксперименту организацию исследователя.

Сорт Учреждение: Эксперименты  $\rightarrow N$

Термин «Дата начала эксперимента» обозначает функцию, сопоставляющую эксперименту кортеж, состоящий из даты и времени начала анализа его результатов – элемент декартова произведения

множеств, задающих формат определения даты и времени. Структура представления информации о дате и времени задается модулем онтологии первого уровня «Дата и время».

Сорт Дата начала эксперимента: Эксперименты  $\rightarrow$  дата  $\times$  время

Термин «Дата сохранения информации по окончании эксперимента» обозначает функцию, сопоставляющую эксперименту кортеж, состоящий из даты и времени окончания анализа его результатов. Структура представления информации о дате и времени задается модулем онтологии первого уровня «Дата и время».

Сорт Дата сохранения информации по окончании эксперимента: Эксперименты  $\rightarrow$  дата  $\times$  время

Следующее утверждение задает связь между датой начала эксперимента и датой сохранения информации о нем.

$(\forall v \in \text{Эксперименты}) \text{Предшествует} (\text{Дата начала эксперимента}(v), \text{Дата сохранения информации по окончании эксперимента}(v))$

Термин «Тип микроскопа для эксперимента» задает тип микроскопа, используемого при получении всех серий эксперимента. Допустимые типы микроскопа задаются модулем онтологии второго уровня «Определение параметров и конкретных типов микроскопа».

Сорт Тип микроскопа для эксперимента: Эксперименты  $\rightarrow$  Типы микроскопа

Термин «Исследуемый сплав» обозначает функцию, сопоставляющую эксперименту исследуемый в нем сплав.

Сорт Исследуемый сплав: Эксперименты  $\rightarrow$  Аморфные сплавы

Термин «Серии изображений» обозначает непустое множество идентификаторов серий изображений. Каждая серия имеет свой уникальный идентификатор. Структура представления информации об экспериментальной серии задается модулем онтологии первого уровня «Серии изображений». Для серии описываются использованные методы воздействия на сплав и значения их параметров. Конкретный набор доступных методов и их параметров фиксируется модулем онтологии второго уровня «Определение конкретных методов воздействия на сплав». Структура представления информации о методах и их параметрах задается модулем метаонтологии «Методы воздействия на сплав в процессе эксперимента».

Сорт Серии изображений:  $\{\}N \setminus \emptyset$

Термин «Серии эксперимента» обозначает функцию, сопоставляющую эксперименту множество относящихся к нему серий. Структура информации о каждом изображении серии задается модулем онтологии первого уровня «Изображение».

Сорт Серии эксперимента: Эксперименты  $\rightarrow$   $\{\}$  Серии изображений  $\setminus \emptyset$

### 2.4.3. Пример модуля онтологии первого уровня: варианты предварительной обработки серии изображений

Приведем фрагмент модуля онтологии «Варианты предварительной обработки серии изображений». Данный модуль определяет термины, позволяющие описывать свойства варианта последовательности изображений, полученных после предварительной обработки экспериментальной серии изображений.

Термин «Варианты предварительной обработки» обозначает непустое множество уникальных идентификаторов.

Сорт Варианты предварительной обработки:  $\{\}N \setminus \emptyset$

Термин «Отнесение варианта предварительной обработки к серии» обозначает функцию, сопоставляющую варианту предварительной обработки серию, к которой он относится. Каждый вариант предварительной обработки относится к одной серии изображений.

Сорт Отнесение варианта предварительной обработки к серии:  
Варианты предварительной обработки  $\rightarrow$  Серии изображений

Вспомогательная функция сопоставляет серии множество вариантов ее предварительной обработки.

Варианты предварительной обработки серии  $\equiv (\lambda (c \in \text{Серии изображений}) \{(v \in \text{Варианты предварительной обработки}) \mid \text{Отнесение варианта предварительной обработки к серии } (v) = c\})$

С каждым вариантом предварительной обработки связана дата ее проведения.

Сорт Дата предварительной обработки: Варианты предварительной обработки  $\rightarrow$  дата  $\times$  время

Дата любого варианта предварительной обработки серии не может предшествовать дате ее получения.

$(\forall c \in \text{Серии изображений}) (\forall v \in \text{Варианты предварительной обработки серии } (c))$   
 $\text{not}(\text{Предшествует}(\text{Дата предварительной обработки}(v), \text{Дата получения серии}(c)))$

С вариантом предварительной обработки однозначно связано эталонное изображение.

Сорт Эталонное изображение: Варианты предварительной обработки  $\rightarrow$  Изображения

Эталонное изображение для варианта принадлежит последовательности изображений той серии, к которой относится вариант.

$(\forall v \in \text{Варианты предварительной обработки})$  Принадлежит серии (Отнесение варианта предварительной обработки к серии (v), Эталонное изображение(v))

Термин «Эксперимент для варианта предварительной обработки» обозначает функцию, сопоставляющую варианту предварительной обработки эксперимент, к которому этот вариант относится. Каждый вариант относится всегда к одному эксперименту.

Сорт Эксперимент для варианта предварительной обработки: Варианты предварительной обработки  $\rightarrow$  Эксперименты

Утверждение задает правило определения эксперимента для варианта.

$(\forall v \in \text{Варианты предварительной обработки})$  Эксперимент для варианта предварительной обработки(v) = Эксперимент для серии(Отнесение варианта предварительной обработки к серии(v))

При предварительной обработке фиксируется множество методов, которые были использованы. Набор доступных для предварительной обработки методов фиксируется модулем онтологии второго уровня «Определение конкретных методов предварительной обработки изображений». Структура представления информации о методах фиксируется модулем метаонтологии «Методы предварительной обработки».

Сорт Используемые методы предварительной обработки: Варианты предварительной обработки  $\rightarrow$  { } Методы предварительной обработки

Термин «Значение параметра для метода предварительной обработки» обозначает функцию, аргументами которой являются вариант предварительной обработки, использованный метод для этого варианта, название параметра этого метода, а результатом – значение параметра, заданное для данного варианта. Набор параметров метода фиксируется модулем онтологии второго уровня «Определение конкретных методов предварительной обработки изображений».

Сорт Значение параметра для метода предварительной обработки: (v  $\in$  Варианты предварительной обработки, m  $\in$  Используемые методы предварительной обработки(v), p  $\in$  Параметры для метода предварительной обработки(m))  $\rightarrow N \cup (R \times N) \cup I \cup R$

Значение любого параметра принадлежит области его возможных значений. Область возможных значений параметров метода фиксируется модулем онтологии второго уровня «Определение конкретных методов предварительной обработки изображений».

$(\forall v \in \text{Варианты предварительной обработки}) (\forall m \in \text{Используемые методы предварительной обработки } (v))$   
 $(\forall m \in \text{Параметры для метода предварительной обработки } (m))$  Значение параметра для метода предварительной обработки (v,m,p)  $\in$  Область возможных значений параметров предварительной обработки (p)

## 2.5. Архитектура инструментального комплекса

Архитектура инструментального комплекса представлена на рисунке 7. Компонентами инструментального комплекса являются подсистема выбора параметров микроскопа, подсистема выбора методов воздействия на сплав в процессе эксперимента, подсистемы выбора методов предварительной обработки и обработки и подсистема выбора методов анализа результатов для серии. В данный проект не включена подсистема выбора методов анализа экспериментов. Предполагается, что такой компонент

может появиться в следующих версиях инструментального комплекса после накопления и изучения методов для всех библиотек.

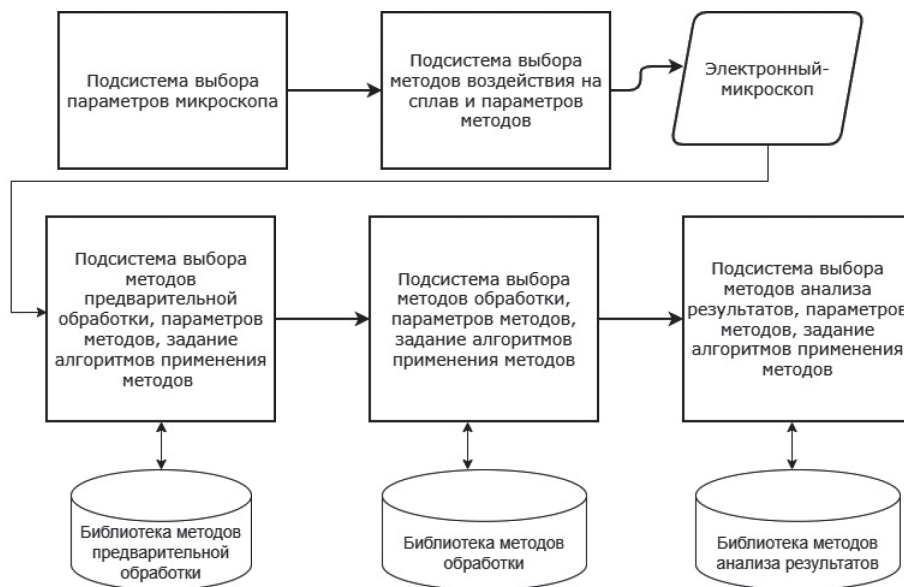


Рисунок 7 – Компоненты инструментального комплекса

Первые две подсистемы могут быть установлены на микроскопе, их назначение – обеспечить проведение различных экспериментов с различными параметрами для получения различных версий серии изображений. Если в экспериментах используются микроскопы разных типов, то такие подсистемы будут свои для каждого типа микроскопа. Информация о выбранных методах и значениях параметров передается системе предварительной обработки вместе с версией серии полученных изображений. Ключевая задача здесь состоит в формализации и сохранении данных об эксперименте, чтобы этапы обработки и анализа могли учитывать влияние исходных условий на структурные особенности, выявленные на микроуровне.

Подсистема предварительной обработки предназначена для улучшения качества изображений и подготовки данных к обработке и анализу. Эта подсистема реализует последовательность операций, которые устраняют артефакты съемки, улучшают сигнал и стандартизируют данные. Онтология формализует набор используемых методов предварительной обработки, начиная от начальной оценки шума до финальной валидации, обеспечивая воспроизводимость и документирование всех преобразований. Ключевая функция – преобразование исходных изображений с целью сохранения реальных атомных сигналов и удаления инструментальных артефактов. Подсистема выбора методов позволяет выбрать существующие методы и алгоритмы для использования при работе с аморфным сплавом.

Подсистема обработки определяет структуры для идентификации атомных точек и извлечения координат из изображений аморфных сплавов. Реализуются методы обнаружения атомных позиций, субпиксельного уточнения, фильтрации ложных срабатываний и коррекции инструментальных искажений. Онтология второго уровня определяет состав доступных методов и алгоритмов. Ключевая задача – минимизация ложных обнаружений при максимальном сохранении реальных атомных позиций.

Подсистема выбора методов обработки включает две подсистемы (рисунок 8): подсистему выбора методов выделения атомных точек и подсистему выбора методов кластеризации.

Подсистема выбора методов кластеризации определяет методы пространственной группировки атомных частиц и их классификации в металлических стеклах. Идентифицируются области со сходными структурными характеристиками, выявляется средний порядок в аморфных материалах. Онтология второго уровня описывает различные методы кластеризации, их классификации посредством использования геометрических, плотностных и структурных признаков. Ключевая задача – объективное выделение структурных доменов без априорных предположений об их форме или размере.

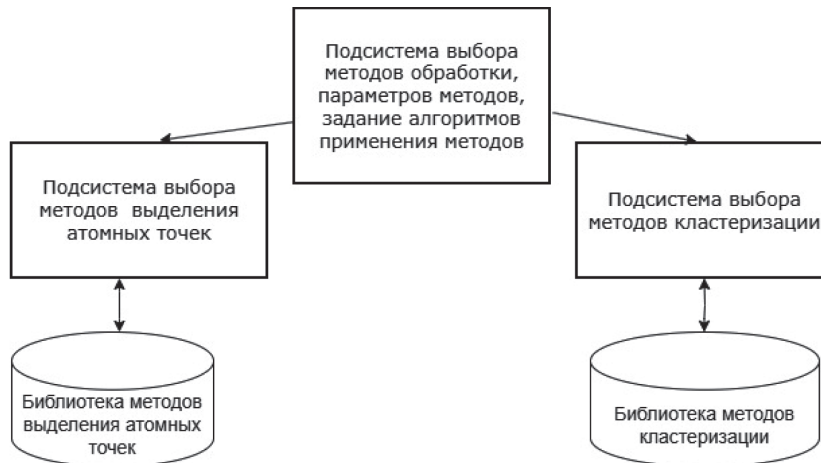


Рисунок 8 – Компоненты подсистемы выбора методов обработки

Подсистема выбора методов анализа состоит из двух подсистем (рисунок 9): подсистемы выбора методов анализа локальной упорядоченности и подсистемы выбора методов визуализации отчетов.

Подсистема выбора методов анализа определяет методы для получения количественных характеристик атомной структуры сплавов. Определяются различные структурные индикаторы, статистические распределения и параметры упорядоченности, характеризующие аморфное состояние. Онтология второго уровня описывает различные методы анализа радиального распределения, распределения углов, диаграмм Вороного и энтропийных мер. Ключевая задача при анализе – определение количественных дескрипторов, которые коррелируют с макроскопическими свойствами материалов.



Рисунок 9 – Компоненты подсистемы анализа результатов

Подсистема выбора методов визуализации позволяет задать структуры для генерации графических представлений результатов анализа аморфных сплавов. В результате визуализации создаются изображения с наложениями, статистические графики, 2D/3D-модели и интерактивные дашборды для интерпретации данных. Онтология второго уровня описывает различные методы визуализации, форматы вывода и стили представления. Ключевая задача визуализации – эффективная передача сложных структурных инсайтов через визуальные представления.

В библиотеки методов могут постоянно добавляться новые или обновляться существующие, что обеспечивает развиваемость инструментального комплекса, позволяя накапливать и исследовать применимость различных методов для повышения правильности определения взаимосвязи технология – структура – свойства для аморфных сплавов.

### Заключение

В работе предложена трехуровневая многомодульная логическая модель онтологии для области «Исследование свойств аморфных сплавов». Модель обеспечивает формализацию полного цикла эксперимента – от параметров микроскопа и характеристик сплава до результатов кластеризации и анализа атомной структуры. Показана связь модулей онтологии всех уровней. Приведены примеры модулей. Описан цикл проведения эксперимента по исследованию свойств аморфных сплавов, показано, какие модули онтологии используются на этапах этого цикла. Описаны компоненты инструментального комплекса, предназначенного для поддержки проведения экспериментов. Показано, как онтология влияет на состав комплекса и на основании чего обеспечивается его развиваемость и накопление методов для обработки и анализа изображений аморфных сплавов. Проведенные экспериментальные исследования подтвердили возможность оценивания степени упорядоченности атомной структуры аморфных сплавов с использованием инструментального комплекса.

### Список литературы

1. *Wilkinson M.D., Dumontier M., Aalbersberg I.J. et al.* The FAIR Guiding Principles for scientific data management and stewardship // *Scientific Data*. – 2016. – Vol. 3. – Art. 160018. – DOI 10.1038/sdata.2016.18.
2. *Clausen H., Rumancev C., Bergmann U. et al.* LiberTEM: Software platform for scalable multidimensional data processing in transmission electron microscopy // *Journal of Open-Source Software*. – 2020. – Vol. 5, No. 50. – Art. 2006. – DOI 10.21105/joss.02006.
3. *Stratton W.G., Hamann J., Perepezko J.H. et al.* Aluminum nanoscale order in amorphous measured by fluctuation electron microscopy // *Applied Physics Letters*. – 2005. – Vol. 86, No. 14. – Art. 141910. – DOI 10.1063/1.1897830.
4. *Cautaerts N., Martineau C., Verbeeck J. et al.* Free, flexible and fast: Orientation mapping using the multi-core and GPU-accelerated template matching capabilities in the Python-based open source 4D-STEM analysis toolbox Pyxem // *Ultramicroscopy*. – 2022. – Vol. 237. – Art. 113517. – DOI 10.1016/j.ultramic.2022.113517.
5. *Best J.P., Nomoto K., Yang F. et al.* Advanced structural analysis of a laser additive manufactured Zr-based bulk metallic glass along the build height // *Journal of Materials Science*. – 2022. – Vol. 57. – P. 9678–9692. – DOI 10.1007/s10853-022-06991-6.
6. *Wang M., Wang Y., Islam M. et al.* Dual machine learning pinpoints the Radius of Informative Structural Environments in metallic glasses // *npj Computational Materials*. – 2026. – DOI 10.1038/s41524-026-01997-z.
7. *Vaerst O., Rösner H., Peterlechner M., Wilde G.* Local structure and dynamics of a Zr-based bulk metallic glass during ex situ and in situ annealing // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2026. – Vol. 1051. – Art. 186051. – ISSN 0925-8388. – DOI 10.1016/j.jallcom.2026.186051.
8. *Hwang J., Voyles P.M.* Variable resolution fluctuation electron microscopy on Cu-Zr metallic glass using a wide range of coherent STEM probe size // *Microscopy and Microanalysis*. – 2011. – Vol. 17. – P. 67–74.
9. *Hwang S., Koh H., Yang J. C.* Electron Microscopy Approaches to Unraveling the Structure of Amorphous Materials // *Small Methods*. – 2026. – Vol. 10, No. 3. – Art. e01852. – DOI 10.1002/smt.202501852.
10. *Gault B., Moody M.P., Cairney J.M., Ringer S.P.* Atom probe microscopy. – Springer Science & Business Media, 2012. – DOI 10.1007/978-1-4614-3436-8.
11. *Smith B., Ashburner M., Rosse C. et al.* The OBO Foundry: coordinated evolution of ontologies to support biomedical data integration // *Nature Biotechnology*. – 2007. – Vol. 25, No. 11. – P. 1251–1255. – DOI 10.1038/nbt1346.
12. EMMO: Elementary Multiperspective Material Ontology // FAIRsharing. 2024. – URL: <https://doi.org/10.25504/FAIRsharing.1bdf3c> (дата обращения: 19.03.2026). – Текст: электронный.
13. *Kleshchev A.S., Artemieva I.L.* Mathematical Models of Domain Ontologies // *International Journal on Information Theory and Applications*. – 2007. – Vol. 14, No. 1. – P. 35.
14. *Kleshchev A.S., Artemieva I.L.* A Mathematical Apparatus for Domain Ontology Simulation. An Extendable Language of Applied Logic // *International Journal on Information Theory and Applications*. – 2005. – Vol. 12, No. 2. – P. 149–157.
15. *Артемяева И.Л.* Основанные на онтологиях инструментальные и прикладные интеллектуальные системы // *Знания – Онтологии – Теории (ЗОНТ-2019): материалы VII Международной конференции*. – Новосибирск, 2019. – С. 16–23.

16. *Gulyaeva K.A., Artemieva I.L.* Ontology Models in Intelligent System Engineering: A Case of the Knowledge-Intensive Application Domain // *Artificial Intelligence: Lecture Notes in Computer Science* / eds. G. Osipov, A. Panov, K. Yakovlev. – Cham: Springer, 2019. – Vol. 11866. – DOI 10.1007/978-3-030-33274-7\_8.
17. *Gulyaeva K.A., Artemieva I.L.* Applied Logics to Develop Ontology Model of the Complex-Structured Domains: Organic Chemistry and Biochemistry // *Biomedical Engineering and Computational Intelligence* / eds. J. Tavares, N. Dey, A. Joshi. – Cham: Springer, 2020. (Lecture Notes in Computational Vision and Biomechanics; vol. 32). – P. 103–119. – DOI 10.1007/978-3-030-21726-6\_7.
18. *Артемьева И.Л., Чусова А.Е.* Разработка онтологии предметной области архитектурной акустики // *Знания – Онтологии – Теории (ЗОНТ-2023): материалы IX Международной конференции.* – Новосибирск, 2023. – С. 19–23.
19. *Rajamohan B.P., Bradley A.C.H., Tran V.D. et al.* Materials Data Science Ontology (MDS-Onto): Unifying Domain Knowledge in Materials and Applied Data Science // *Scientific Data.* – 2025. – Vol. 12, No. 1. – Art. 628. – DOI 10.1038/s41597-025-04938-5.
20. *Jalali M., Mail M., Aversa R., Kübel C.* MSLE: An ontology for Materials Science Laboratory Equipment // *Materials Today Communications.* – 2023. – Vol. 36. – Art. 105532. – DOI 10.1016/j.mtcomm.2023.105532.
21. *Zheng Y., Masood M.K., Seppänen O., Torma S., Aikala A.* Ontology-Based Semantic Construction Image Interpretation // *Buildings.* – 2023. – Vol. 13, No. 11. – Art. 2812. – DOI 10.3390/buildings13112812.

### References

1. *Wilkinson M.D., Dumontier M., Aalbersberg I.J. et al.* The FAIR Guiding Principles for scientific data management and stewardship // *Scientific Data.* – 2016. – Vol. 3. – Art. 160018. – DOI 10.1038/sdata.2016.18.
2. *Clausen H., Rumancev C., Bergmann U. et al.* LiberTEM: Software platform for scalable multidimensional data processing in transmission electron microscopy // *Journal of Open-Source Software.* – 2020. – Vol. 5, No. 50. – Art. 2006. – DOI 10.21105/joss.02006.
3. *Stratton W.G., Hamann J., Perepezko J.H. et al.* Aluminum nanoscale order in amorphous measured by fluctuation electron microscopy // *Applied Physics Letters.* – 2005. – Vol. 86, No. 14. – Art. 141910. – DOI 10.1063/1.1897830.
4. *Cautaerts N., Martineau C., Verbeeck J. et al.* Free, flexible and fast: Orientation mapping using the multi-core and GPU-accelerated template matching capabilities in the Python-based open source 4D-STEM analysis toolbox Pyxem // *Ultramicroscopy.* – 2022. – Vol. 237. – Art. 113517. – DOI 10.1016/j.ultramic.2022.113517.
5. *Best J.P., Nomoto K., Yang F. et al.* Advanced structural analysis of a laser additive manufactured Zr-based bulk metallic glass along the build height // *Journal of Materials Science.* – 2022. – Vol. 57. – P. 9678–9692. – DOI 10.1007/s10853-022-06991-6.
6. *Wang M., Wang Y., Islam M. et al.* Dual machine learning pinpoints the Radius of Informative Structural Environments in metallic glasses // *npj Computational Materials.* – 2026. – DOI 10.1038/s41524-026-01997-z.
7. *Vaerst O., Rösner H., Peterlechner M., Wilde G.* Local structure and dynamics of a Zr-based bulk metallic glass during ex situ and in situ annealing // *Journal of Alloys and Compounds.* – 2026. – Vol. 1051. – Art. 186051. – ISSN 0925-8388. – DOI 10.1016/j.jallcom.2026.186051.
8. *Hwang J., Voyles P.M.* Variable resolution fluctuation electron microscopy on Cu-Zr metallic glass using a wide range of coherent STEM probe size // *Microscopy and Microanalysis.* – 2011. – Vol. 17. – P. 67–74.
9. *Hwang S., Koh H., Yang J. C.* Electron Microscopy Approaches to Unraveling the Structure of Amorphous Materials // *Small Methods.* – 2026. – Vol. 10, No. 3. – Art. e01852. – DOI 10.1002/smt.202501852.
10. *Gault B., Moody M.P., Cairney J.M., Ringer S.P.* Atom probe microscopy. – Springer Science & Business Media, 2012. – DOI 10.1007/978-1-4614-3436-8.
11. *Smith B., Ashburner M., Rosse C. et al.* The OBO Foundry: coordinated evolution of ontologies to support biomedical data integration // *Nature Biotechnology.* – 2007. – Vol. 25, No. 11. – P. 1251–1255. – DOI 10.1038/nbt1346.
12. EMMO: Elementary Multiperspective Material Ontology // FAIRsharing. 2024. – URL: <https://doi.org/10.25504/FAIRsharing.1bdf3c> (data obrashcheniya: 19.03.2026). – Текст: [elektronnyj.ru](https://elektronnyj.ru).
13. *Kleshchev A.S., Artemieva I.L.* Mathematical Models of Domain Ontologies // *International Journal on Information Theory and Applications.* – 2007. – Vol. 14, No. 1. – P. 35.

14. *Kleshchev A.S., Artemieva I.L.* A Mathematical Apparatus for Domain Ontology Simulation. An Extendable Language of Applied Logic // *International Journal on Information Theory and Applications*. – 2005. – Vol. 12, No. 2. – P. 149–157.
15. *Artem'eva I.L.* Osnovannye na ontologiyah instrumental'nye i prikladnye intellektual'nye sistemy // *Znaniya – Ontologii – Teorii (ZONT-2019): materialy VII Mezhdunarodnoj konferencii*. – Novosibirsk, 2019. – S. 16–23.
16. *Gulyaeva K.A., Artemieva I.L.* Ontology Models in Intelligent System Engineering: A Case of the Knowledge-Intensive Application Domain // *Artificial Intelligence: Lecture Notes in Computer Science* / eds. G. Osipov, A. Panov, K. Yakovlev. – Cham: Springer, 2019. – Vol. 11866. – DOI 10.1007/978-3-030-33274-7\_8.
17. *Gulyaeva K.A., Artemieva I.L.* Applied Logics to Develop Ontology Model of the Complex-Structured Domains: Organic Chemistry and Biochemistry // *Biomedical Engineering and Computational Intelligence* / eds. J. Tavares, N. Dey, A. Joshi. – Cham: Springer, 2020. (Lecture Notes in Computational Vision and Biomechanics; vol. 32). – P. 103–119. – DOI 10.1007/978-3-030-21726-6\_7.
18. *Artem'eva I.L., Chusova A.E.* Razrabotka ontologii predmetnoj oblasti arhitekturnoj akustiki // *Znaniya – Ontologii – Teorii (ZONT-2023): materialy IX Mezhdunarodnoj konferencii*. – Novosibirsk, 2023. – S. 19–23.
19. *Rajamohan B.P., Bradley A.C.H., Tran V.D. et al.* Materials Data Science Ontology (MDS-Onto): Unifying Domain Knowledge in Materials and Applied Data Science // *Scientific Data*. – 2025. – Vol. 12, No. 1. – Art. 628. – DOI 10.1038/s41597-025-04938-5.
20. *Jalali M., Mail M., Aversa R., Kübel C.* MSLE: An ontology for Materials Science Laboratory Equipment // *Materials Today Communications*. – 2023. – Vol. 36. – Art. 105532. – DOI 10.1016/j.mtcomm.2023.105532.
21. *Zheng Y., Masood M.K., Seppänen O., Torma S., Aikala A.* Ontology-Based Semantic Construction Image Interpretation // *Buildings*. – 2023. – Vol. 13, No. 11. – Art. 2812. – DOI 10.3390/buildings13112812.

Статья поступила в редакцию: 16.02.2026

Received: 16.02.2026

Статья принята к публикации: 09.04.2026

Accepted: 09.04.2026