

# Цифровая экосистема OntoMath: взаимодействие семантических сервисов и математических онтологий

**А.М. Елизаров**<sup>1,2,3</sup>[0000-0003-2546-6897], **А.В. Кириллович**<sup>3</sup>[0000-0001-9680-449X],  
**Е.К. Липачёв**<sup>1,2</sup>[0000-0001-7789-2332], **О.А. Невзорова**<sup>4</sup>[0000-0001-8116-9446]

<sup>1</sup>*Институт информационных технологий и интеллектуальных систем  
Казанского федерального университета (КФУ)*

<sup>2</sup>*Институт математики и механики им. Н.И. Лобачевского КФУ*

<sup>3</sup>*Казанский филиал Межведомственного суперкомпьютерного центра  
Российской академии наук*

<sup>4</sup>*Институт вычислительной математики и информационных технологий КФУ*

**Аннотация.** Представлены новые направления развития цифровой экосистемы OntoMath, которая служит технологической основой цифровой математической библиотеки Lobachevskii DML. Одно из этих направлений связано с разработкой специализированных онтологий в области математики: представлены новые результаты в разработке онтологии профессионального математического знания OntoMath<sup>PRO</sup> и образовательной математической онтологии OntoMath<sup>Edu</sup>. Приведены также результаты в направлении создания сервисов и инструментов управления цифровыми математическими коллекциями.

**Ключевые слова:** Цифровая экосистема, Экосистема OntoMath, Онтология, OntoMath<sup>PRO</sup>, OntoMath<sup>Edu</sup>, Lobachevskii DML.

## OntoMath Digital Ecosystem: Semantic Service and Mathematical Ontologies

**A.M. Elizarov**<sup>1,2,3</sup>[0000-0003-2546-6897], **A.V. Kirillovich**<sup>3</sup>[0000-0001-9680-449X],  
**E.K. Lipachev**<sup>1,2</sup>[0000-0001-7789-2332], **O.A. Nevzorova**<sup>4</sup>[0000-0001-8116-9446]

<sup>1</sup>*Institute of Information Technologies and Intelligent Systems  
Kazan Federal University (KFU)*

<sup>2</sup>*N. I. Lobachevskii Institute of Mathematics and Mechanics KFU*

<sup>3</sup>*Joint Supercomputer Center of the Russian Academy of Sciences, Kazan, Russia*

<sup>4</sup>*Institute of Computational Mathematics and Information Technology KFU*

**Abstract.** New directions of development of the digital ecosystem OntoMath, which is the technological basis of the digital mathematical library Lobachevskii DML, are presented. One of the directions is related to the development of specialized ontologies in the field of mathematics: new results of designing the ontology of professional mathematical knowledge OntoMath<sup>PRO</sup> and educational ontology OntoMath<sup>Edu</sup> are highlighted. The results are also given in the direction of creating services and tools for managing of digital mathematical collections.

**Keywords:** Digital Ecosystem, OntoMath Ecosystem, Онтология, OntoMath<sup>PRO</sup>, OntoMath<sup>Edu</sup>, Lobachevskii DML.

## 1. Введение

Парадигма представления математических документов на основе выделения в них объектов и семантических связей между ними сформулирована в основных документах проекта Всемирной цифровой математической библиотеки (World Digital Mathematics Library – WDML) [1]. Классификация математических объектов и дальнейшее использование этих классов позволяют создать интеллектуальные программные инструменты для обработки математических документов. Наиболее заметными из них являются сервисы, связанные с извлечением и обработкой математических формул (см., например, [2–4]). Имеется также ряд подходов к реализации поиска по формулам (например, [2, 5–9]). Методы выделения в Сети объектов научного знания, активно разрабатываемые в настоящее время, позволяют создавать новые структуры математических знаний, например, графов сотрудничества, рекомендательных систем, формирующих списки «близких» документов, автоматически выполняя при этом аннотирование как документов, так и объектов, выделенных из них (например, [10–13]). Важное направление развития семантического представления научных знаний связано с разработкой онтологий предметных областей, в частности, в области математического знания (см. [14, 15]).

В работах [16, 17] представлены задачи и достигнутые результаты построения цифровой математической библиотеки Lobachevskii Digital Mathematical Library (Lobachevskii-DML, <http://www.lobachevskii-dml.ru/>). Эта цифровая библиотека через систему сформированных метаданных и семантических отношений объединяет различные электронные коллекции математических документов и предоставляет сервисы навигации по понятиям и объектам, извлеченным из этих документов. Названные сервисы базируются на цифровой экосистеме OntoMath, которая в свою очередь обеспечивает взаимодействие онтологий, инструментов текстовой аналитики и приложений для управления объектами математического знания. Эта экосистема впервые была представлена в [18], в настоящей работе описано её текущее состояние.

## 2. Архитектура цифровой экосистемы OntoMath

В публикациях по информационным технологиям термин «цифровая экосистема» встречается достаточно часто. Этот термин применяют как цифровой аналог биологических экосистем, которые используют самоорганизующиеся принципы экосистем и обладают такими свойствами, как надежность, возможность изменения и масштабируемости архитектуры, а также способность автоматически решать сложные динамические проблемы (см., например, [19]).

Цифровая экосистема OntoMath является технологической платформой цифровой математической библиотеки Lobachevskii-DML, осуществляет взаимодействие набора математических онтологий, инструментов текстовой аналитики, поисковых сервисов и приложений и предназначена для управления математическими знаниями. На рис. 1 представлена современная архитектура цифровой экосистемы OntoMath.



Рис. 1. Архитектура цифровой экосистемы OntoMath. Синим цветом обозначены онтологии, разработанные в рамках проекта OntoMath; серым цветом – внешние онтологии; зеленым цветом – платформа семантической публикации, коричневым – сервисы экосистемы. Компоненты, по уровню расположенные выше, базируются на нижестоящих

Вот перечень онтологий, включенных в состав цифровой экосистемы OntoMath:

- онтология профессиональной математики OntoMath<sup>PRO</sup> [20];
- математическая образовательная онтология OntoMath<sup>Edu</sup> [21, 22];
- онтология логической структуры математических документов Mocassin [23] (является надстройкой над онтологией SALT);
- SALT Document Ontology [24];
- АКТ Portal Ontology (<https://web.archive.org/web/20130329132430/http://www.aktors.org/ontology/>).

Опишем теперь подробнее математические онтологии цифровой экосистемы OntoMath.

**Онтология OntoMath<sup>PRO</sup>** представлена в настоящее время новой версией (<https://github.com/CLLKazan/OntoMathPro/tree/v.2>). В ней строго соблюдены онтологические различия, определенные в онтологии верхнего уровня; а математические отношения представлены как сущности первого порядка. Также поддерживаются многоязычные лексиконы Лингвистических Открытых Связанных

Данных (Linguistic Linked Open Data, LLOD), описывающие, как математические концепты выражаются в тексте на естественном языке. Концепты онтологии организованы в две основные иерархии: математических объектов и материализованных отношений (рис. 2). На основе онтологии OntoMath<sup>PRO</sup> построены семантические сервисы, описанные в разделе 3.

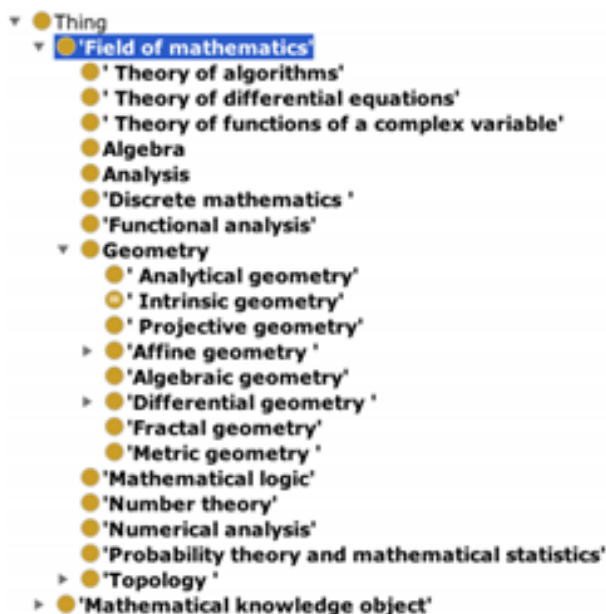


Рис. 2. Фрагмент таксономии областей математики в онтологии OntoMath<sup>PRO</sup>.

Математическая образовательная онтология OntoMath<sup>Edu</sup> является центральным компонентом разрабатываемой математической цифровой образовательной платформы, которая предназначена для решения таких задач, как: (1) автоматическое тестирование знаний; (2) автоматическая рекомендация образовательных материалов в соответствии с индивидуальным учебным планом; (3) семантическое аннотирование образовательных материалов.

### 3. Семантические сервисы цифровой экосистемы OntoMath

Разработка сервисов цифровой экосистемы выполнена на основе онтологии OntoMath<sup>PRO</sup>, которая отражает семантику математического знания. Поэтому разработанные сервисы относятся к классу семантических сервисов. В настоящее время в состав цифровой экосистемы OntoMath входят следующие сервисы:

- Платформа семантической публикации, которая принимает на вход коллекцию математических документов в формате L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X и автоматически строит их семантическое представление в виде RDF-набора, интегрированного в облако Linked Open Data (LOD). Этот набор включает: (1) метаданные документов, представленные на основе онтологии AKT Portal; (2) логическую структуру документов, представленную на основе онтологии Mocassin; (3) терминологию, представленную с помощью онтологии OntoMath<sup>PRO</sup>; (4) формулы, привязанные к терминам [25];

- Программные инструменты поиска по математическим коллекциям, включая сервис семантического поиска по математическим формулам [6];
- Рекомендательная система на основе онтологии OntoMath<sup>PRO</sup>: по содержанию документа, просматриваемого пользователем, система в интерактивном режиме формирует рекомендации, которые включают список близких документов, набор ключевых терминов и определения этих терминов из онтологии OntoMath<sup>PRO</sup>, а также других терминологических источников [11];
- Система сервисов уточнения предметных классификаторов УДК и Mathematics Subject Classification MSC2020 для математических документов.
- Рекомендательная система назначения УДК математическим статьям [26];
- Сервис семантического аннотирования, предназначенный для выделения в учебных математических текстах понятий из онтологии OntoMath<sup>Edu</sup> и связывания их ссылками на соответствующие страницы справочной базы данных [27, 28];
- Параллельный формальный/неформальный корпус образовательных математических текстов [29], который состоит из математических утверждений, извлеченных из учебных математических материалов. Каждое утверждение вручную дополнено его представлением в виде формулы в формате L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X и описанием этой формулы на языке OpenMath. В качестве контентных словарей OpenMath (OpenMath content dictionaries) использована онтология OntoMath<sup>Edu</sup>;
- Сервис автоматической генерации тестовых вопросов для проверки математических знаний [30], который базируется на образовательной онтологии OntoMath<sup>Edu</sup>;
- Фабрика метаданных цифровой библиотеки, включающая программные инструменты экстракции метаданных из документов с помощью анализа их структурных и стиливых особенностей, а также методы обработки естественного языка; сервисы уточнения метаданных и их пополнения (в случаях отсутствия обязательной информации извлечение знаний производится из внешних сетевых ресурсов); сервисы нормализации метаданных (обеспечивают их преобразование по xml-схемам агрегирующих математических библиотек [17, 31]).

## **Заключение**

Представлены новые направления развития цифровой экосистемы OntoMath, которая является технологической основой цифровой математической библиотеки Lobachevskii DML. Разработанные сервисы основаны на использовании онтологий, что позволило учитывать семантику предметной области. Сервисы цифровой экосистемы применены в практике работы редколлегий нескольких математических журналов. На основе образовательной онтологии созданы учебные курсы в системе дистанционного обучения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 21-11-00105).

## Литература

1. Developing a 21st century global library for mathematics research. Washington, D.C.: The National Academies Press, 2014. 131 p.
2. Елизаров А.М., Липачёв Е.К., Малахальцев М.А. Веб-технологии для математика: основы MathML Практическое руководство. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. 192 с.
3. Carette J., Farmer W.M., Kohlhase M., Rabe F. Big Math and the One-Brain Barrier: The Tetrapod Model of Mathematical Knowledge // *Math Intelligencer*. 2021. V. 43. P. 78–87.  
<https://doi.org/10.1007/s00283-020-10006-0>
4. Berčić K., Carette J., Farmer W.M., Kohlhase M., Dennis Müller D., Rabe F., Sharoda Y. The Space of Mathematical Software Systems – A Survey of Paradigmatic Systems // *arXiv: 2002.04955v1 [cs.MS]* 12 Feb 2020.
5. Kohlhase M., Sucan I. A Search Engine for Mathematical Formulae // In: Calmet J., Ida T., Wang D. (Eds.) *Artificial Intelligence and Symbolic Computation. AISC 2006. Lecture Notes in Computer Science*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2006. V. 4120. P. 241–253.  
[https://doi.org/10.1007/11856290\\_21](https://doi.org/10.1007/11856290_21)
6. Elizarov A., Kirillovich A., Lipachev E., Nevzorova O. Semantic Formula Search in Digital Mathematical Libraries // *Proceedings of the 2nd Russia and Pacific Conference on Computer Technology and Applications (RPC 2017)*. IEEE, 2017. P. 39–43. <https://doi.org/10.1109/RPC.2017.8168063>
7. Wolfram MathWorld Site. <https://mathworld.wolfram.com/>
8. SearchOnMath Site. <https://www.searchonmath.com/>
9. Guidi F., Sacerdoti Coen C. A Survey on Retrieval of Mathematical Knowledge // *Math. Comput. Sci.* 2016. V. 10. P. 409–427.  
<https://doi.org/10.1007/s11786-016-0274-0>
10. Печников А.А., Чебуков Д.Е. Сравнение графов сотрудничества учёных (на примере MathNet.Ru) // *Научный сервис в сети Интернет: труды XXII Всероссийской научной конференции (21–25 сентября 2020 г.)*. М.: ИПМ им. М.В. Келдыша, 2020. С. 527–538. <https://doi.org/10.20948/abrau-2020-2>
11. Елизаров А.М., Жижченко А.Б., Жильцов Н.Г., Кириллович А.В., Липачёв Е.К. Онтологии математического знания и рекомендательная система для коллекций физико-математических документов // *Докл. РАН*. 2016. Т. 467, № 4. С. 392–395. <https://doi.org/10.7868/S0869565216100042>
12. Елизаров А.М., Жильцов Н.Г., Кириллович А.В., Липачёв Е.К. Семантическое аннотирование в системе управления физико-математическим контентом // *Научный сервис в сети Интернет: труды XVII Всероссийской научной конференции (21–26 сентября 2015 г., г. Новороссийск)*. М.: ИПМ им. М.В. Келдыша, 2015. С. 98–103.
13. Козицын А.С., Афонин С.А., Шачнев Д.А. Определение тематической близости научных журналов и конференций с использованием анализа

- графа соавторства // Электронные библиотеки. 2020. Т. 23, № 3. С. 514–525. <https://doi.org/10.26907/1562-5419-2020-23-3-514-525>
14. Lange Ch. Ontologies and Languages for Representing Mathematical Knowledge on the Semantic Web // *Semantic Web Journal*. 2013. V. 4, No. 2. P. 119–158. <https://doi.org/10.3233/SW-2012-0059>
  15. Elizarov A., Kirillovich A., Lipachev E., Nevzorova O., Solovyev V., Zhiltsov N. Mathematical Knowledge Representation: Semantic Models and Formalisms // *Lobachevskii J. of Mathematics*. 2014. V. 35, No. 4. P. 347–353. <https://doi.org/10.1134/S1995080214040143>
  16. Elizarov A.M., Lipachev E.K. Lobachevskii DML: Towards a Semantic Digital Mathematical Library of Kazan University // *CEUR Workshop Proceedings*. 2017. V. 2022. P. 326–333.
  17. Гафурова П.О., Елизаров А.М., Липачёв Е.К. Базовые сервисы фабрики метаданных цифровой математической библиотеки Lobachevskii-DML // *Электронные библиотеки*. 2020. Т. 23, № 3. С. 336–381. <https://doi.org/10.26907/1562-5419-2020-23-3-336-381>
  18. Elizarov A., Kirillovich A., Lipachev E., Nevzorova O. Digital Ecosystem OntoMath: Mathematical Knowledge Analytics and Management // *Communications in Computer and Information Science*. Springer, Cham, 2017. V. 706. P. 33–46. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-57135-5\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-319-57135-5_3)
  19. Briscoe G., De Wilde P. Digital Ecosystems: Evolving Service-Oriented Architectures // *arXiv: 0712.4102*. 2007. <https://doi.org/10.48550/arXiv.0712.4102>
  20. Nevzorova O., Zhiltsov N., Kirillovich A., Lipachev E. OntoMath<sup>PRO</sup> ontology: a linked data hub for mathematics // In: Klinov, P., Mouromstev, D. (Eds.) *KESW 2014. Communications in Computer and Information Science*. Springer, Cham, 2014. V. 468. P. 105–119. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-11716-4\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-319-11716-4_9)
  21. Kirillovich A., Nevzorova O., Falileeva M., Lipachev E., Shakirova L. OntoMath<sup>Edu</sup>: Towards an Educational Mathematical Ontology // *CEUR Workshop Proceedings*. 2020. V. 2634.
  22. Kirillovich A., Nevzorova O., Falileeva M., Lipachev E., and Shakirova L. OntoMath<sup>Edu</sup>: a Linguistically Grounded Educational Mathematical Ontology // In: Benz Müller C. and Miller B. (Eds.) *CICM 2020. Lecture Notes in Computer Science*. Springer, 2020. V. 12236. P. 157–172. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-53518-6\\_10](https://doi.org/10.1007/978-3-030-53518-6_10)
  23. Solovyev V., Zhiltsov N. Logical structure analysis of scientific publications in mathematics // In: Akerkar, R. (Ed.) *Proceedings of the International Conference on Web Intelligence, Mining and Semantics (WIMS 2011)*. ACM DL. 2011. V. 21. P. 1–9. <https://doi.org/10.1145/1988688.1988713>
  24. Groza T., Handschuh S., Möller K., Decker S. SALT – Semantically Annotated Latex for Scientific Publications // In: Franconi, E., Kifer, M., May, W. (Eds.)

- ESWC 2007. Lecture Notes in Computer Science. Springer, Heidelberg, 2007. V. 4519. P. 518–532.
25. Nevzorova O., Zhiltsov N., Zaikin D., Zhibrik O., Kirillovich A., Nevzorov V., Birialtsev E. Bringing math to LOD: a semantic publishing platform prototype for scientific collections in mathematics // In: Alani, H., et al. (Eds.) ISWC 2013. Lecture Notes in Computer Science. Springer, Heidelberg, 2013. V. 8218. P. 379–394.  
[https://doi.org/10.1007/978-3-642-41335-3\\_24](https://doi.org/10.1007/978-3-642-41335-3_24)
26. Nevzorova O., Almukhametov D. Towards a Recommender System for the Choice of UDC Code for Mathematical Articles // CEUR Workshop Proceedings. 2021. V. 3036. P. 54–62.
27. Николаев К.С., Невзорова О.А. Метод автоматической семантической разметки математических образовательных текстов // Информационные технологии в образовании и науке (ИТОН–2022) и II International Workshop “Digital Technologies for Teaching and Learning (DTTL)”: материалы III Международного форума по математическому образованию, IFME’2022 (Казань, 28 марта – 2 апреля 2022 г.). Казань: Изд-во Казанского университета, 2022.
28. Kirillovich A., Falileeva M., Nevzorova O., Lipachev E., Dyupina A., Shakirova L. Prerequisite Relationships of the OntoMathEdu Educational Mathematical Ontology. In: J.C. Figueroa-García, et al. (Eds.) Proceedings of the 7th Workshop on Engineering Applications (WEA 2020). Communications in Computer and Information Science, Springer, 2021. P. 517–524.  
[https://doi.org/10.1007/978-3-030-86702-7\\_44](https://doi.org/10.1007/978-3-030-86702-7_44)
29. Kirillovich A., Nevzorova O., Nikolaev K., Galiaskarova K. Towards a Parallel Informal-Formal Corpus of Educational Mathematical Texts in Russian // In: Zhengbing Hu, et al (Eds.). Proceedings of the 2019 International Symposium on Computer Science, Digital Economy and Intelligent Systems (CSDEIS 2019). Advances in Intelligent Systems and Computing, Springer, 2020. V. 1127. P. 325–334. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-39216-1\\_29](https://doi.org/10.1007/978-3-030-39216-1_29)
30. Nikolaev K., Kirillovich A., Nevzorova O. A Corpus-Based Approach to Elementary Geometry Knowledge Test Generation // In: L. Gómez Chova, et al. (Eds.). Proceedings of the 14th International Technology, Education and Development Conference (INTED 2020), IATED, 2020. P. 6342–6348. <https://doi.org/10.21125/inted.2020.1710>
31. Elizarov A., Lipachev E. Digital library metadata factories // CEUR Workshop Proceedings. 2021. V. 2813. P. 13–21.

## References

1. Developing a 21st century global library for mathematics research. Washington, D.C.: The National Academies Press, 2014. 131 p.



2. Elizarov A.M., Lipachev E.K., Malaxal`cev M.A. Veb-texnologii dlya matematika: osnovy` MathML Prakticheskoe rukovodstvo. M.: FIZMATLIT, 2010. 192 s.
3. Carette J., Farmer W.M., Kohlhase M., Rabe F. Big Math and the One-Brain Barrier: The Tetrapod Model of Mathematical Knowledge // Math Intelligencer. 2021. V. 43. P. 78–87.  
<https://doi.org/10.1007/s00283-020-10006-0>
4. Berčić K, Carette J., Farmer W.M., Kohlhase M., Dennis Müller D., Rabe F., Sharoda Y. The Space of Mathematical Software Systems – A Survey of Paradigmatic Systems // arXiv: 2002.04955v1 [cs.MS] 12 Feb 2020.
5. Kohlhase M., Sucan I. A Search Engine for Mathematical Formulae // In: Calmet J., Ida T., Wang D. (Eds.) Artificial Intelligence and Symbolic Computation. AISC 2006. Lecture Notes in Computer Science. Springer, Berlin, Heidelberg, 2006. V. 4120. P. 241–253.  
[https://doi.org/10.1007/11856290\\_21](https://doi.org/10.1007/11856290_21)
6. Elizarov A., Kirillovich A., Lipachev E., Nevzorova O. Semantic Formula Search in Digital Mathematical Libraries // Proceedings of the 2nd Russia and Pacific Conference on Computer Technology and Applications (RPC 2017). IEEE, 2017. P. 39–43. <https://doi.org/10.1109/RPC.2017.8168063>
7. Wolfram MathWorld Site. <https://mathworld.wolfram.com/>
8. SearchOnMath Site. <https://www.searchonmath.com/>
9. Guidi F., Sacerdoti Coen C. A Survey on Retrieval of Mathematical Knowledge // Math. Comput. Sci. 2016. V. 10. P. 409–427.  
<https://doi.org/10.1007/s11786-016-0274-0>
10. Pechnikov A.A., Chebukov D.E. Comparison of scientific collaboration graphs: Math-Net.Ru as a case study // Nauchnyi servis v seti Internet: trudy XXII Vserossijskoj nauchnoj konferencii (21–25 sent. 2020 g.). M.: IPM im. M.V. Keldysha, 2020. S. 527–538. <https://doi.org/10.20948/abrau-2020-2>
11. Elizarov A.M., Zhizhchenko A.B., Zhil'tsov N.G., Kirillovich A.V., and Lipachev E.K.: Mathematical Knowledge Ontologies and Recommender Systems for Collections of Documents in Physics and Mathematics // Doklady Mathematics. 2016. V. 93 (2). P. 231–233.  
<https://doi.org/10.1134/S1064562416020174>
12. Elizarov A.M., Zhil`czov N.G., Kirillovich A.V., Lipachev E.K. Semanticheskoe annotirovanie v sisteme upravleniya fiziko-matematicheskim kontentom // Nauchnyi servis v seti Internet: trudy XVII Vserossijskoj nauchnoj konferencii (21–26 sentyabrya 2015 g., g. Novorossijsk). M.: IPM im. M.V. Keldysha, 2015. S. 98–103.
13. Kozicyn A.S., Afonin S.A., Shachnev D.A. Opredelenie tematicheskoy blizosti nauchny`x zhurnalov i konferencij s ispol`zovaniem analiza grafa soavtorstva // Russian Digital Libraries Journal. 2020. T. 23, № 3. S. 514–525.  
<https://doi.org/10.26907/1562-5419-2020-23-3-514-525>

14. Lange Ch. Ontologies and Languages for Representing Mathematical Knowledge on the Semantic Web // *Semantic Web Journal*. 2013. V. 4, No. 2. P. 119–158. <https://doi.org/10.3233/SW-2012-0059>
15. Elizarov A., Kirillovich A., Lipachev E., Nevzorova O., Solovyev V., Zhiltsov N. Mathematical Knowledge Representation: Semantic Models and Formalisms // *Lobachevskii J. of Mathematics*. 2014. V. 35, No. 4. P. 347–353. <https://doi.org/10.1134/S1995080214040143>
16. Elizarov A.M., Lipachev E.K. Lobachevskii DML: Towards a Semantic Digital Mathematical Library of Kazan University // *CEUR Workshop Proceedings*. 2017. V. 2022. P. 326–333.
17. Gafurova P.O., Elizarov A.M., Lipachev E.K. Basic Services of Factory Metadata Digital Mathematical Library Lobachevskii-DML // *Russian Digital Library Journal*. 2020. V. 23 (3). P. 336–381. <https://doi.org/10.26907/1562-5419-2020-23-3-336-381>
18. Elizarov A., Kirillovich A., Lipachev E., Nevzorova O. Digital Ecosystem OntoMath: Mathematical Knowledge Analytics and Management // *Communications in Computer and Information Science*. Springer, Cham, 2017. V. 706. P. 33–46. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-57135-5\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-319-57135-5_3)
19. Briscoe G., De Wilde P. Digital Ecosystems: Evolving Service-Oriented Architectures // *arXiv: 0712.4102*. 2007. <https://doi.org/10.48550/arXiv.0712.4102>
20. Nevzorova O., Zhiltsov N., Kirillovich A., Lipachev E. OntoMath<sup>PRO</sup> ontology: a linked data hub for mathematics // In: Klinov, P., Mouromstev, D. (Eds.) *KESW 2014. Communications in Computer and Information Science*. Springer, Cham, 2014. V. 468. P. 105–119. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-11716-4\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-319-11716-4_9)
21. Kirillovich A., Nevzorova O., Falileeva M., Lipachev E., Shakirova L. OntoMath<sup>Edu</sup>: Towards an Educational Mathematical Ontology // *CEUR Workshop Proceedings*. 2020. V. 2634.
22. Kirillovich A., Nevzorova O., Falileeva M., Lipachev E., and Shakirova L. OntoMath<sup>Edu</sup>: a Linguistically Grounded Educational Mathematical Ontology // In: Benzmüller C. and Miller B. (Eds.) *CICM 2020. Lecture Notes in Computer Science*. Springer, 2020. V. 12236. P. 157–172. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-53518-6\\_10](https://doi.org/10.1007/978-3-030-53518-6_10)
23. Solovyev V., Zhiltsov N. Logical structure analysis of scientific publications in mathematics // In: Akerkar, R. (Ed.) *Proceedings of the International Conference on Web Intelligence, Mining and Semantics (WIMS 2011)*. ACM DL. 2011. V. 21. P. 1–9. <https://doi.org/10.1145/1988688.1988713>
24. Groza T., Handschuh S., Möller K., Decker S. SALT – Semantically Annotated Latex for Scientific Publications // In: Franconi, E., Kifer, M., May, W. (Eds.) *ESWC 2007. Lecture Notes in Computer Science*. Springer, Heidelberg, 2007. V. 4519. P. 518–532.

25. Nevzorova O., Zhiltsov N., Zaikin D., Zhibrik O., Kirillovich A., Nevzorov V., Birialtsev E. Bringing math to LOD: a semantic publishing platform prototype for scientific collections in mathematics // In: Alani, H., et al. (Eds.) ISWC 2013. Lecture Notes in Computer Science. Springer, Heidelberg, 2013. V. 8218. P. 379–394.  
[https://doi.org/10.1007/978-3-642-41335-3\\_24](https://doi.org/10.1007/978-3-642-41335-3_24)
26. Nevzorova O., Almukhametov D. Towards a Recommender System for the Choice of UDC Code for Mathematical Articles // CEUR Workshop Proceedings. 2021. V. 3036. P. 54–62.
27. Nikolaev K.S., Nevzorova O.A. Metod avtomaticheskoy semanticheskoy razmetki matematicheskix obrazovatel`nyx tekstov // Informacionnye texnologii v obrazovanii i nauke (ITON–2022) i II International Workshop “Digital Technologies for Teaching and Learning”: materialy` III Mezhd. foruma po matem. obrazovaniyu, IFME’2022 (Kazan`, 28 marta – 2 aprelya 2022 g.). Kazan: Izd-vo Kazanskogo universiteta, 2022.
28. Kirillovich A., Falileeva M., Nevzorova O., Lipachev E., Dyupina A., Shakirova L. Prerequisite Relationships of the OntoMathEdu Educational Mathematical Ontology. In: J.C. Figueroa-García, et al. (Eds.) Proceedings of the 7th Workshop on Engineering Applications (WEA 2020). Communications in Computer and Information Science, Springer, 2021. P. 517–524.  
[https://doi.org/10.1007/978-3-030-86702-7\\_44](https://doi.org/10.1007/978-3-030-86702-7_44)
29. Kirillovich A., Nevzorova O., Nikolaev K., Galiaskarova K. Towards a Parallel Informal-Formal Corpus of Educational Mathematical Texts in Russian // In: Zhengbing Hu, et al (Eds.). Proceedings of the 2019 International Symposium on Computer Science, Digital Economy and Intelligent Systems (CSDEIS 2019). Advances in Intelligent Systems and Computing, Springer, 2020. V. 1127. P. 325–334. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-39216-1\\_29](https://doi.org/10.1007/978-3-030-39216-1_29)
30. Nikolaev K., Kirillovich A., Nevzorova O. A Corpus-Based Approach to Elementary Geometry Knowledge Test Generation // In: L. Gómez Chova, et al. (Eds.). Proceedings of the 14th International Technology, Education and Development Conference (INTED 2020), IATED, 2020. P. 6342–6348. <https://doi.org/10.21125/inted.2020.1710>
31. Elizarov A., Lipachev E. Digital library metadata factories // CEUR Workshop Proceedings. 2021. V. 2813. P. 13–21.