

Открытые связанные данные и онтологии в математическом образовании

А.М. Елизаров^{1,2}, А.В. Кириллович², Е.К. Липачёв²,
О.А. Невзорова³, Л.Р. Шакирова²

¹ Высшая школа информационных технологий и информационных систем,

² Институт математики и механики им. Н.И. Лобачевского
Казанского (Приволжского) федерального университета,

³ Институт прикладной семиотики Академии наук Республики Татарстан

Аннотация. Дан обзор применения онтологий и открытых связанных данных в образовательной деятельности. Описаны модели семантического представления математического знания и предложен подход к их применению в математическом образовании. Разработаны методы построения цифровой математической обучающей среды на основе онтологического подхода и моделей открытых связанных данных (Linked Open Data). Для компьютерной обработки учебных текстов разработано семантическое аннотирование учебных материалов, разметка текстов понятиями из онтологии, ссылками на формулы из хранилища формул с помощью специализированного поискового модуля. Предложены автоматизированные методы комплексного усвоения математических знаний для различных категорий обучающихся, включающего возможность автоматизированного тестирования, а также программные инструменты, реализующие эти методы. Разработка названных методов привела к необходимости создания новой образовательной математической онтологии, прототип которой представлен в работе. Проектирование онтологии OntoMathEdu проведено на основе разработанной нами ранее онтологии OntoMathPRO. Создана новая концептуализация, отражающая понятийную систему математики, которая соответствует школьному образованию. Проведена адаптация профессиональной терминологии к образовательной деятельности, в частности, к языку школьной математики. В OntoMathEdu добавлены отношения, отражающие дидактическую зависимость между понятиями. Концепты онтологии содержат их наименования на английском, русском и татарском языках, а также основные определения, отношения с другими концептами онтологии (ассоциативные отношения) и связи с концептами из внешних наборов данных. Онтология OntoMathEdu строится на наборе базовых отношений онтологии OntoMathPRO, таких, как таксономическое отношение (ISA); отношение между математическим объектом и областью математики; отношение между математическими объектами «определяется с помощью»; отношение между задачей и методом ее решения; введен также новый набор дидактических отношений.

Ключевые слова: математическое образование, семантические информационно-коммуникационные технологии, онтологии, открытые связанные данные.

Open Linked Data and Ontologies in Mathematics Education

A.M. Elizarov^{1,2}, A.V. Kirillovich², E.K. Lipachev²,
O.A. Nevzorova³, L.R. Shakirova²

¹ *Higher School of Information Technologies and Intelligent Systems,*

² *N.I. Lobachevskii Institute of Mathematics and Mechanics
Kazan (Volga Region) Federal University,*

³ *Research Institute of Applied Semiotics of Tatarstan Academy of Sciences*

Abstract. A review of the application of ontologies and open related data in educational activities is given. The models of semantic representation of mathematical knowledge are described and the approach to their application in mathematical education is offered. Methods for constructing a digital mathematical learning environment based on the ontological approach and models of Linked Open Data (LOD) are developed. For computer processing of educational texts, semantic annotation of teaching materials, marking of texts by concepts from ontology, links to formulas from the repository of formulas with the help of a specialized search module was developed. Automated methods of complex assimilation of mathematical knowledge for various categories of students, including the possibility of automated testing, as well as software tools that implement these methods are proposed. The development of these methods led to the need to create a new educational mathematical ontology, the prototype of which is presented in the work. OntoMathEdu ontology was designed on the basis of OntoMathPRO ontology developed earlier. A new conceptualization has been created, reflecting the conceptual system of mathematics, which corresponds to school education. Adaptation of professional terminology to educational activity, in particular, to the language of school mathematics was carried out. OntoMathEdu added a relationship that reflects the didactic relationship between concepts. Ontology concepts contain their names in English, Russian and Tatar, as well as basic definitions, relationships with other concepts of ontology (associative relations), and links to concepts from external data sets. Ontology OntoMathEdu is built on a set of basic OntoMathPRO ontology relationships, such as the taxonomic relationship (ISA); the relation between the mathematical object and the field of mathematics; the relation between mathematical objects is "determined by means of"; the relationship between the task and the method of solving it; A new set of didactic relations was also introduced.

Keywords: mathematics education, semantic information and communication technologies, ontologies, open linked data.

Введение

Современное образование стремительно изменяется, включая в свой арсенал новые образовательные технологии и методы обучения. На базе семантических информационно-коммуникационных технологий (ИКТ) ученые и педагоги создают новые инструменты и начинают активно применять их в образо-

вательных приложениях. Ведущим трендом внедрения ИКТ в процессы образования является разработка семантических методов, основанных на использовании предметных онтологий и моделей открытых связанных данных (Linked Open Data – LOD) [1, 2].

Усилия математического сообщества направлены на создание новых подходов, моделей и методов формализации математического знания, применения современных ИКТ для автоматизации научной, образовательной и издательской деятельности, поэтому глобальный интерес к разработке комплексного подхода в математическом образовании на основе ИКТ вполне закономерен. Названные подходы уже зарекомендовали себя во многих областях знания, но в области математического образования они еще не представлены. Поэтому разработка соответствующих методов для математического образования является актуальной.

1. Открытые связанные данные в математическом образовании

Технологии открытых связанных данных применяются в образовательной деятельности, начиная с 2000-х годов, обзор соответствующих результатов представлен в [3, 4]. В настоящее время по технологии LOD сформированы метаданные открытых образовательных ресурсов, статистические данные об образовательном секторе, метаданные видео-лекций и данные об учебных курсах, исследованиях и экспертах (см. [4]). Сбор и каталогизация соответствующих наборов данных выполнены в рамках таких инициатив, как LinkedUp Data Catalog [5].

Интерес образовательного сообщества к технологиям LOD подтверждается ростом объема образовательных ресурсов, опубликованных в этом формате (см., например, <http://lod-cloud.net/>). Обсуждение названной тематики проводится в рамках специализированных международных научных конференций, таких, как Learning & Education with Web Data (LILE) [6–12]. Отметим также инициативу LinkedUp project, направленную на адаптацию открытых связанных данных для их использования в образовательной деятельности [13].

Основные направления исследований, проводимых в области использования LOD в образовании, связаны с моделированием образовательного процесса, образовательных курсов и учебных материалов, а также содержания предметной области (например, геометрии, математического анализа и др.), ее основных понятий и связей между ними [14, 15]. Примером образовательной платформы, построенной на базе технологий LOD, является Enhanced Course Ontology for Linked Education (ECOLE) [16]. Другие примеры использования семантических ИКТ для создания многоуровневых и гибких учебных материалов – это система SlideWiki [17] и онтология Teaching Core Vocabulary (TEACH, <http://linkedscience.org/teach/ns/>). К этой же сфере исследований относятся следующие проекты: Achievement Standards Network – набор данных о стандартах овладения материалом (<http://achievementstandards.org/>); Bowlogna Ontology – онтология образовательного процесса, организованного в соответствии с Болонской

конвенцией (<http://diuf.unifr.ch/main/xi/bowlogna>); ReSIST Courseware Ontology – онтология для описания образовательных курсов (<https://bartoc.org/en/node/17886>); Meducator Linked Open Educational Resources – каталог открытых связанных данных об открытых образовательных ресурсах (<http://linkededucation.org/meducator>); Springer Nature SciGraph Data Explorer – платформа открытых связанных данных издательства Springer-Nature (<http://scigraph.springernature.com/explorer>); Discourse Relationships Vocabulary – онтология для формализации академических дискуссий (<http://linda.epu.ntua.gr/vocabulary/2036/discourse-relationships-vocabulary>); Academic Institution Internal Structure Ontology (AIISO) – онтология для моделирования структуры научных организаций (<http://vocab.org/aiiso/>).

Подходы, охарактеризованные выше, успешно зарекомендовали себя во многих областях знания, но в математическом образовании еще нет. Поэтому разработка соответствующих решений для математического образования является актуальной задачей.

2. Применение онтологий в математическом образовании

В настоящее время для формализации представления математического знания создаются специализированные онтологии (см., например, [18]), которые представляют предметные знания в хорошо развитых онтологических формализмах. Одним из новых подходов является использование онтологий на различных этапах образовательного процесса. На их основе можно выполнить семантическое аннотирование учебных материалов с целью выделения наиболее важных объектов учебного курса и построения предметных баз знаний. На уровне использования математического знания онтологии можно применить для индивидуализации обучающего процесса, в том числе, автоматического подбора и формирования рекомендаций по изучению учебного материала в соответствии с персональным профилем обучающегося. На уровне усвоения математического знания онтологии могут быть использованы для системного тестирования полученных знаний, проверки целостности фрагмента предметной области, представленной в образовательном модуле.

В [19] исследованы возможности применения онтологий в обучении геометрии методом проблемного изложения, когда обучаемые занимаются активным поиском, изучением, выдвижением гипотез и их проверкой. В [20] онтологии применены в качестве инструментов для построения, обобщения и оценки математических знаний, а также описания знаний в соответствии со структурой системы образования. В [21] представлена методология пополнения онтологии Math-Bridge для автоматизированного генерирования математических упражнений. Для этой цели созданы соответствующие лексические и синтаксические шаблоны. В [22] предложен подход к применению семантических технологий в математическом образовании, разработан программный прототип системы тестирования математических знаний различных категорий обучающихся в Ка-

занском федеральном университете (КФУ) и обоснована необходимость разработки новой образовательной математической онтологии.

В семантическом вебе представлены различные онтологии, применимые для математического образования. Укажем основные из них.

Онтология ScienceWISE [23, 24] используется для семантической разметки научных публикаций из ArXiv.org, извлечения из них метаданных и их интеграции в облако LOD.

Онтология логической структуры математических документов Mocassin описывает семантику структурных элементов математических документов (например, теоремы, леммы, доказательства, определения и т. д.) и связи между ними [25].

Онтология математического знания OntoMathPRO содержит две таксономии математических концептов (таксономию областей математики и таксономию математических объектов) и четыре отношения: отношение между математическим объектом и областью математики («*принадлежит к (belong to)*»); отношение между математическими объектами («*определяет (defines)*»); отношение между методом и задачей («*решает (solves)*»), а также отношение между математическими объектами («*смотри также (see also)*» [26–28]. Отметим, что онтология OntologyMathPRO ориентирована на профессиональную математику и используется в приложениях, связанных с компьютерной обработкой научных статей из математических журналов.

Для полноценной реализации предложенного подхода в образовательной сфере существующих онтологий недостаточно: указанные онтологии ориентированы на профессиональную математику и не отражают образовательный аспект. В связи с этим возникает необходимость в создании новой образовательной математической онтологии.

3. Образовательная онтология математического знания

Для системного описания математических знаний образовательного курса математики нами разрабатывается OntoMathEdu – онтология математического знания, ориентированная на учебный процесс. Метод проектирования этой онтологии состоит в следующем: основой для ее разработки является онтология OntoMathPRO. Онтология OntoMathEdu строится на наборе базовых отношений онтологии OntoMathPRO, таких, как таксономическое отношение (ISA); отношение между математическим объектом и областью математики; отношение между математическими объектами «определяется с помощью»; отношение между задачей и методом ее решения; введен также новый набор дидактических отношений. Концепты онтологии содержат их наименования на английском, русском и татарском языках, а также основные дефиниции, отношения с другими концептами онтологии (ассоциативные отношения) и связи с концептами из внешних наборов данных.

Проектирование онтологии OntoMathEdu на основе OntoMathPRO предусматривает:

- адаптацию профессиональной терминологии к образовательной деятельности, в частности, к языку школьной математики (например, вместо термина «коммутативность умножения» нужно использовать термин «переместительный закон сложения»);

- пополнение онтологии понятиями из разделов школьной математики;

- установление дидактических связей между понятиями: в *OntoMathEdu* добавлены отношения, отражающие дидактическую зависимость между понятиями (например, эти отношения отражают тот факт, что для изучения некоторого понятия нужно сначала изучить некоторые другие понятия);

- создание новой концептуализации, отражающей понятийную систему математики, которая соответствует школьному образованию (концептуализации школьной и профессиональной математики имеют существенные отличия, например, в школьной математике понятие «число» является базовым, а в профессиональной математике оно определено как подвид множества).

Источником понятий для онтологии *OntoMathEdu* являются учебники из образовательного комплекта Научной библиотеки им. Н.И. Лобачевского КФУ, а также имеющиеся методические руководства.

Как было указано выше, новый подход предусматривает разработку комплекса программных инструментов для семантического аннотирования электронных учебных текстов по школьной математике. Тексты учебных материалов будут размечены понятиями из онтологии *OntoMathEdu* и ссылками на формулы из хранилища формул, подготовленного на основе компьютерной обработки учебных материалов. Для поиска формул в хранилище использован специализированный поисковый модуль. Хранилище формул также может быть использовано для разработки новых учебных инструментов, например, генератора экземпляров формул для учебных задач и проведения тестирования.

Таким образом, подход, связанный с применением онтологий в математическом образовании, будет апробирован в КФУ и Лицеях при КФУ в рамках дисциплин математического цикла на разных уровнях образовательного процесса (уровни средней и высшей школы).

Заключение

Работа выполнена за счет средств субсидии, выделенной Казанскому федеральному университету для выполнения государственного задания в сфере научной деятельности, проект 1.2368.2017/ПЧ, и при частичной финансовой поддержке РФФИ и Правительства Республики Татарстан в рамках научного проекта № 18-47-160007.

Литература

1. LinkingOpenData. W3C SWEO Community Project. URL: <https://www.w3.org/wiki/SweoIG/TaskForces/CommunityProjects/LinkingOpenData>.

2. Berners-Lee T. Linked Data – Design Issues, 2009. URL: <http://www.w3.org/DesignIssues/LinkedData.html>.
3. D’Aquin M. On the Use of Linked Open Data in Education: Current and Future Practices // In: Mouromtsev D. and D’Aquin M. (Eds.). Open Data for Education. Lecture Notes in Computer Science. – 2016. – Vol. 9500. – P. 3–15. https://doi.org/10.1007/978-3-319-30493-9_1.
4. Taibi D., Fulantelli G., Dietze S., and Fetahu B. Educational Linked Data on the Web – Exploring and Analysing the Scope and Coverage // In: Mouromtsev D. and D’Aquin M. (Eds.). Open Data for Education. Lecture Notes in Computer Science. – 2016. – Vol. 9500. – P. 16–37. https://doi.org/10.1007/978-3-319-30493-9_2.
5. D’Aquin M., Alessandro Adamou A., Dietze S., and Fetahu B. The LinkedUp Data Catalogue: A Meta-Dataset of Linked Datasets in the Education Domain // Semantic Web – Interoperability, Usability, Applicability. 2014. URL: <http://www.semantic-web-journal.net/content/linkededup-data-catalogue-meta-dataset-linked-datasets-education-domain>.
6. Proceedings of Linked Learning 2011: The 1st Int. Workshop on eLearning Approaches for the Linked Data Age, Heraklion, Greece, May 29, 2011. CEUR-WS, 2011. URL: <http://ceur-ws.org/Vol-717/>.
7. Proceedings of the 2nd Int. Workshop on Learning and Education with the Web of Data (LiLe-2012 at WWW-2012), Lyon, France, April 17, 2012. CEUR-WS, 2012. URL: <http://ceur-ws.org/Vol-840/>.
8. Proceedings of the IW3C2 WWW 2013 Conference, May 13–17, 2013, Rio de Janeiro, Brazil. IW3C2 2013.
9. Proceedings of the Linked Learning meets LinkedUp Workshop: Learning and Education with the Web of Data (LILE 2014), Riva del Garda, Italy, October 20, 2014. CEUR-WS, 2011. URL: <http://ceur-ws.org/Vol-1254/>.
10. LILE2015 – Learning & Education with the Web of Data. Collocated with WWW2015, 19 May, Florence, Italy. URL: <http://lile.linkededucation.org/2015>. Proceedings of the 24th Int. Conf. on World Wide Web (WWW2015), Florence, Italy, May 18–22, 2015.
11. LILE2016 – Learning & Education with the Web of Data – collocated with WWW2016, 11 April, Montreal, Canada. URL: <http://lile.linkededucation.org/2016>. Proceedings of the 25th Int. Conf. Companion on World Wide Web (WWW '16), Montreal, Canada, April 11–15, 2016.
12. LILE2018 – Learning & Education with Web Data. URL: <http://lile.linkededucation.org/2018>.
13. Guy M., D’Aquin M., Dietze S., Drachsler H., Herder E. and Parodi E. Linkedup: Linking Open Data for Education // Ariadne. – 2014. – Vol. 72. URL: <http://www.ariadne.ac.uk/issue72/guy-et-al>.
14. Al-Hunaiyyan A., Bimba A.T., Idris N., and Al-Sharhan S. A Cognitive Knowledge-Based Framework for Social and Metacognitive Support in Mobile

- Learning // *Interdisciplinary J. of Information, Knowledge, and Management*. – 2017. – Vol. 12. – P. 75–98.
15. Dockendorff M., and Solar H. ICT Integration in Mathematics Initial Teacher Training and its Impact on Visualization: The case of GeoGebra // *Int. J. of Mathematical Education in Science and Technology*. – 2017. – P. 1–19.
 16. Vasiliev V., Kozlov F., Mouromtsev D., Stafeev S., and Parkhimovich O. ECOLE: An Ontology-Based Open Online Course Platform // In: Mouromtsev D. and D'Aquin M. (Eds.). *Open Data for Education. Lecture Notes in Computer Science*. – 2016. – Vol. 9500. P. 41–66. https://doi.org/10.1007/978-3-319-30493-9_3.
 17. Khalili A., Auer S., Tarasowa D., and Ermilov I. Slidewiki: elicitation and sharing of corporate knowledge using presentations. In: ten Teije A., Volker J., Handschuh S., Stuckenschmidt H., d'Acquin M., Nikolov A., Aussenac-Gilles N., Hernandez N. (eds.) *EKA W 2012. Lecture Notes in Computer Science*. – 2012. – Vol. 7603. – P. 302–316.
 18. Elizarov A.M., Kirillovich A.V., Lipachev E.K., Nevzorova O.A., Solovyev V.D., and Zhiltsov N.G. Mathematical Knowledge Representation: Semantic Models and Formalisms // *Lobachevskii J. of Mathematics*. – 2014. – V. 35, No 4. – P. 348–354. <https://doi.org/10.1134/S1995080214040143>.
 19. Tzoumpa D., Karvounidis T., Douligeris C. Towards an Ontology Approach in Teaching Geometry // Auer M.E. et al. (Eds.), *Interactive Collaborative Learning. Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2017. – Vol. 545. – P. 198–209. https://doi.org/10.1007/978-3-319-50340-0_16.
 20. Dicheva D., Sosnovsky S., Gavrilova T., and Brusilovsky P. Ontological web portal for educational ontologies // *Int. J. Inf. Theor. Appl.* – 2004. – Vol. 13 (4). – P. 303–308.
 21. Lmati I., Benlahmar H., and Achtaich N. Enrichment and Population of an Educational Ontology from a Corpus of Mathematical Analysis // *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*. – 2015. – Vol. 82. – P. 194–205.
 22. Елизаров А.М., Кириллович А.В., Липачёв Е.К., Невзорова О.А., Шакирова Л.Р. Семантические технологии в математическом образовании: онтологии и открытые связанные данные // *Ученые записки ИСГЗ*. – 2018. – Вып. 1 (16). – С. 222–227.
 23. Aberer K., Boyarsky A., Cudré-Mauroux P., Demartini G., and Ruchayskiy O. ScienceWISE: A Web-based Interactive Semantic Platform for Scientific Collaboration // 10th Int. Semantic Web Conference (ISWC 2011 – Demo), Bonn, Germany, October 2011.
 24. Astafiev A., Prokofyev R., Guéret C., Boyarsky A., and Ruchayskiy O. ScienceWISE: A Web-based Interactive Semantic Platform for Paper Annotation and Ontology Editing // Extended Semantic Web conference (ESWC 2012), Greece, 2012.

25. Елизаров А.М., Липачёв Е.К., Невзорова О.А., Соловьёв В.Д. Методы и средства семантического структурирования электронных математических документов // Доклады РАН. – 2014. – Т. 457 (6). – С. 642–645. <https://doi.org/10.7868/S0869565214240049>.
26. Nevzorova O., Zhiltsov N., Kirillovich A. and Lipachev E. OntoMathPRO Ontology: A Linked Data Hub for Mathematics // Pavel Klinov, Dmitry Mouromstev (eds.) Proc. of the 5th Int. Conf. on Knowledge Engineering and Semantic Web (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.
27. 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 // Доклады РАН. – 2016. – Т. 467, № 4. – С. 392–395. <https://doi.org/10.7868/S0869565216100042>.
28. Elizarov A., Kirillovich A., Lipachev E., and 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.

References

1. LinkingOpenData. W3C SWEO Community Project. URL: <https://www.w3.org/wiki/SweoIG/TaskForces/CommunityProjects/LinkingOpenData>.
2. Berners-Lee T. Linked Data – Design Issues, 2009. URL: <http://www.w3.org/DesignIssues/LinkedData.html>.
3. D’Aquin M. On the Use of Linked Open Data in Education: Current and Future Practices // In: Mouromtsev D. and D’Aquin M. (Eds.). Open Data for Education. Lecture Notes in Computer Science. – 2016. – Vol. 9500. – P. 3–15. https://doi.org/10.1007/978-3-319-30493-9_1.
4. Taibi D., Fulantelli G., Dietze S., and Fetahu B. Educational Linked Data on the Web – Exploring and Analysing the Scope and Coverage // In: Mouromtsev D. and D’Aquin M. (Eds.). Open Data for Education. Lecture Notes in Computer Science. – 2016. – Vol. 9500. – P. 16–37. https://doi.org/10.1007/978-3-319-30493-9_2.
5. D’Aquin M., Alessandro Adamou A., Dietze S., and Fetahu B. The LinkedUp Data Catalogue: A Meta-Dataset of Linked Datasets in the Education Domain // Semantic Web – Interoperability, Usability, Applicability. 2014. URL: <http://www.semantic-web-journal.net/content/linkedup-data-catalogue-meta-dataset-linked-datasets-education-domain>.
6. Proceedings of Linked Learning 2011: The 1st Int. Workshop on eLearning Approaches for the Linked Data Age, Heraklion, Greece, May 29, 2011. CEUR-WS, 2011. URL: <http://ceur-ws.org/Vol-717/>.

7. Proceedings of the 2nd Int. Workshop on Learning and Education with the Web of Data (LiLe-2012 at WWW-2012), Lyon, France, April 17, 2012. CEUR-WS, 2012. URL: <http://ceur-ws.org/Vol-840/>.
8. Proceedings of the IW3C2 WWW 2013 Conference, May 13–17, 2013, Rio de Janeiro, Brazil. IW3C2 2013.
9. Proceedings of the Linked Learning meets LinkedUp Workshop: Learning and Education with the Web of Data (LILE 2014), Riva del Garda, Italy, October 20, 2014. CEUR-WS, 2011. URL: <http://ceur-ws.org/Vol-1254/>.
10. LILE2015 – Learning & Education with the Web of Data. Collocated with WWW2015, 19 May, Florence, Italy. URL: <http://lile.linkededucation.org/2015>. Proceedings of the 24th Int. Conf. on World Wide Web (WWW2015), Florence, Italy, May 18–22, 2015.
11. LILE2016 – Learning & Education with the Web of Data – collocated with WWW2016, 11 April, Montreal, Canada. URL: <http://lile.linkededucation.org/2016>. Proceedings of the 25th Int. Conf. Companion on World Wide Web (WWW '16), Montreal, Canada, April 11–15, 2016.
12. LILE2018 – Learning & Education with Web Data. URL: <http://lile.linkededucation.org/2018>.
13. Guy M., D'Aquin M., Dietze S., Drachsler H., Herder E. and Parodi E. Linkedup: Linking Open Data for Education // Ariadne. – 2014. – Vol. 72. URL: <http://www.ariadne.ac.uk/issue72/guy-et-al>.
14. Al-Hunaiyyan A., Bimba A.T., Idris N., and Al-Sharhan S. A Cognitive Knowledge-Based Framework for Social and Metacognitive Support in Mobile Learning // Interdisciplinary J. of Information, Knowledge, and Management. – 2017. – Vol. 12. – P. 75–98.
15. Dockendorff M., and Solar H. ICT Integration in Mathematics Initial Teacher Training and its Impact on Visualization: The case of GeoGebra // Int. J. of Mathematical Education in Science and Technology. – 2017. – P. 1–19.
16. Vasiliev V., Kozlov F., Mouromtsev D., Stafeev S., and Parkhimovich O. ECOLE: An Ontology-Based Open Online Course Platform // In: Mouromtsev D. and D'Aquin M. (Eds.). Open Data for Education. Lecture Notes in Computer Science. – 2016. – Vol. 9500. P. 41–66. https://doi.org/10.1007/978-3-319-30493-9_3.
17. Khalili A., Auer S., Tarasowa D., and Ermilov I. Slidewiki: elicitation and sharing of corporate knowledge using presentations. In: ten Teije, A., Volker, J., Handschuh, S., Stuckenschmidt, H., d'Acquin, M., Nikolov, A., Aussenac-Gilles, N., Hernandez, N. (eds.) EKAW 2012. Lecture Notes in Computer Science. – 2012. – Vol. 7603. – P. 302–316.
18. Elizarov A.M., Kirillovich A.V., Lipachev E.K., Nevzorova O.A., Solovyev V.D., and Zhiltsov N.G. Mathematical Knowledge Representation: Semantic Models and Formalisms // Lobachevskii J. of Mathematics. – 2014. – Vol. 35, No 4. – P. 348–354. <https://doi.org/10.1134/S1995080214040143>.

19. Tzoumpa D., Karvounidis T., and Douligeris C. Towards an Ontology Approach in Teaching Geometry // Auer M.E. et al. (Eds.), *Interactive Collaborative Learning. Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2017. – Vol. 545. – P. 198–209. https://doi.org/10.1007/978-3-319-50340-0_16.
20. Dicheva D., Sosnovsky S., Gavrilova T., and Brusilovsky P. Ontological web portal for educational ontologies // *Int. J. Inf. Theor. Appl.* – 2004. – Vol. 13. (4). – P. 303–308.
21. Lmati I., Benlahmar H., and Achtaich N. Enrichment and Population of an Educational Ontology from a Corpus of Mathematical Analysis // *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*. – 2015. – Vol. 82. – P. 194–205.
22. Elizarov A.M., Kirillovich A.V., Lipachev E.K., Nevzorova O.A., and Shakirova L.R. Semantic Technologies in Mathematical Education: Ontologies and Linked Open Data // *Uchenye zapiski ISGZ*. – 2018. – Vyp. 1 (16). – S. 222–227.
23. Aberer K., Boyarsky A., Cudré-Mauroux P., Demartini G., and Ruchayskiy O. ScienceWISE: A Web-based Interactive Semantic Platform for Scientific Collaboration // *10th Int. Semantic Web Conference (ISWC 2011 – Demo)*, Bonn, Germany, October 2011.
24. Astafiev A., Prokofyev R., Guéret C., Boyarsky A., and Ruchayskiy O. ScienceWISE: A Web-based Interactive Semantic Platform for Paper Annotation and Ontology Editing // *Extended Semantic Web Conference (ESWC 2012)*, Greece, 2012.
25. Elizarov A.M., Lipachev E.K., Nevzorova O.A., and Solov'ev V.D. Methods and Means for Semantic Structuring of Electronic Mathematical Documents // *Doklady Mathematics*. – 2014. – Vol. 90 (1). – P. 521–524. <https://doi.org/10.1134/S1064562414050275>.
26. Nevzorova O., Zhiltsov N., Kirillovich A., and Lipachev E. OntoMathPRO Ontology: A Linked Data Hub for Mathematics // Pavel Klinov, Dmitry Mouromstev (eds.) *Proc. of the 5th Int. Conf. on Knowledge Engineering and Semantic Web (KESW 2014)*. *Communications in Computer and Information Science*. Springer, Cham, 2014. – Vol. 468. – P. 105–119. https://doi.org/10.1007/978-3-319-11716-4_9.
27. Elizarov A.M., Kirillovich A.V., Lipachev E.K., Zhizhchenko A.B., and Zhil'tsov N.G. Mathematical Knowledge Ontologies and Recommender Systems for Collections of Documents in Physics and Mathematics // *Doklady Mathematics*. – 2016. – Vol. 93 (2). – P. 231–233. <https://doi.org/10.1134/S1064562416020174>.
28. Elizarov A., Kirillovich A., Lipachev E., and Nevzorova O. Digital Ecosystem OntoMath: Mathematical Knowledge Analytics and Management // *Communications in Computer and Information Science*. Springer, Cham, 2017. – Vol. 706. – P. 33–46. https://doi.org/10.1007/978-3-319-57135-5_3.