

ЦИФРОВАЯ БИБЛИОТЕКА LOBACHEVSKII-DML В НАУЧНОМ ПРОСТРАНСТВЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ ЗНАНИЙ

Елизаров А.М.^{1,2}, Липачёв Е.К.³

LOBACHEVSKII DIGITAL LIBRARY IN THE SCIENTIFIC SPACE OF MATHEMATICAL KNOWLEDGE

Elizarov A.M.^{1,2}, Lipachev E.K.³

¹ Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия;

² Казанское отделение Межведомственного суперкомпьютерного центра Российской академии наук, Казань, Россия, amelizarov@gmail.com

Kazan (Volga Region) Federal University, Kazan, Russia;

Kazan Branch of Joint Supercomputer Center of the Russian Academy of Sciences, Kazan, Russia

³ Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия, elipachev@gmail.com
Kazan (Volga Region) Federal University, Kazan, Russia

Аннотация: Обсуждены направления развития и использования цифровых технологий в научной деятельности на базе цифровых платформ, а также значение и роль цифровых библиотек в их формировании. Предложены подходы к формированию научных информационных пространств как подпространств единого информационного пространства. Представлены результаты построения цифровой платформы управления математическим знанием, включающей цифровую экосистему OntoMath и цифровую математическую библиотеку Lobachevskii-DML. Рассмотрены методы создания фабрики метаданных цифровой научной библиотеки как элемента экосистемы научной цифровой платформы. Предложено решение ряда задач, связанных с построением библиотеки Lobachevskii-DML, формированием её электронных коллекций и их агрегированием в единое информационное пространство.

Ключевые слова: научное информационное пространство, цифровая научная платформа и её экосистема, цифровая научная библиотека, цифровая математическая библиотека, метаданные, фабрика метаданных, цифровая математическая библиотека Lobachevskii-DML.

Abstract: We discuss the directions of development and use of digital technologies in scientific activities based on digital platforms, as well as the significance and role of digital libraries in their formation. We consider approaches to the creation of scientific information spaces as subspaces of a single information space. We present the results of building a digital platform for managing mathematical knowledge. This platform includes the OntoMath digital ecosystem and the Lobachevskii-DML digital math library. We consider methods for creating a digital scientific library metadata factory as an element of the scientific digital platform ecosystem. We offer a solution to a number of problems related to the construction of the Lobachevskii-DML library, the formation of its electronic collections and their aggregation into a single information space.

Key words: scientific information space, digital scientific platform and its ecosystem, digital scientific library, digital mathematical library (DML), metadata, metadata factory, Lobachevskii Digital Mathematical Library.

Цифровые библиотеки и цифровые платформы. В настоящее время одно из базовых направлений развития и использования цифровых технологий в научной деятельности предусматривает организацию на современном технологическом уровне доступа к новейшим научным результатам, в частности, научным публикациям и наукометрической информации о них. Исторически это направление связано с формированием в мире цифровых (электронных) библиотек, в том числе научных. Их активное развитие началось в конце XX в. (см., например, [1–5]). В общем случае под цифровыми библиотеками, в том числе научными, понимают модели информационных систем, которые являются основой при создании универсальных распределенных хранилищ знаний и снабжены средствами навигации и поиска в коллекциях разнородных электронных документов, включаемых в эти хранилища (см., например, [6]).

В настоящее время цифровые библиотеки созданы во всех странах, имеющих развитую систему периодических научных изданий и служат базовыми элементами многих цифровых платформ. В общем случае цифровая платформа представляет информационную систему, в которой создаются специализированные программные сервисы, учитывающие интересы целевой аудитории и особенности определенной предметной области. Цифровые платформы обеспечивают поддержку жизненного цикла сервисов и контента, представленных на ней. Одной из значимых областей применения последних являются научные исследования и разработки.

Понятие «цифровая платформа» стало использоваться в последние десятилетия в различных областях деятельности, использующих информационно-компьютерные технологии. В связи с этим появилось несколько определений этого понятия. В статьях [7, 8] проведен анализ особенностей развития цифровых платформ и приведены оценки формирования цифровых платформ в Российской Федерации. Отметим наиболее важную составляющую всех известных определений понятия «цифровая платформа», а именно, цифровая платформа является ключевым инструментом цифровой трансформации традиционных областей, а также рынков. Кроме того, с помощью этого понятия производится разграничение между стратегией цифровизации и цифровой трансформацией. В свою очередь, цифровая трансформация рассматривается как процесс кардинального изменения с помощью цифровых платформ привычных моделей деятельности.

Основные направления развития цифровых платформ применительно к научной деятельности, а также их использования в процессе формирования цифровых научных библиотек обсуждены в работе [9].

Перечислим наиболее значимые российские научные библиотеки!

В 1999 году по инициативе РФФИ создана платформа eLibrary.Ru (<https://elibrary.ru/>). Основной задачей этой цифровой платформы является организация доступа к научным изданиям. В настоящее время eLibrary.Ru является крупнейшей российской научной электронной библиотекой. Также библиотека интегрирована с Российским индексом научного цитирования (РИНЦ), с помощью которого производится измерение публикационной как отдельных учёных, так и научных организаций.

Система Соционет (<https://socionet.ru>) создана в 2000 году и направлена на формирование международной информационного пространства научных работников, проводящих исследования в различных областях науки (см., например, [10]).

Общероссийский портал Math-Net.Ru (<http://www.mathnet.ru/>) создан в 2006 году и является информационной системой, в рамках которой осуществляется разработка программных инструментов управления научно-техническим контентом (см., например, [11]).

Научная электронная библиотека Cyberleninka (<https://cyberleninka.ru>, год организации – 2012) ставит своей задачей построение инфраструктуры знаний на основе российских публикаций.

Система ИСТИНА (Интеллектуальная Система Тематического Исследования Наукометрических данных, <https://istina.msu.ru/>, год организации – 2014) разрабатывается в Московском государственном университете для автоматизации процессов сбора, анализа наукометрической информации в научно-образовательных организациях. Одной из задач этой системы является расширение информационного пространства российских организаций науки и высшей школы в Интернет, как базы для повышения их авторитета и рейтинговых показателей в России и в мире (см., например, [12]).

Среди международных научных цифровых платформ отметим, прежде всего, наукометрическую базу данных Web of Science (WoS, <https://clarivate.com/webofsciencegroup/solutions/web-of-science/>), которая основана в 1961 году и до 2014 года носила название Web of Knowledge. Цифровая платформа Scopus (<https://www.scopus.com/>) создана в 2004 году и наряду с WoS используется в настоящее время в качестве инструмента измерения публикационной активности как отдельных научных работников, так и периодических научных изданий. Отметим также цифровую платформу Mendeley (<https://www.mendeley.com>, год организации – 2008). На этой платформе размещены сервисы совместной работы с библиографической информацией. Также эта цифровая платформа позволяет организовать социальную научную сеть на основе публикаций пользователей.

Цифровые платформы и цифровые научные библиотеки позволяют в определенной степени решить ряд задач, связанных с ускорением оборота научного знания и доступа к нему. Одновременно возникает целый ряд существенных проблем по обеспечению интегрированности (связности) извлекаемой информации. С этой точки зрения сужение всего пространства

имеющейся информации дает возможность точнее специфицировать информацию и, следовательно, обеспечить более качественный доступ к ней и ее использование. Такое сужение может быть обеспечено в рамках специализированных научных цифровых библиотек, которые организованы в конкретных предметных областях. Например, высокого уровня организации достигли математические цифровые библиотеки. О проекте создания одной из таких библиотек речь пойдет ниже.

В качестве другого варианта сужения множества доступной информации можно говорить о формировании научного информационного пространства, которое само по себе является огромным. Отметим, что понятие «информационное пространство» и различные его аспекты изучены в контексте разных сфер деятельности как с теоретической, так и с практической точек зрения. В самом широком смысле информационное пространство – это совокупность результатов интеллектуальной деятельности человечества.

Одним из способов сужения уже самого научного информационного пространства является ограничение круга пользователей информации, размещенной в нем. Именно на этой основе сформировался и был реализован проект создания Единого научного информационного пространства Российской академии наук (РАН) (история его развития и основные полученные результаты отражены, например, в [13, 14]). Отметим, что названный проект во многом опирался на результаты создания Интегрированной системы информационных ресурсов РАН, построенной в начале 2000-х годов с использованием технологий цифровых библиотек. В [15] введен термин «единое цифровое пространство научных знаний», обозначающий компьютерную среду, обращаясь к которой, пользователь может получить интересующую его информацию, касающуюся соответствующих областей науки. Там же поставлены задачи по формированию и развитию этого пространства (см., также [16, 17]).

Таким образом, в настоящее время, с одной стороны, предложены различные подходы к формализации понятия научного информационного пространства как подпространства информационного пространства и описанию его структуры и свойств. С другой стороны, благодаря широкому внедрению цифровых технологий в исследования и разработки, сегодня при проведении новых исследований стало возможным использовать всю совокупность накопленных научных знаний, что предполагает создание комплекса технологий, обеспечивающих оптимальное управление существующими знаниями, организацию эффективного доступа к ним, а также совместное и многократное использование новых типов структур знаний. Все перечисленное должно быть реализовано на базе цифровых платформ, которые необходимы для формирования структуры научного информационного пространства (как международного, так и российского). Далее, существующие научные цифровые библиотеки реализуют широкий спектр различных сервисов, а иногда обладают и собственной экосистемой (т. е. цифровым пространством, в котором функционирует множество этих сервисов) (см. [18, 19]). Представляется, что при создании цифровых платформ, базирующихся на этих цифровых библиотеках,

могут быть усовершенствованы и объединены функционалы и сервисы взаимодействия пользователей, имеющиеся у отдельных цифровых библиотек, что позволит сформировать оптимизированные экосистемы самих цифровых платформ. В результате, в зависимости от предметной области своей деятельности, они будут обладать своими специфическими наборами сервисов и позволят пользователям решать разнообразные комплексы задач по развитию и использованию цифровых технологий в различных предметных областях. Специфика предметной области, несомненно, играет здесь ключевую роль. Одну из таких предметных областей формируют математические научные знания. Именно в этом смысле мы говорим о научном пространстве математических знаний как подпространстве единого цифрового пространства научных знаний [20].

Научное пространство математических знаний. Сегодня научно-исследовательская деятельность в области математики тесно связана с использованием современных ИКТ (облачных, семантических и др.). Эти технологии применяются распределенными научными коллективами непосредственно в математических исследованиях, а также при подготовке и распространении математических знаний в цифровом виде. В результате формируется новый тип цифровых библиотек, основной задачей которых является интеграция математических знаний в научном информационном пространстве. Для этих библиотек используется наименование «цифровая математическая библиотека» (Digital Mathematical Library, DML). Такие DML, как The European Digital Mathematics Library (EuDML, <https://initiative.eudml.org/>), Math-Net.Ru (<http://www.mathnet.ru/>), DML-CZ (Czech Digital Mathematics Library, <https://dml.cz/>), Lobachevskii-DML и Numdam (<http://www.numdam.org/>), разрабатывают сервисы, учитывающие особенности математического контента (см. [3–5, 21, 22]). Одновременно для информационной поддержки DML стали разрабатываться методы обработки документов, основанные на семантических связях объектов, выделенных из их контента. В рамках проекта EuDML разрабатываются методы интеграции европейских электронных математических коллекций (см., например, [23]). При этом DML выполняют сегодня роль основного интегратора математического знания, представленного в научных документах, опубликованных за весь период развития математики (см. [24]), а наибольший эффект от внедрения ИКТ для дальнейшей организации научных знаний и улучшения их понимания ожидается именно в области математики, где уже создано значительное количество цифровых библиотек и имеется ряд цифровых платформ. Эти ожидания полностью подтверждаются идеями создания Всемирной цифровой математической библиотеки (World Digital Mathematics Library – WDML), Глобальной цифровой математической библиотеки (Global Digital Mathematics Library – GDML) и основным аспектам «Большой Математики» (Big Math) (см. [24–27]). Востребованность этих идей подтверждена широким кругом математиков в рамках обсуждений, проведенных Всемирным математическим союзом на ряде крупных международных конференций и математических съездов, и ответственностью этих исследований Глобальной инициативе WDML – объединения всего корпуса

имеющихся электронных математических документов в распределенной системе взаимосвязанных репозиторий, включая как современные источники, так и те, которые уже стали историческими [24]. В частности, одобрено, что следующим шагом в продвижении математики будут выход за рамки традиционных математических публикаций и создание сети информации, основанной на знаниях, содержащихся в этих публикациях. Благодаря сочетанию методов машинного обучения и усилий редакций и редакционных советов математических научных журналов большая часть информации и знаний (в виде связанных открытых данных) в глобальном массиве математических знаний должна стать доступной для исследователей через WDMML.

Lobachevskii-DML как составляющая WDMML. В настоящее время в Казанском (Приволжском) федеральном университете реализуется проект построения цифровой математической библиотеки Lobachevskii Digital Mathematics Library (Lobachevskii-DML, <https://lobachevskii-dml.ru/>), направленный на развитие и использование современных ИКТ для управления математическими знаниями. Основная цель этого проекта – создание интегрированной цифровой платформы, содержащей систему семантических сервисов комплексного управления электронными математическими коллекциями. При реализации проекта использованы подходы, которые соответствуют концепциям построения WDMML. Построение названной библиотеки предполагает разработку инструментов управления математическим контентом, учитывающих не только специфику математических текстов, но и особенности обработки русскоязычных текстов [27]. Остановимся подробнее на сервисах и инструментах взаимодействия пользователей цифровой библиотеки Lobachevskii-DML.

Управление электронными математическими документами – уникальная и сложная задача. Она связана не только с обработкой математических формул, но и со специфической структурой математического документа, состоящего из логически связанной последовательности определений, теорем, доказательств и ссылок. Ключевой идеей, обозначенной в документах проекта WDMML, является разработка классов объектов для адекватного описания и исследования математического содержания: предложена новая парадигма представления электронного математического контента, основой которой являются элементы (классы) и их взаимосвязи. Выделение классов математических объектов и формирование на их основе онтологий областей знаний позволяют создать новые инструменты по обработке информации, в частности, извлечению и обработке формул, поиску похожих результатов (см., например, [28]).

Технологической платформой цифровой библиотеки Lobachevskii DML служит цифровая экосистема OntoMath, которая осуществляет взаимодействие набора математических онтологий, инструментов текстовой аналитики, поисковых сервисов и приложений и предназначена для управления математическими знаниями [29–31]. Экосистема OntoMath включает ряд онтологий, в том числе онтологию профессионального математического знания OntoMath^{PRO},

образовательную математическую онтологию OntoMath^{Edu} и онтологию логической структуры Mocassin. Онтология OntoMath^{PRO} представлена в настоящее время новой версией (<https://github.com/CLLKazan/OntoMathPro/tree/v.2>). В этой версии 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. На основе OntoMath^{PRO} разработан класс интеллектуальных сервисов, отражающих семантику математического знания. Основные из этих сервисов описаны в [31] и использованы в практике работы редколлегий нескольких математических научных журналов.

С понятием цифровой платформы в последнее время связывают понятие цифровой фабрики (Digital Factory) (см., например, [22, 32]). В одном из подходов к его определению (см., например, <https://technet-nti.ru/article/fabriki-buducshego>) отмечено, что цифровая фабрика – это система комплексных технологических решений, обеспечивающих в кратчайшие сроки проектирование и производство глобально конкурентоспособной продукции нового поколения. При этом цифровая фабрика предполагает использование широкого спектра digital-инструментов на всех этапах проектирования и производства продукции – от стадии исследования до опытного образца. Ниже дано определение фабрики метаданных цифровой научной библиотеки (metadata factory of digital library), построение которой является одним из направлений реализации проекта Lobachevskii-DML.

Метаданные являются основой коммуникации в научном информационном пространстве и используются на всех этапах жизненного цикла научной публикации. Поэтому существенным элементом экосистемы любой цифровой библиотеки должна стать ее фабрика метаданных – система взаимосвязанных программных инструментов, направленных на создание, обработку, хранение и управление метаданными объектами цифровых библиотек и позволяющих интегрировать создаваемые электронные коллекции в агрегирующие цифровые научные библиотеки. С помощью этих инструментов преимущественно в автоматизированном режиме выполняются такие операции, как извлечение объектов и выстраивание связей между ними, экстракция метаданных из различных источников и конкретных документов, верификация, уточнение, нормализация по xml-схемам цифровых библиотек, а также гармонизация метаданных с помощью ручного редактирования или автоматизированных агентов, хранение и связывание метаданных с внешними базами данных. Результаты построения фабрики метаданных цифровой библиотеки Lobachevskii-DML подробно описаны в [9, 32–34]. С помощью программных инструментов этой фабрики реализованы основные процессы текстового анализа документов электронных коллекций, в частности, выделения именованных сущностей. Кроме

того, с помощью разработанной системы запросов произведен поиск в открытых источниках Сети информации, необходимой для получения метаданных, с последующим извлечением соответствующих информационных объектов.

Отдельное направление работ составляет сегодня наполнение библиотеки Lobachevskii-DML новыми электронными коллекциями из документов, созданных в «доцифровой» период и доступных только в бумажном виде, – такие коллекции называют ретро-оцифрованными (retrodigitized) или ретро-коллекциями. Одну из них составляют выпуски журнала «Известия физико-математического общества при Казанском университете» за 1891–1949 годы. Среди авторов этого журнала – выдающиеся математики XIX и XX веков.

В качестве источника пополнения метаданных этих коллекций использованы открытые ресурсы Сети. С помощью программных инструментов фабрики метаданных выполнены основные процессы текстового анализа документов цифровых ретро-коллекций, в частности, выделение именованных сущностей. Далее, через систему запросов в Сети произведены поиск и выделение информационных объектов. После проведения автоматической фильтрации и нормализации полученная информация включается в набор метаданных. Подробное описание результатов формирования ретро-коллекций и метаданных их документов содержится в [35–37].

Таким образом, к настоящему моменту времени цифровая математическая библиотека Lobachevskii-DML 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.

Список использованной литературы:

1. Армс В. Электронные библиотеки. М.: ПИК ВИНТИ, 2001. – 274 с. Пер. с англ. изд. Arms W.Y. Digital Libraries. MIT Press, Cambridge, MA, 2000. – 304 p.
2. Calhoun K. Exploring Digital Libraries: Foundations, Practice, Prospects. ALA Neal-Schuman, 2014. – 352 p. – URL: <https://dokumen.pub/qdownload/exploring-digital-libraries-foundations-practice-prospects-new-ed-1856048209-9781856048200.html> (Date of treatment: 08.10.2022)
3. Borwein J., Rocha E.M., Rodrigues J.F. Communicating Mathematics in the Digital Era. A K Peters/CRC Press, 2008. – 334 p.
4. Bouche T. Digital Mathematics Libraries: The Good, the Bad, the Ugly // Math.Comput.Sci. – 2010. – Vol. 3. – P. 227–241. <https://doi.org/10.1007/s11786-010-0029-2>.
5. Elizarov A.M., Lipachev E.K., Zuev D.S. Digital Mathematical Libraries: Overview of implementations and content management services // CEUR Workshop Proceedings. – 2017. – Vol.

2022. – P. 317–325. – URL: <http://ceur-ws.org/Vol-2022/paper49.pdf> (Date of treatment: 08.10.2022)

6. Xie I., Matusiak K.K. Discover Digital Libraries: Theory and Practice. Elsevier Inc., 2016. 364 p. – URL: <https://ps.ua1lib.org/book/2800638/d1cfb2> (Date of treatment: 08.10.2022)

7. Ершова Т.В., Хохлов Ю.Е. Цифровые платформы для исследований и разработок. Информационное общество. – 2017. – Вып. 6. – С. 17–24. – URL: <http://infosoc.iis.ru/article/view/194/217> (Дата обращения: 08.10.2022)

8. Еферин Я.Ю., Россото К.М., Хохлов Ю.Е. Цифровые платформы в России: конкуренция между национальными и зарубежными многосторонними платформами стимулирует экономический рост и инновации // Информационное общество. – 2019. – Вып. 1-2. – С. 16–34. – URL: <http://infosoc.iis.ru/article/view/135/74> (Дата обращения: 08.10.2022)

9. Елизаров А.М., Липачев Е.К. Цифровые платформы и цифровые научные библиотеки // Int. J. of Open Information Technologies. – 2020. – Т. 8, № 11. – P. 80–90. – URL: <http://injoit.org/index.php/j1/article/download/1031/982> (Дата обращения: 08.10.2022)

10. Когаловский М.Р., Паринов С.И. Технологии социальной сети для создания семантических связей информационных объектов в научной электронной библиотеке // Программирование. – 2014. – Т. 40, № 6. – С. 22–33. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_22776099_19669015.pdf (Дата обращения: 08.10.2022)

11. Chebukov D.E., Izaak A.D., Misyurina O.G., Pupyrev, Yu.A., Zhizhchenko A.B. Math-Net.Ru as a digital archive of the Russian mathematical knowledge from the XIX century to today // Intelligent Computer Mathematics, Lecture Notes in Comput. Sci., 7961, Springer, 2013. P. 344–348. https://doi.org/10.1007/978-3-642-39320-4_26

12. Афонин С.А. и др. Интеллектуальная система тематического исследования научно-технической информации (ИСТИНА). Под ред. академика В.А. Садовниченко. М.: Издательство Московского университета, 2014. – 262 с. URL: <https://istina.msu.ru/media/publications/book/4cd/546/7375366/Istina-book.pdf> (Дата обращения: 08.10.2022)

13. Серебряков В.А. Работы Вычислительного центра РАН в области распределенных информационных систем // Вестн. Новосиб. гос. ун-та. Серия: Информационные технологии. – 2014. – Т. 12, вып. 3. – С. 100–123. – URL: <https://nsu.ru/xmlui/bitstream/handle/nsu/6870/09.pdf?sequence=1&isAllowed=y> (Дата обращения: 08.10.2022)

14. Кулагин М.В., Серебряков В.А. Информационное пространство РАН (Проекты и реализация, 1998–2013) // Научный сервис в сети Интернет: труды XVIII Всероссийской научной конференции (19–24 сентября 2016 г., г. Новороссийск). – М.: ИПМ им. М.В. Келдыша, 2016. – С. 194–222. – <https://doi.org/doi:10.20948/abrau-2016-40> – URL: <https://keldysh.ru/abrau/2016/40.pdf> (Дата обращения: 08.10.2022)

15. Антопольский А.Б., Каленов Н.Е., Серебряков В.А., Сотников А.Н. О едином цифровом пространстве научных знаний // Вестник Российской академии наук. – 2019. – Т. 89, №7. – С. 728–735. – URL: http://www.ras.ru/publishing/raserald/raserald_pdf.aspx (Дата обращения: 08.10.2022)
16. Kalenov N., Savin G., Sotnikov A. Fundamentals of Common Digital Space of Scientific Knowledge Building // CEUR Workshop Proceedings. – 2021. – Vol. 2990. – P. 93–99. – URL: <http://ceur-ws.org/Vol-2990/spaper3.pdf> (Date of treatment: 08.10.2022)
17. Каленов Н.Е., Савин Г.И., Сотников А.Н. Архитектура единого цифрового пространства научных знаний // Единое цифровое пространство научных знаний: проблемы и решения : сборник научных трудов / под ред. Н. Е. Каленова, А. Н. Сотникова — Москва ; Берлин : Директмедиа Паблишинг, 2021. – С. 7–16.
18. White Paper. Digital Platforms. Digital regulatory policy for growth, innovation, competition and participation of the Economic Affairs Ministry. – Berlin: Federal Ministry for Economic Affairs and Energy, 2017. – 116 p. – URL: <https://www.de.digital/DIGITAL/Redaktion/EN/Publikation/white-paper.html> (Date of treatment: 08.10.2022)
19. Bosch J. Speed, Data, and Ecosystems. Excelling in a Software-Driven World. CRC Press. Taylor & Francis Group, 2017. 295 p.
20. Elizarov A., Lipachev E. Digital Libraries and the Common Digital Space of Mathematical Knowledge // CEUR Workshop Proceedings. – 2021. – Vol. 2990. – P. 25–38. – URL: <http://ceur-ws.org/Vol-2990/rpaper3.pdf> (Date of treatment: 08.10.2022)
21. Bouche T. Reviving the Free Public Scientific Library in the Digital Age? The EuDML Project. In: K. Kaiser, S. Krantz, B. Wegner (Ed.): Topics and Issues in Electronic Publishing, JMM, Special Session, San Diego, 2013. – P. 57–80 (2013). URL: <http://www.emis.de/proceedings/TIEP2013/05bouche.pdf> (Date of treatment: 08.10.2022)
22. Bouche T., Labbe O. The New Numdam Platform. In: H. Geuvers, M. England, O. Hasan, F. Rabe, O. Teschke (Ed.), Intelligent Computer Mathematics – CICM 2017. volume 10383 of Lecture Notes in Computer Science, Springer, Cham, 2017. – Vol. 10383. – P. 70–82. https://doi.org/10.1007/978-3-319-62075-6_6 (Date of treatment: 08.10.2022)
23. Bouche T., Rákosník J. Report on the EuDML External Cooperation Model // In: Kaiser K., Krantz S.G., Wegner B. (Eds.) Topics and Issues in Electronic Publishing, JMM, Special Session, San Diego, 2013. – P. 99–108. – URL: https://www.emis.de/proceedings/TIEP2013/07bouche_rakosnik.pdf (Date of treatment: 08.10.2022)
24. Developing a 21st Century Global Library for Mathematics Research, DC: The National Academies Press, Washington. – <https://doi.org/10.17226/18619>
25. Ion P.D.F., Watt S.M. The Global Digital Mathematics Library and the International Mathematical Knowledge Trust // Lecture Notes in Computer Science, Springer, Cham, 2017. – Vol. 10383. – P. 56–69. – https://doi.org/10.1007/978-3-319-62075-6_5

26. 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. – Vol. 43. – P. 78–87. <https://doi.org/10.1007/s00283-020-10006-0>

27. Elizarov A., Lipachev E. Big Math Methods in Lobachevskii-DML digital library // *CEUR Workshop Proceedings*. – 2019. – Vol. 2523. – P.59–72. – URL: <http://ceur-ws.org/Vol-2523/invited08.pdf> (Date of treatment: 08.10.2022)

28. 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>. – URL:

https://www.elibrary.ru/download/elibrary_25845462_24351937.pdf (Дата обращения: 08.10.2022)

29. 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. – Vol. 706. – P. 33–46. https://doi.org/10.1007/978-3-319-57135-5_3.

30. Елизаров А.М., Кириллович А.В., Липачёв Е.К., Невзорова О.А. OntoMath^{PRO} – онтология математического знания // *Доклады Российской академии наук. Математика, информатика, процессы управления*. – 2022. – Т. 507, №6 (ноябрь–декабрь) (в печати).

31. Елизаров А.М., Кириллович А.В., Липачёв Е.К., Невзорова О.А. Цифровая экосистема OntoMath: взаимодействие семантических сервисов и математических онтологий // *Научный сервис в сети Интернет: труды XXIV Всероссийской научной конференции (19–23 сентября 2022 г., онлайн)*. – М.: ИПМ им. М.В. Келдыша, 2022 (в печати).

32. Elizarov A., Lipachev E. Digital Library Metadata Factories // *CEUR Workshop Proceedings*. – 2021. – Vol. 2813. – P. 13–21. – URL: <http://ceur-ws.org/Vol-2813/rpaper01.pdf> (Date of treatment: 08.10.2022)

33. 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. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=43829926> (Дата обращения: 08.10.2022)

34. Gafurova P., Elizarov A., Lipachev E. Algorithms for Integration of Unstructured Mathematical Documents into the Common Digital Space of Scientific Knowledge // *CEUR Workshop Proceedings*. – 2021. – Vol. 2990. – P. 39–49. – URL: <http://ceur-ws.org/Vol-2990/rpaper4.pdf> (Date of treatment: 08.10.2022)

35. Гафурова П.О., Елизаров А.М., Липачёв Е.К. Lobachevskii-DML: формирование архивных математических коллекций // Научный сервис в сети Интернет: труды XXII Всероссийской научной конференции (21–25 сентября 2020 г., онлайн). – М.: ИПИМ им. М.В. Келдыша. – 2020. – С. 171–183. <https://doi.org/10.20948/abrau-2020-23>. – URL: <https://keldysh.ru/abrau/2020/theses/23.pdf> (Дата обращения: 08.10.2022)

36. Гафурова П.О., Елизаров А.М., Липачёв Е.К. Алгоритмы формирования метаданных математических ретро-коллекций на основе анализа структурных особенностей документов // Электронные библиотеки. – 2021. – Т. 24, № 2. – С. 238–271. – URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_45839687_69406869.pdf (Дата обращения: 08.10.2022)

37. Андреичев М.Д., Гафурова П.О., Елизаров А.М., Липачёв Е.К. Пополнение метаданных документов математических цифровых ретро-коллекций методом семантических сетей // Научный сервис в сети Интернет: труды XXIII Всероссийской научной конференции (20–23 сентября 2021 г., онлайн). – М.: ИПИМ им. М.В. Келдыша, 2021. – С. 22–33. <https://doi.org/10.20948/abrau-2021-22>. – URL: <https://keldysh.ru/abrau/2021/theses/22.pdf> (Дата обращения: 08.10.2022)

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект 21-11-00105.