

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

ЛАБОРАТОРИЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

ИМ. М.Г. МЕЩЕРЯКОВА

На правах рукописи



Белов Сергей Дмитриевич

Методы и технологии Больших данных для решения задач

физики высоких энергий

в распределенной вычислительной среде

Специальность 2.3.5 – Математическое и программное обеспечение
вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Дубна – 2024

Работа выполнена в Лаборатории информационных технологий им. М.Г. Мещерякова
Объединенного института ядерных исследований.

Научный руководитель:	Кореньков Владимир Васильевич, доктор технических наук, старший научный сотрудник, Объединенный институт ядерных исследований, научный руководитель Лаборатории информационных технологий им. М.Г. Мещерякова
Научный консультант:	Дудко Лев Владимирович, доктор физико-математических наук, НИИЯФ МГУ, заведующий Лабораторией электрослабых и новых взаимодействий отдела экспериментальной физики высоких энергий
Официальные оппоненты:	Афанасьев Александр Петрович, доктор физико-математических наук, профессор, ИППИ РАН, заведующий Центром распределённых вычислений Царегородцев Андрей Юрьевич, кандидат физико-математических наук, Марсельский центр физики частиц Института ядерной физики и физики частиц Национального центра научных исследований (Марсель, Франция), инженер-исследователь высшей квалификации

С электронной версией диссертацией можно ознакомиться на официальном сайте
Объединенного института ядерных исследований в информационно-телекоммуникационной
сети «Интернет» по адресу: <https://dissertations.jinr.ru>. С печатной версией диссертации
можно ознакомиться в Научно-технической библиотеке ОИЯИ (Московская область,
г. Дубна, ул. Жолио-Кюри, д. 6).

Ученый секретарь диссертационного
совета ОИЯИ.05.01.2022.П
доктор физ.-мат. наук

Земляная Елена Валериевна

Общая характеристика работы

Диссертационное исследование посвящено разработке и развитию методов, моделей и программных систем аналитики Больших данных для решения научных задач физики высоких энергий с использованием подходов распределенной обработки, а также обобщению полученных результатов для перехода к цифровым аналитическим платформам.

Актуальность темы исследования

Современные научные проекты, как правило, сопровождаются хранением и обработкой больших объемов данных различной природы и сложности. В зависимости от особенностей исследования (например, интенсивность поступления данных, необходимая производительность обработки, административная структура владения информационной системой и т.д.) используются комбинации различных подходов к организации хранения и обработки данных. Так, в крупных современных экспериментах физики высоких энергий хранение и обработку данных по ряду причин (прежде всего вследствие их колоссального объёма) невозможно организовать в одном вычислительном центре, поэтому используются географически распределенные вычислительные системы. В качестве примера можно привести эксперимент ATLAS¹ на Большом адронном коллайдере² (БАК), объем данных которого на лентах и дисках суммарно достиг 1 эксабайта в 2024 году, и для хранения и обработки данных эксперимента задействованы более 120 вычислительных центров³. Общий объем данных экспериментов на БАК в 2022 году превысил 1,5 эксабайта⁴, в компьютеринг экспериментов вовлечено более 170 вычислительных центров в более чем 40 странах мира, и объем задействованных ресурсов только возрастает.

¹ The ATLAS Collaboration et al 2008 JINST 3 S08003

² Lyndon Evans and Philip Bryant 2008 JINST 3 S08001

³ По данным с сайта системы управления данными Rucio <http://rucio.cern.ch>

⁴ По информации с официальной страницы проекта WLCG
<https://home.cern/science/computing/grid>

Термин «Большие данные» встречается в научной литературе с 1990-х годов, при этом он получил широкое распространение в 2008 г. после публикации посвященного этой теме специального выпуска журнала Nature. Задачи обработки данных большого объёма, имеющих сложные либо неявные внутренние связи и структуру, были актуальны и ранее. Отдельное рассмотрение данной проблемы, введение специального понятия и различных наборов признаков данных и характеристик их обработки (относительно которых нет устоявшегося строго зафиксированного определения) позволило впоследствии выработать новые подходы к обработке Больших данных, а также предложить методы анализа данных и технологии построения информационной инфраструктуры. Часто в качестве одного из наборов характеристических признаков Больших данных (конструктивного и практичного, но, конечно, не полного) рассматривают так называемые 5V: Volume (объём), Velocity (скорость), Variety (разнообразие), Veracity (достоверность), Value (ценность). Эти параметры могут быть связаны между собой. К примеру, достоверность входных и промежуточных данных может влиять на ценность полученного на их основе результата.

В экспериментах физики высоких энергий есть несколько важных классов исходных данных. Прежде всего это данные о физических событиях, регистрируемых в детекторах, и сведения о состоянии самих детекторов. Другим необходимым классом данных при подготовке эксперимента, обработке и анализе его данных являются смоделированные события. В качестве одного из основных методов моделирования событий применяется метод Монте-Карло, или метод статистических испытаний. Точное и достоверное моделирование требует значительных компьютерных ресурсов и детального сравнения результатов, получаемых с помощью различных пакетов моделирования. Важной задачей является обеспечение корректности итоговых результатов моделирования («достоверности» в указанной выше «формуле 5V») и возможности их быстрого получения. Для обеспечения корректности важен тщательный подбор подходящих для конкретной физической задачи

средств моделирования (Монте-Карло генераторов), их точная настройка (фактически – тонкое задание некоторых существенных параметров моделирования), выполнение требуемых расчетов в доступной вычислительной среде, сохранение и описание результатов моделирования для дальнейшего использования. Таким образом, возникает необходимость не только в создании и хранении корректно подготовленных и детально описанных образцов смоделированных физических событий для дальнейшего использования, но и в возможности получения доступа к этим данным из глобально распределенной вычислительной инфраструктуры.

Некоторые исследователи в качестве важной характеристики систем анализа Больших данных указывают возможность горизонтальной масштабируемости обработки данных, распределенных на большом количестве вычислительных узлов. Этот же подход используется при организации вычислений в грид-среде⁵, которая интегрирует и координирует распределение ресурсов множества независимых вычислительных центров. Данные о состоянии глобальной вычислительной среды и процессах в ней, необходимые для поддержания её функционирования и управления её работой, ввиду разнообразия и высокой скорости их поступления сами являются Большими данными и требуют новых подходов к их анализу и интерпретации. Интенсивность потока данных мониторинга достаточно высока и составляет десятки тысяч сообщений о состоянии сервисов и процессов в секунду. Стандартные средства хранения и обработки информации, прежде всего традиционно использовавшиеся реляционные базы данных, при решении этой задачи оказываются недостаточно эффективными. Требуется применение альтернативных подходов и программных средств.

В других отраслях знания также наблюдается «информационный взрыв». Например, в экономических и социальных науках возрастают как объем данных, так и их структурная и семантическая сложность. С одной

⁵ Foster I., Kesselman C. The Grid: blueprint for a future computing infrastructure. - Morgan Kaufmann Publishers, 1999

стороны, это даёт исследователю качественно новые сведения об объекте. С другой – требует создания новых методов и средств для масштабируемой обработки на порядок возросшего объёма информации.

Необходимость работы с Большими данными возникает в различных сферах деятельности, в том числе в тех, где современные подходы и технологии анализа данных пока не получили должного распространения. При этом методы организации обработки данных зачастую весьма схожи, несмотря на определённые различия, обусловленные спецификой предметной области. Ввиду этого одним из перспективных направлений является платформенный подход к созданию программно-аппаратных решений. Такие системы включают в себя как базовые элементы инфраструктуры, общие для решения задач различных типов, так и функциональные модули с узкой специализацией, которые улучшают параметра анализа (например, скорость его выполнения или повышение точности результатов).

Цели и задачи исследования.

Цель работы: разработка методов, моделей и программных систем на основе технологий Больших данных для мониторинга, управления передачей и хранения данных в распределённой вычислительной среде, а также усовершенствование процесса моделирования событий в физике высоких энергий.

Для достижения указанной цели были поставлены и решены следующие **основные задачи:**

1. Разработка методов применения и программная реализация специализированной базы знаний для автоматизации процесса моделирования физических событий в физике высоких энергий с использованием глобальной распределенной вычислительной среды.
2. Применение методологии и технологий аналитики Больших данных для развития систем мониторинга и управления распределенными вычислительными системами.

3. Создание программного комплекса для анализа востребованности данных⁶ на основе информации о доступе к наборам данных и их размещении в распределённой среде.
4. Обобщение разработанных подходов для построения архитектуры цифровой аналитической платформы для решения широкого круга задач; практическое использование этих разработок на примере анализа рынка труда в масштабах страны.

Методы исследования

В проведенных в диссертационной работе исследованиях использовались онтологический подход к описанию процессов в физике высоких энергий, методы системного анализа, теории вероятностей и математической статистики, реляционной алгебры. При реализации программных систем были использованы методы системного программирования, объектно-ориентированного программирования, интернет-технологии.

Научная новизна

1. Разработаны новые масштабируемые методы мониторинга передачи данных в глобально распределенных вычислительных системах, основанные на использовании технологий Больших данных.
2. Впервые предложен и реализован подход к автоматизации некоторых этапов моделирования физических событий в физике высоких энергий, основанный на описании метаданных о событиях для передачи между этапами обработки и использовании базы знаний в распределённой вычислительной среде. Разработаны оригинальные методы и язык разметки для описания таких событий и база знаний для хранения и доступа к данным.

⁶ В англоязычной литературе используется термин «data popularity» (см. Главу 3).

3. Разработан и реализован новый метод анализа востребованности данных в распределённой вычислительной среде эксперимента ATLAS на Большом адронном коллайдере.
4. На основе технологий Больших данных создана и впервые применена методика автоматизированного анализа рынка труда в масштабах страны.

Научно-практическая значимость

1. Предложенные подходы к мониторингу и разработанные комплексы программ используются в системе мониторинга распределенной вычислительной среды в проекте MONIT⁷ и компьютеринге эксперимента ATLAS.
2. Созданный программный комплекс для анализа востребованности данных применяется в эксперименте ATLAS для определения эффективности стратегий управления данными.
3. Разработанные база знаний событий Монте-Карло моделирования и средства описания метаинформации о моделировании были успешно использованы для повышения степени автоматизации официальной цепочки моделирования событий в эксперименте CMS⁸ в 2010–2013 годах. Созданный язык разметки HepML используется в генераторах событий CompHEP⁹ и CalcHEP¹⁰.
4. Сформулированные подходы и предложенная архитектура платформы для аналитики Больших данных реализованы в прототипе платформы, на котором выполнено исследование рынка труда России.

⁷ EPJ Web of Conferences 214, 08031 (2019)

⁸ The CMS Collaboration *et al* 2008 *JINST* 3 S08004

⁹ Nucl.Instrum.Meth.A 534 (2004) 250-259

¹⁰ A. Belyaev, N. D. Christensen, and A. Pukhov. “CalcHEP 3.4 for collider physics within and beyond the Standard Model”. *Comput. Phys. Commun.* 184 (213) pp. 1729-1769.

Положения, выносимые на защиту

1. Комплекс методов и программных средств для масштабируемого мониторинга и анализа функционирования распределенных вычислительных систем, позволивший реализовать мониторинг и анализ статистики передачи данных в эксперименте ATLAS.
2. Методы описания и доступа к метаданным и смоделированным событиям в физике высоких энергий, повышающие степень автоматизации и надёжности цепочки моделирования, а также достоверность получаемых результатов.
3. Программный комплекс для анализа востребованности наборов данных в глобально распределённой вычислительной среде, позволивший оценить эффективность политик распределённого хранения данных эксперимента ATLAS и оптимизировать их.
4. Архитектура и прототип аналитической системы, построенные на основе обобщения методов, созданных для решения задач физики высоких энергий, и предназначенные для эффективного проведения исследований в различных областях науки с использованием технологий Больших данных.

Апробация работы

Основные положения диссертационной работы, разработанные модели, методы, алгоритмы и результаты практического использования, представленные в диссертации, докладывались и обсуждались на научных семинарах в Лаборатории информационных технологий им. М.Г. Мещерякова Объединенного института ядерных исследований и в Европейском центре ядерных исследований (ЦЕРН) (2004–2020 годы), в Национальном исследовательском центре «Курчатовский институт» (2014 год), а также представлялись и докладывались автором на следующих международных научных конференциях: ACAT 2007 (Амстердам, Нидерланды), ACAT 2008 (Эриче, Италия), GRID'2010 (Дубна, Россия), NEC'2011 (Варна, Болгария),

NEC 2017 (Будва, Черногория), GRID 2018 (Дубна, Россия), ECDA 2018 (Падерборн, Германия), NEC 2019 (Будва, Черногория), GRID 2021 и GRID 2023 (Дубна, Россия).

Основные результаты исследования получены автором в рамках работ, выполненных в Лаборатории информационных технологий Объединённого института ядерных исследований (2004–2024 гг.), ЦЕРН (2004–2016 гг.), Российском экономическом университете им. Г.В. Плеханова (2017–2023 гг.). Часть результатов исследований по теме диссертации была получена в рамках НИР, выполнявшихся при поддержке грантов Дирекции Объединённого института ядерных исследований, а также в рамках следующих проектов:

- РФФИ 07-07-00365-а «Создание HERML, XML-языка для представления информации при моделировании физических процессов в Физике высоких энергий»;
- РФФИ 18-07-01359-а «Разработка информационно-аналитической системы мониторинга и анализа потребностей рынка труда в выпускниках ВУЗов на основе аналитики больших данных»;
- РФФИ 19-71-30008 «Развитие технологий и платформ для решения задач цифровой экономики и научных проектов класса мегасайенс на основе синтеза технологий Больших данных, суперкомпьютерных технологий, озер данных и машинного обучения».

Степень достоверности результатов

Достоверность полученных результатов подтверждается успешным практическим применением разработанного на их основе программного обеспечения для мониторинга и анализа функционирования распределенных вычислительных систем, автоматизации цепочки моделирования и анализа физического эксперимента, автоматизированного анализа рынка труда в масштабах страны основе открытых данных.

Публикации и личный вклад

Основные результаты исследования изложены в 19 научных работах, опубликованных в рецензируемых изданиях и соответствующих требованиям к публикациям Положения о присуждении ученых степеней в ОИЯИ. Также получено одно свидетельство о государственной регистрации базы данных. Научные работы были опубликованы в соавторстве, при этом изложенные в них результаты были получены при определяющем вкладе соискателя, а именно:

- В работах по MCDB и HerML автором предложена архитектура базы знаний, выполнена её практическая реализация; разработаны методы и созданы программные интерфейсы для доступа к базе из распределённой вычислительной среды; спроектированы и реализованы схема языка разметки HerML и инструменты для работы с ним;
- Автором диссертации разработаны методы и реализована программная система масштабируемого мониторинга передачи данных для эксперимента ATLAS;
- Предложена архитектура системы и создан комплекс программ для анализа востребованности данных эксперимента ATLAS;
- Разработана обобщённая архитектура и выбраны программные средства для построения аналитической платформы; на базе созданного прототипа платформы выполнены прикладные исследования российского рынка труда и тематики публикаций в научных журналах.

Соответствие диссертации паспорту специальности

Содержание и результаты диссертационной работы соответствуют трём направлениям исследований из паспорта специальности 2.3.5:

3. Модели, методы, архитектуры, алгоритмы, языки и программные инструменты организации взаимодействия программ и программных систем.

4. Интеллектуальные системы машинного обучения, управления базами данных и знаний, инструментальные средства разработки цифровых продуктов.

9. Модели, методы, алгоритмы, облачные технологии и программная инфраструктура организации глобально распределенной обработки данных.

Объем и структура диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения и библиографии. Общий объём работы составляет 126 страниц, включая 1 таблицу, 29 рисунков и список литературы из 201 наименования.

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, приводится краткий обзор работ по тематике исследования, формулируются цели работы, излагаются её новизна, научная и практическая значимость полученных результатов. Приводятся положения, выносимые на защиту, апробация и степень достоверности результатов, соответствие диссертации паспорту специальности, структура работы.

Первая глава «Системы распределенной обработки в физике высоких энергий и Большие данные» посвящена анализу организации и использования распределённых вычислительных систем для решения задач хранения и обработки данных в физике высоких энергий. Рассматривается применение глобально распределённой среды на примере моделирования и анализа физических процессов на коллайдерах. Обсуждается применение концепций, подходов и технологий Больших данных при решении задач физики высоких энергий в глобально распределённой вычислительной среде.

В связи с успешной работой Большого адронного коллайдера и получением данных с детекторов экспериментов, существенные усилия теоретиков и экспериментаторов в области физики высоких энергий

направлены на то, чтобы обеспечивать скорейшее понимание получаемых экспериментальных данных. В свою очередь, это требует детального моделирования физических процессов, происходящих на коллайдере.

Одной из наиболее общих задач экспериментальной физики высоких энергий является моделирование физических процессов методом Монте-Карло. Полная цепочка моделирования физического процесса на современном коллайдере включает в себя математическое и цифровое описание теоретической модели и её параметров, вычисление матричного элемента процессов рассеяния частиц, генерацию событий методом Монте-Карло, моделирование радиационного излучения партонов, адронизацию и фрагментацию кварков, моделирование адронных остатков. Далее производится моделирование отклика экспериментального детектора и оценка эффективности восстановления физически значимой информации. По оценкам экспертов, только для экспериментов CMS и ATLAS требуется моделирование десятков миллиардов событий ежегодно¹¹. Для получения масштабируемого решения по генерации событий необходимо максимально автоматизировать цепочку моделирования.

Эффективное использование распределённой вычислительной среды предполагает одновременное выполнение большого количества задач (для крупных проектов – сотни тысяч), что влечёт за собой необходимость передачи и хранения большого количества файлов и наборов данных. Отслеживание процессов в такой вычислительной среде, и, в частности, мониторинг и анализ её функционирования, является масштабной задачей. Данные, получаемые системой мониторинга, ввиду скорости их поступления, сами являются Большими данными. В связи с постоянным увеличением количества задействованных ресурсов, а также интенсивности их использования, все составляющие цепочки обработки и анализа данных должны быть масштабируемы. Для решения задачи мониторинга данное

¹¹ The HSF Physics Event Generator WG., Valassi, A., Yazgan, E. et al. Challenges in Monte Carlo Event Generator Software for High-Luminosity LHC. Comput Softw Big Sci 5, 12 (2021)

требование может быть выполнено с использованием технологий Больших данных.

Подходы и технологии обработки и хранения данных, изначально применявшиеся или созданные для решения задач физики высоких энергий, показали свою универсальность и успешно используются в других естественных науках (астрономия, медицина, науки о жизни и т.д.).

Во второй главе «Представление и управление данными и знаниями» рассматриваются подходы к организации Монте-Карло моделирования физических процессов в экспериментах физики высоких энергий в случае глобально распределенной обработки. Предлагается подход, повышающий эффективность, надежность и масштабируемость цепочки моделирования для получения достоверных результатов. Обсуждается использование базы знаний MCDB (Monte Carlo Data Base) и языка HepML для усовершенствования цепочки моделирования эксперимента CMS в ЦЕРН.

На примере Монте-Карло моделирования и физического анализа в грид-среде формулируются проблемы, возникающие при автоматизации сложных информационных процессов в распределенных вычислительных системах.

Некоторые наиболее распространённые проблемы, возникающие при автоматизации цепочки Монте-Карло моделирования:

- разнородность форматов и описаний данных моделирования, возникающая из-за наличия большого количества разнообразных Монте-Карло генераторов;
- сложность настройки генераторов, вызванная наличием большого числа задаваемых параметров генерации;
- описание данных моделирования (метаданных), их хранение и обработка;
- связь метаданных с данными;
- доступ к данным и соответствующим им метаданным при географически распределенной обработке.

На основе анализа процессов моделирования событий в физике высоких энергий и актуальных проблем в этой области предлагается подход, позволяющий повысить эффективность и надёжность Монте-Карло моделирования в физике высоких энергий с использованием системы управления базой знаний и ресурсов грид-среды.

Для минимизации участия человека в цепочке моделирования (что, помимо увеличения скорости моделирования, уменьшает и количество привнесённых человеком ошибок) требуется, по возможности, автоматизировать все участки цепочки моделирования, в том числе передачу данных и метаданных. Это имеет большое значение в случае моделирования с использованием распределённой вычислительной среды, когда пользователь не может интерактивно корректировать процесс генерации событий на разных его этапах.

Для описания и хранения подробной информации о смоделированных событиях был предложен язык разметки HepML (High Energy Physics Markup Language) [A1], дополняющий возможности стандартного формата LHEF (Les Houches Event File) [A2]. LHEF – универсальный и расширяемый стандарт файлов при генерации событий на уровне частиц. Он используется в генераторах, вычисляющих матричные элементы и моделирующих события на партонном уровне (ME-генераторы), таких как пакеты CompHEP, MadGraph, GRACE. Такие генераторы дают возможность рассчитывать широкий спектр физических процессов, используя различные теоретические модели. При этом для получения физических результатов необходим следующий этап, на котором моделируются адронизация кварков и ряд сопутствующих эффектов. Для этого используются так называемые SH-генераторы, например PYTHIA и HERWIG. Стандартизация передачи информации из ME-генераторов в SH-генераторы является весьма актуальной, и язык HepML и программные библиотеки для работы с ним были разработаны прежде всего для этого этапа моделирования.

Для организации хранения, описания и доступа к корректно смоделированным образцам физических событий была разработана концепция специализированной базы знаний, отвечающей следующим требованиям:

- база должна содержать не только сгенерированные события, но и всю необходимую информацию об их получении, а также метаинформацию, необходимую для их дальнейшего использования;
- структурированная информация из данной базы, представленная в определенном формате, должна быть доступна как для расширения и дополнения, так и для вывода и дальнейшего использования во внешних программах;
- интерфейс базы должен позволять удаленно совершать с ней операции как конечным пользователям, так и программным системам;
- для поддержки совместной работы большого сообщества пользователей должна поддерживаться возможность хранения десятков тысяч файлов событий с суммарным объемом в несколько петабайт, а также возможность поиска соответствующих метаданных и доступа к ним.

Такая база знаний была реализована в проекте Monte Carlo Data Base (MCDB) [A2]. Основной целью MCDB являлось создание открытого для широкой научной общественности хранилища подготовленных экспертами событий для различных процессов в физике высоких энергий.

Предложенная модель системы управления базой знаний позволила более эффективно, надёжно и с большей степенью автоматизации использовать результаты физического моделирования в глобальной распределенной вычислительной среде. Важную роль в физической программе экспериментов на коллайдере играет моделирование основных ожидаемых физических процессов. Программные интерфейсы MCDB позволяют автоматизировать передачу информации, полученной в ходе теоретического моделирования физических процессов, на этап

моделирования отклика детектора физической установки. Это позволяет более эффективно использовать сгенерированные события в процессе анализа данных экспериментов на БАК. На Рисунке 1 показано место MCDB и HepML в автоматизации цепочки моделирования событий в эксперименте CMS. MCDB и HepML в этой схеме использованы для описания и хранения событий, смоделированных экспертами с помощью генераторов уровня матричных элементов, и дальнейшего доступа к этим событиям в цепочке обработки данных, в том числе из распределённой вычислительной среды. Это

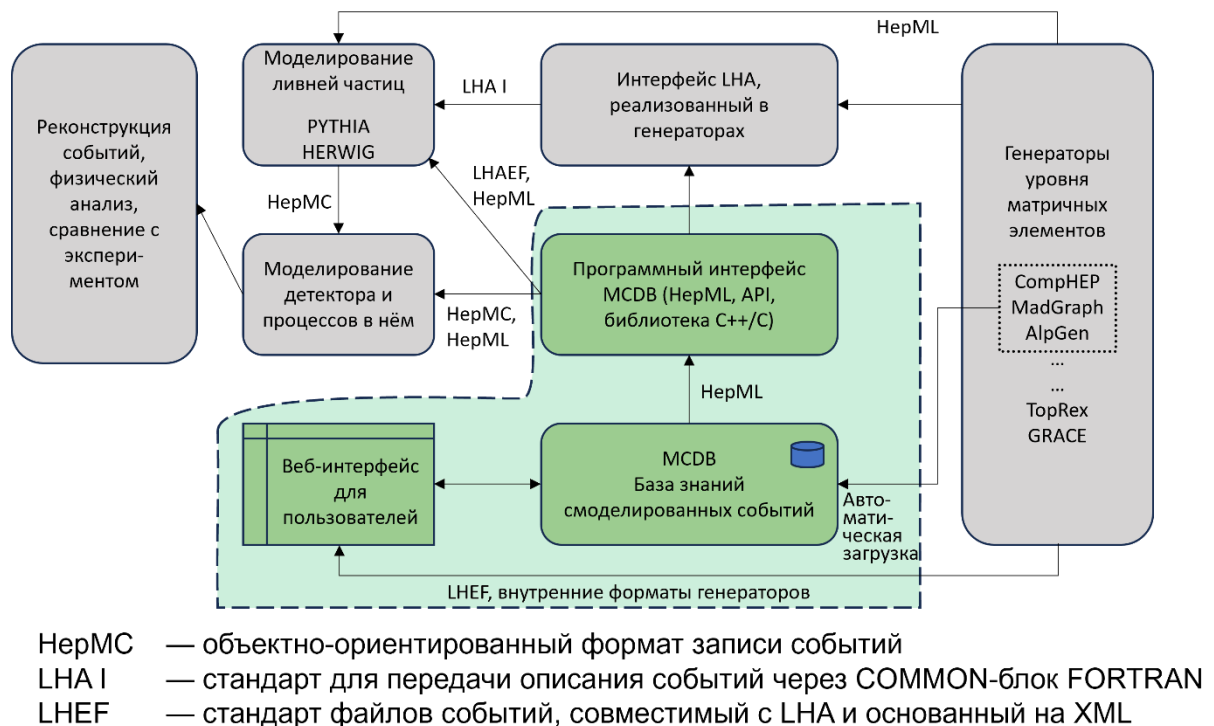


Рисунок 1 – Использование MCDB и HepML в цепочке моделирования событий эксперимента CMS.

позволило автоматизировать указанный участок цепочки моделирования.

Основные результаты исследования, изложенные в Главе 2, опубликованы в работах [A1-A3].

В третьей главе «Мониторинг передачи данных и анализ их востребованности» рассматриваются процессы передачи и доступа к данным физического эксперимента, предлагаются подходы к организации масштабируемой системы мониторинга передачи данных и практическая реализация мониторинга с использованием технологий Больших данных.

Рассматривается задача анализа востребованности наборов данных в эксперименте ATLAS и реализующий её комплекс программ.

При моделировании и анализе данных в таком крупном физическом эксперименте, как ATLAS, за сутки могут выполняться миллионы вычислительных задач. В случае использования распределённой вычислительной среды это означает необходимость осуществлять не меньшее количество передач файлов (входные и выходные данные). Со временем компьютерная инфраструктура планово расширяется, и количество выполняемых задач и передач данных только растёт. В процессе передачи каждого файла в системе возникает несколько информационных сообщений – на каждое связанное с передачей событие (начало, окончание, ошибки, перезапуск передачи и т.д.). Поэтому процессы передачи данных производят достаточно интенсивный поток сообщений. В проекте WLCG (Worldwide LHC Computing Grid) для мониторинга компьютеринга экспериментов на БАК успешно использовалась система Dashboard [A4], основанная на применении устоявшихся подходов и классических средств, таких как реляционные системы управления базами данных. К 2014 году стало понятно, что традиционный подход принципиально позволяет осуществлять оперативный мониторинг, однако запросы исторической информации на базе всего массива накопленных данных стали требовать всё большего времени. Таким образом, в связи с развитием вычислительной среды возникла потребность в масштабируемом решении для её мониторинга.

В проекте MONIT была реализована архитектура мониторинга UMA [A9], основанная на использовании программных решений из стека технологий Больших данных. На Рисунке 2 показана схема обработки данных, позволяющая создать масштабируемый мониторинг глобально распределённой системы. Исходные характеристики входных данных: более ста источников данных, порядка ста тысяч сообщений в секунду, около 3 Тбайт данных мониторинга в сутки. В рамках данной инфраструктуры был

реализован мониторинг передачи файлов эксперимента ATLAS, позволяющий получать как информацию в режиме реального времени, так и статистические срезы по различным параметрам. На Рисунке 3 показан пример визуализации информации о передачах файлов, сгруппированной по используемым технологиям доступа (верхний ряд) и по странам (нижний ряд).

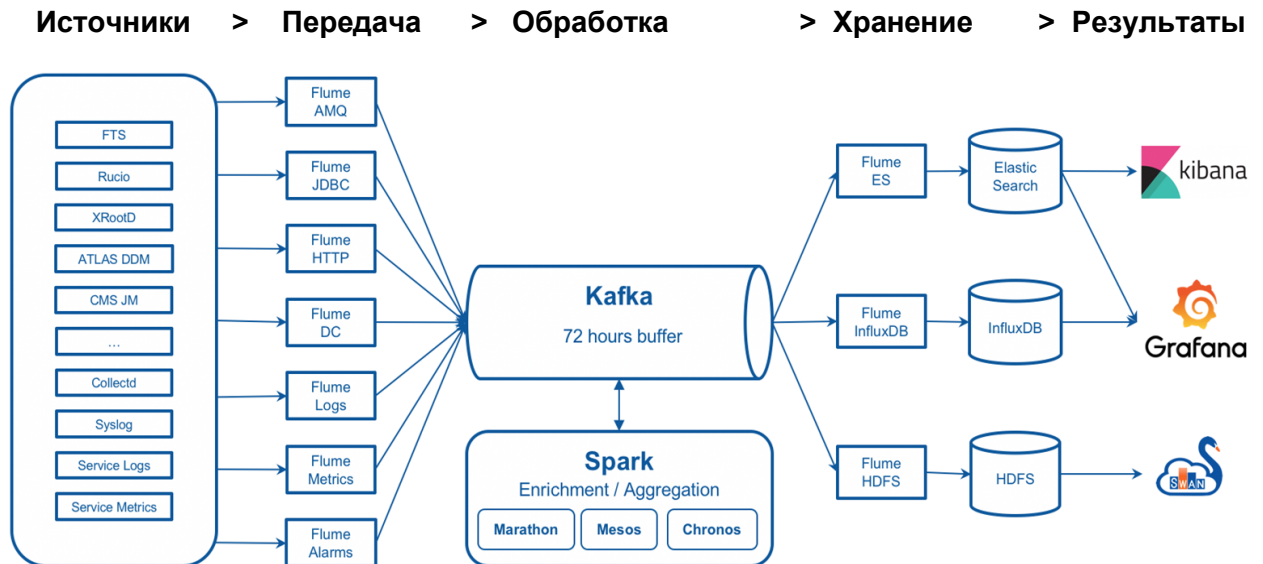


Рисунок 2 – Схема обработки информации мониторинга, использующая технологии Больших данных [A9].

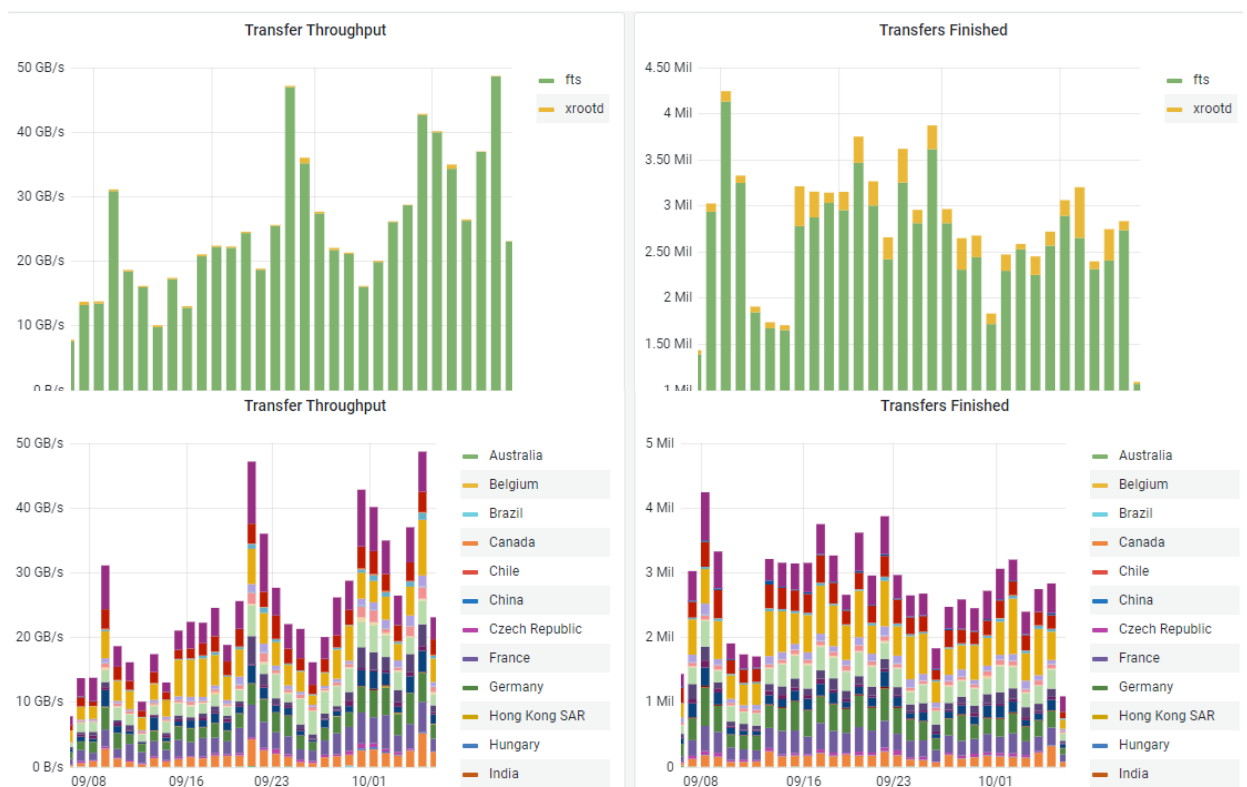


Рисунок 3 – Пример мониторинга передачи данных в ATLAS: общая скорость и число осуществлённых передач.

Модель распределённых вычислений эксперимента ATLAS предполагает хранение нескольких копий данных (реплик) в зависимости от их класса в различных вычислительных центрах и на различных типах хранилищ для их последующей обработки. По мере интенсивного накопления данных хранилища заполняются и возникает вопрос о выборе стратегии репликации и управления данными в зависимости от характеристик обращения к ним на различных ресурсах хранения. Таким образом, появляется потребность в инструменте для анализа востребованности данных различного типа. Под «востребованностью данных» (в английской литературе используется устоявшийся термин «data popularity») понимается мера, вычисляемая с помощью специальных алгоритмов в зависимости от цели её использования, и учитывающая такие характеристики взаимодействия с данными, как число и характер обращений, частота доступа к данным, время последнего обращения и т.п.

Был создан комплекс программ, реализующий регулярную автоматическую подготовку сведений о востребованности наборов данных в зависимости от типа и места их хранения.

Анализ востребованности данных производится в несколько этапов:

- загрузка метаданных из DQ2 и Rucio (системы управления данными);
- получение полной информации о событиях доступа к данным;
- обработка сведений о репликах, правилах хранения и хранилищах;
- унификация информации;
- фильтрация и объединение данных о событиях доступа с информацией о наборах и типах данных, репликах, правилах и вычислительных центрах;
- подготовка отчётов (диаграммы, таблицы, списки наборов данных).

Инфраструктура системы анализа состоит из следующих компонентов:

- кластер Hadoop;
- программный пакет для анализа (на языке сценариев Pig Latin);

- запуск и поддержание работы
 - вспомогательные программы подготовки данных (на языке Python);
 - программный пакет PigRunner для запуска сценария обработки на кластере;
 - авторизации в сетевом хранилище HDFS.
- управление и администрирование (система управления конфигурациями Puppet).

Созданный инструмент для анализа востребованности позволил исследовать влияние политик управления данными на динамику доступа к ним, а также, после подбора стратегии, более корректно оценить и спланировать обеспечение необходимых объёмов хранилища данных для эксперимента ATLAS после модернизации детектора и ускорителя БАК. На Рисунке 4 показан результат оптимизации политик репликации и хранения данных. В столбцах диаграммы указан объём данных, к которым не осуществлялся доступ, в зависимости от даты их записи в хранилища.

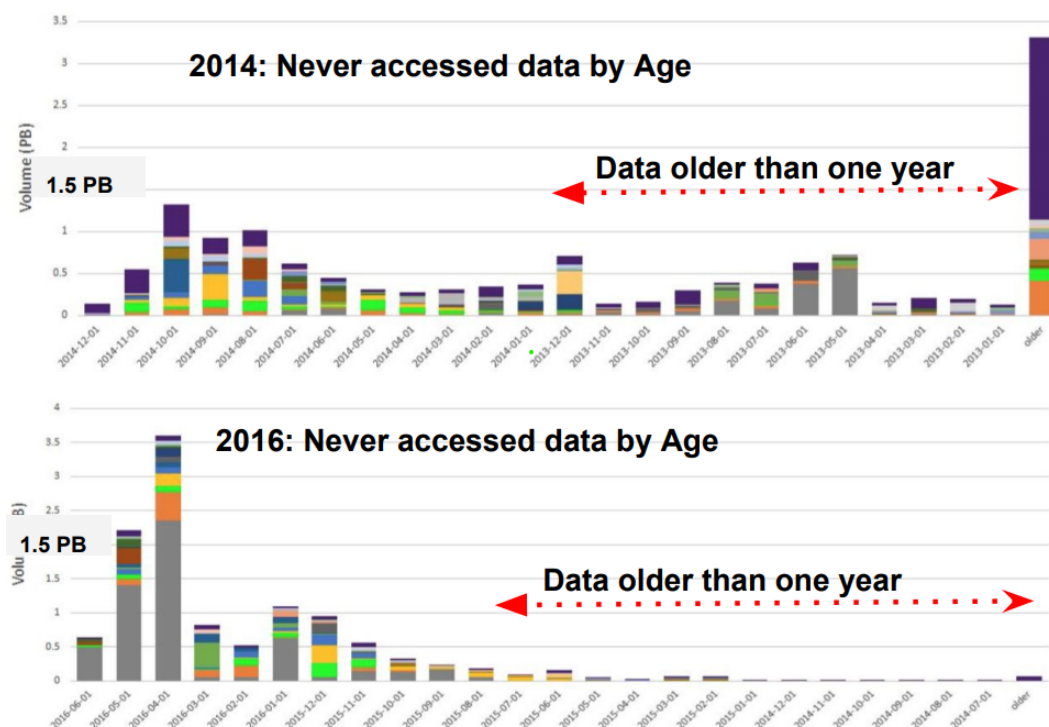


Рисунок 4 – Пример результата оптимизации политик репликации и хранения данных.

Источник: A Filipčič and for the ATLAS Collaboration 2017
J. Phys.: Conf. Ser. **898** 052015

Изменение политик репликации и хранения позволило освободить порядка 25% дискового пространства, занимаемого данными моделирования и анализа, что составило на момент проведения исследования около 30 Пбайт.

Основные результаты исследования, изложенные в Главе 3, опубликованы в работах [А4-А9].

Четвёртая глава «Платформенный подход к анализу научных данных и его применение» посвящена обобщению различных аспектов применения подходов анализа Больших данных и распределённых вычислений для решения задач исследования некоторых классов сложных систем. Рассматриваются архитектура и прототип аналитической платформы, предполагающей совместное использование указанных выше подходов. Приводятся практические результаты использования созданного прототипа для анализа рынка труда в России.

Подходы к анализу Больших данных в разных областях деятельности, несмотря на некоторые особенности, являются весьма схожими. Решения и методы для аналитики имеют широкое применение и могут быть успешно использованы в различных областях науки. Перспективным представляется платформенный подход к созданию программно-аппаратной среды, при котором имеются как базовые, инфраструктурные компоненты, общие для информационных потоков всех классов задач, так и специализированные сервисы, позволяющие улучшить характеристики (например, скорость или качество) получаемых в той или иной области научных и практических результатов.

Была предложена обобщенная архитектура автоматизированной аналитической системы (Рисунок 5) для решения задач, требующих как потоковой, так и пакетной обработки данных большого объёма либо имеющих большúю внутреннюю сложность, в том числе неявные связи. Для построения каждого функционального уровня платформы выбраны программные

продукты с открытым исходным кодом, прежде всего из стека технологий Больших данных.



Рисунок 5 – Обобщённая архитектура аналитической платформы.

На базе прототипа платформы было выполнено исследование российского рынка труда. Сбор основных исходных данных для исследования (резюме и объявлений о найме) осуществлялся из крупнейших информационных ресурсов, связанных с поиском и предложением работы (Работа России, HeadHunter, SuperJob). Был предложен и реализован метод смыслового сравнения документов, основанный на векторном представлении статистических языковых моделей, и позволяющий сопоставлять вакансии и резюме с одной стороны и профессиональные и образовательные стандарты с другой. Данный метод позволяет количественно оценить степень соответствия между требованиями работодателя, опытом и знаниями соискателя и существующими профессиональными стандартами, а также компетенциями выпускников вузов. Впоследствии указанный метод нашёл применение в анализе научных статей в системе подбора научных журналов, наиболее

подходящих для публикации результатов исследований по заданной тематике [A20].

На основе созданного прототипа информационно-аналитической системы совместно с МИА «Россия сегодня», ВНИИ Труда Минтруда РФ и РЭУ им. Г.В. Плеханова был создан социальный навигатор по профессиям и зарплатам в регионах России¹². С 2017 по 2024 год накоплено и обработано более 250 Тбайт данных о вакансиях и резюме. С применением машинного обучения и семантического анализа осуществляется сопоставление вакансий с более чем 1700 профессиями (по Справочнику профессий Минтруда РФ). Схема анализа данных, представленная на Рисунке 6, соответствует логике построения предложенной аналитической платформы.



Рисунок 6 – Схема анализа данных рынка труда.

Основные результаты исследования, изложенные в Главе 4, опубликованы в работах [A10-A20].

¹² Профессии, зарплаты, вузы: навигатор абитуриента 2022
<https://na.ria.ru/20220323/vuzy-1779514893.html>

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы.

В работе рассмотрено применение методов и технологий Больших данных для создания средств мониторинга передачи и анализа управления данными в распределённом компьютеринге эксперимента ATLAS. На примере эксперимента CMS показана возможность увеличения степени автоматизации и повышения качества Монте-Карло моделирования с использованием базы знаний сгенерированных событий и специализированного языка разметки. Проведено обобщение опыта создания систем сбора и анализа Больших данных и баз знаний. На этой основе создан прототип цифровой аналитической системы, с помощью которого проведено исследование рынка труда в масштабах России. Далее приведены наиболее значимые результаты исследования.

Основные результаты:

1. Разработаны методы и программные средства для масштабируемого мониторинга передачи данных эксперимента ATLAS в распределенной вычислительной среде.
2. Предложены и реализованы средства для описания метаданных моделирования в физике высоких энергий, позволившие автоматизировать цепочку моделирования. Разработан и реализован подход к созданию специализированной базы знаний смоделированных событий для использования в распределенной вычислительной среде. Созданная база знаний MCDB успешно применялась в официальной цепочке анализа эксперимента CMS, а язык разметки HepML используется программами-генераторами событий CompHEP и CalcHEP.
3. На базе инструментов аналитики Больших данных разработан метод анализа востребованности наборов данных в глобально распределенных хранилищах физического эксперимента ATLAS, позволивший провести оптимизацию политик репликации и хранения данных и тем самым

более эффективно использовать дисковое пространство вычислительных центров.

4. На основе обобщения методов и опыта создания программных систем для решения задач физики высоких энергий предложена архитектура и реализован прототип цифровой платформы для анализа сложных социально-экономических систем. С использованием этого прототипа решена задача по исследованию рынка труда в масштабах России.

Список основных публикаций автора по теме диссертационной работы

- A1. S. Belov, L. Dudko, D. Kekelidze, A. Sherstnev. HepML, an XML-based format for describing simulated data in high energy physics // Computer Physics Communications. – 2010. – Vol. 181. – №. 10. – P. 1758-1768. – DOI: [10.1016/j.cpc.2010.06.026](https://doi.org/10.1016/j.cpc.2010.06.026).
- A2. S. Belov, L. Dudko, E. Galkin, A. Gusev, W. Pokorski, A. Sherstnev. LCG MCDB — a knowledgebase of Monte-Carlo simulated events // Computer Physics Communications. – 2008. – Vol. 178. – №. 3. – P. 222-229. – DOI: [10.1016/j.cpc.2007.08.010](https://doi.org/10.1016/j.cpc.2007.08.010).
- A3. J. Alwall, A. Ballestrero, P. Bartalini, S. Belov, E. Boos, A. Buckley et al. A Standard format for Les Houches event files // Computer Physics Communications. – 2007. – Vol. 176. – №. 4. – P. 300-304. – DOI: [10.1016/j.cpc.2006.11.010](https://doi.org/10.1016/j.cpc.2006.11.010).
- A4. J. Andreeva, S. Belov, A. Berejnoj et al. Dashboard for the LHC experiments. // Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2008. – Vol. 119. – №. 6. – P. 062008. – DOI: [10.1088/1742-6596/119/6/062008](https://doi.org/10.1088/1742-6596/119/6/062008).
- A5. J. Andreeva, M. Boehm, S. Belov, J. Casey et al. Job monitoring on the WLCG scope: Current status and new strategy. // Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2010. – Vol. 219. – №. 6. – P. 062002. – DOI: [10.1088/1742-6596/219/6/062002](https://doi.org/10.1088/1742-6596/219/6/062002).

- A6. J. Andreeva, A. Beche, S. Belov, I. Kadochnikov, P. Saiz, D. Tuckett. WLCG Transfers Dashboard: a Unified Monitoring Tool for Heterogeneous Data Transfers. // Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2014. – Vol. 513. – №. 3. – P. 032005. – DOI: [10.1088/1742-6596/513/3/032005](https://doi.org/10.1088/1742-6596/513/3/032005).
- A7. J. Andreeva, A. Beche, S. Belov, D. Diguez Arias et al., Monitoring of large-scale federated data storage: XRootD and beyond // Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2014. – Vol. 513. – №. 3. – P. 032004. – DOI: [10.1088/1742-6596/513/3/032004](https://doi.org/10.1088/1742-6596/513/3/032004).
- A8. J. Andreeva, A. Beche, S. Belov, I. Dzhunov et al., Processing of the WLCG monitoring data using NoSQL // Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2014. – Vol. 513. – №. 3. – P. 032048. – DOI: [10.1088/1742-6596/513/3/032048](https://doi.org/10.1088/1742-6596/513/3/032048).
- A9. A. Aimar, A. Aguado Corman, P. Andrade, S. Belov, J. Delgado Fernandez et al., Unified Monitoring Architecture for IT and Grid Service // Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2017. – Vol. 898. – №. 9. – P. 092033. – DOI: [10.1088/1742-6596/898/9/092033](https://doi.org/10.1088/1742-6596/898/9/092033).
- A10. S.D. Belov, I.A. Filozova, I.S. Kadochnikov, V.V. Korenkov, R.N. Semenov, P.V. Zrelov. Automated system to monitor and predict matching of higher vocational education programs with labour market // CEUR Workshop Proceedings. – 2017. – Vol. 2023. – P. 98-104.
- A11. S. Belov, I. Filozova, I. Kadochnikov, V. Korenkov, R. Semenov, P. Smelov, P. Zrelov. Labour market monitoring system // CEUR Workshop Proceedings. – 2018. – Vol. 2267. – P. 528-532.
- A12. J. Javadzade, S. Belov. Data gathering and analysis for the monitoring of the Russian labour market // CEUR Workshop Proceedings. – 2018. – Vol. 2267. – P. 549-552.
- A13. Валентей С.Д., Зрелов П.В., Кореньков В.В., Белов С.Д., Кадочников И.С. Мониторинг соответствия профессионального образования потребностям рынка труда // Общественные науки и

- современность. – 2018. – №. 3. – С. 5-16. –
DOI: [10.7868/S0869049918030012](https://doi.org/10.7868/S0869049918030012).
- A14. S.D. Belov, J.N. Javadzade, I.S. Kadochnikov, V.V. Korenkov, P.V. Zrelov. Big data technologies for labour market analysis // CEUR Workshop Proceedings. – 2019. – Vol. 2507. – P. 469-472.
- A15. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2019620680 Российская Федерация. База данных вакансий и резюме на рынке труда: № 2019620246: заявл. 28.02.2019: опублик. 26.04.2019 / П.А. Смелов, С.Д. Белов, В.А. Изварина [и др.]; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский экономический университет имени Г.В. Плеханова».
- A16. S. D. Belov, I. S. Kadochnikov, V. V. Korenkov, P. V. Zrelov. Intellectual texts processing in socio-economic applications. // CEUR Workshop Proceedings. – 2020. – Vol. 2772. – P. 65-71.
- A17. S. Belov, I. Kadochnikov, V. Korenkov, A. Reshetnikov, R. Semenov, P. Zrelov. Data Analysis Platform for Stream and Batch Data Processing on Hybrid Computing Resources. // CEUR Workshop Proceedings. – 2021. – Vol. 3041. – P. 174-179. – DOI: [10.54546/MLIT.2021.31.67.001](https://doi.org/10.54546/MLIT.2021.31.67.001).
- A18. S.D. Belov, A.V. Ilina, J.N. Javadzade, I.S. Kadochnikov, V.V. Korenkov, I.S. Pelevanyuk, V.A. Tarabrin, P.V. Zrelov and R.N. Semenov. Analytical platform for socio-economic studies. // CEUR Workshop Proceedings. – 2021. – Vol. 3041. – P. 619-623. – DOI: [10.54546/MLIT.2021.81.99.001](https://doi.org/10.54546/MLIT.2021.81.99.001).
- A19. A.V. Ilina, S. Belov, I. Filozova, Y. Gavrilenko, J. Javadzade, I. Kadochnikov, V. Korenkov, I. Pelevanyuk, D. Priakhina, R. Semenov, V. Tarabrin and P. Zrelov. Methods and algorithms of the analytical platform for analyzing the labor market and the compliance of the higher education system with market needs. // Proceedings of Science. – 2022. – Vol. 429. – Conf. DLCP2022. – DOI: [10.22323/1.429.0028](https://doi.org/10.22323/1.429.0028).

A20. M. Balakin, S. Belov, P. Zrelov. Simple Journal Adviser for Scientific Articles. // Physics of Particles and Nuclei. – 2024. – Vol. 55. – № 3, P. 572-575. – DOI: [10.1134/S1063779624030080](https://doi.org/10.1134/S1063779624030080).