

СИСТЕМЫ И СРЕДСТВА ИНФОРМАТИКИ

**Научный журнал Российской академии наук
(издается под руководством Отделения нанотехнологий
и информационных технологий РАН)**

Издается с 1989 года
Журнал выходит ежеквартально

Учредитель:
**Федеральный исследовательский центр
«Информатика и управление» Российской академии наук**

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

академик РАН И. А. Соколов — председатель Редакционного совета
академик РАН Г. И. Савин
академик РАН А. Л. Слемпковский
член-корреспондент РАН Ю. Б. Зубарев
профессор Ш. Долев (S. Dolev, Beer-Sheva, Israel)
профессор Ю. Кабанов (Yu. Kabanov, Besancon, France)
профессор М. Никулин (M. Nikulin, Bordeaux, France)
профессор В. Ротарь (V. Rotar, San-Diego, USA)
профессор М. Финкельштейн (M. Finkelstein, Bloemfontein, South Africa)

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

академик РАН И. А. Соколов — главный редактор
профессор, д.ф.-м.н. С. Я. Шоргин — заместитель главного редактора
д.т.н. В. Н. Захаров д.ф.-м.н. В. И. Сеницын
проф., д.ф.-м.н. А. И. Зейфман проф., д.т.н. И. Н. Сеницын
проф., д.т.н. В. Д. Ильин проф., д.ф.-м.н. В. Г. Ушаков
проф., д.т.н. К. К. Колин к.ф.-м.н. А. К. Горшенин — отв. секретарь
проф., д.ф.-м.н. В. Ю. Королев к.ф.-м.н. С. А. Христочевский
проф., д.г.-м.н. Р. Б. Сейфуль-Мулюков

Редакция

профессор, д.г.-м.н. Р. Б. Сейфуль-Мулюков
к.ф.-м.н. Е. Н. Арутюнов
С. Н. Стригина

© Федеральный исследовательский центр «Информатика
и управление» Российской академии наук, 2019

Журнал включен в базу данных Russian Science Citation Index (RSCI),
интегрированную с Web of Science

Журнал входит в систему Российского индекса научного цитирования (РИНЦ)

Журнал включен в базу данных CrossRef (систему DOI — Digital Object Identifier),
в базу данных Ulrich's periodicals directory
и в информационную систему «Общероссийский математический портал Math-Net.Ru»

Журнал реферируется в «Реферативном журнале» ВИНИТИ
и в системе Google Scholar

Журнал включен в сформированный Минобрнауки России Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук

<http://www.ipiran.ru/journal/collected>

СИСТЕМЫ И СРЕДСТВА ИНФОРМАТИКИ

Том 29 № 1 Год 2019

СОДЕРЖАНИЕ

Методы защиты от массового вывода из строя слабозащищенных компьютеров цифровой экономики А. А. Грушо, Н. А. Грушо, Е. Е. Тимонина	4
Технологические аспекты обеспечения информационной безопасности финансового рынка в условиях цифровой трансформации экономики России А. А. Зацаринный, В. И. Королёв	12
Система научных сервисов как актуальный компонент научных исследований А. А. Зацаринный, В. А. Кондрашев, А. П. Сучков	25
Функциональная структура гибридной интеллектуальной многоагентной системы гетерогенного мышления для решения проблемы восстановления распределительной электросети А. В. Колесников, С. В. Листопад	41
Информационная поддержка интеграционной платформы многомасштабного моделирования К. К. Абгарян, Е. С. Гаврилов	53
Способ повышения пропускной способности пакетных коммутаторов на основе интегрированных сетевых процессоров В. Б. Егоров	63
Виды неоднородностей в структуре генерализации геоданных Д. А. Никишин	74
Интернет-каталог Библиотеки по естественным наукам Российской академии наук как специальная информационно-поисковая система, ориентированная на квалифицированного пользователя С. А. Власова, Н. Е. Каленов	86
Математическая модель задачи защиты растений в биосистеме типа «вредные насекомые – полезные насекомые» с произвольными трофическими функциями Р. Н. Одинаев	96

СИСТЕМЫ И СРЕДСТВА ИНФОРМАТИКИ

Том 29 № 1 Год 2019

СОДЕРЖАНИЕ

Аналитическое моделирование процессов в вольтерровских стохастических системах методом канонических разложений <i>И. Н. Сеницын, В. И. Сеницын</i>	109
Алгоритмическое решение проблемы оптимального управления в динамической односекторной экономической модели с дискретным временем на основе метода динамического программирования <i>П. В. Шнурков, А. О. Рудак</i>	128
Условные границы средних максимумов случайных величин и их достижимость <i>Д. В. Иванов</i>	140
О вычислительной избыточности метода дихотомии и условной минимизации унимодальных функций методом экономной дихотомии <i>В. А. Коднянко</i>	164
Априорное вейбулловское распределение в байесовских моделях баланса <i>Е. Н. Арутюнов, А. А. Кудрявцев, А. И. Титова</i>	174
Информационные трансформации параллельных текстов в задачах извлечения знаний <i>А. А. Гончаров, И. М. Зацман</i>	180
Единая технология поддержки конкретно-исторических исследований <i>И. М. Адамович, О. И. Волков</i>	194
Некоторые аспекты автоматизации поиска и анализа веб-текстов экстремистской семантики <i>М. М. Шарнин, И. В. Галина</i>	206
Об авторах	218
Правила подготовки рукописей статей	221
Requirements for manuscripts	225

МЕТОДЫ ЗАЩИТЫ ОТ МАССОВОГО ВЫВОДА ИЗ СТРОЯ СЛАБОЗАЩИЩЕННЫХ КОМПЬЮТЕРОВ ЦИФРОВОЙ ЭКОНОМИКИ*

А. А. Грушо¹, Н. А. Грушо², Е. Е. Тимонина³

Аннотация: Развитие цифровой экономики порождает новые угрозы информационной безопасности. Серьезный экономический ущерб малому и среднему бизнесу может нанести массовый вывод из строя слабозащищенных компьютеров. В статье рассматриваются некоторые варианты реализации таких угроз. Предложено два подхода к построению защиты от массового вывода из строя слабозащищенных компьютеров цифровой экономики. Первый подход связан с построением специализированного облака, предоставляющего сервисы информационной безопасности. Связь слабозащищенных компьютеров и выход в интернет осуществляются только через это облако. Второй подход основан на идее виртуализации компьютеров. Предложена специальная архитектура гостевых виртуальных машин. Доказано, что в определенных условиях предложенные решения предотвращают массовый вывод из строя слабозащищенных компьютеров цифровой экономики.

Ключевые слова: информационная безопасность; цифровая экономика; облачные вычислительные системы; виртуализация

DOI: 10.14357/08696527190101

1 Введение

Цифровая экономика предполагает массовое использование вычислительной техники в малом и среднем бизнесе. Предполагается, что через сеть (например, интернет) будут решаться задачи:

- организации и контроля поставок;
- контроля выполнения договорных обязательств;
- взаимодействия с налоговыми службами;
- выполнения обязательств по аренде и других обязательств.

При этом предполагается отказ от бумажного документооборота.

* Работа выполнена с частичной финансовой поддержкой РФФИ (проект 18-29-03081).

¹ Институт проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук, grusho@yandex.ru

² Институт проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук, info@itake.ru

³ Институт проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук, eltimon@yandex.ru

В решении указанных задач цифровой экономики важную роль играет проблема информационной безопасности. Рассмотрение проблемы информационной безопасности начинается с анализа угроз. Традиционно рассматриваются угрозы конфиденциальности, целостности и доступности информации [1]. К этим угрозам нужно добавить угрозу вывода из строя компьютерной техники. Предполагается, что в рассматриваемом классе малого и среднего бизнеса используются, как правило, обычные персональные компьютеры, аппаратная часть которых содержит микропроцессоры, оперативную память, контроллеры управления внешними устройствами. В таких компьютерах обычно используются одни и те же операционные системы, прикладные программы и базы данных. Выход в сеть организуется через программно-аппаратную систему доступа к сетевым услугам провайдера.

Существует целый ряд механизмов, реализующих перечисленные выше угрозы. Наиболее важный из них — вредоносный код [2, 3]. Необходимо выделить две главные особенности вредоносного кода:

- (1) возможность неоявления какой бы то ни было активности до появления специального сигнала;
- (2) нанесение ущерба с помощью реализации любой из указанных выше угроз.

В качестве примера можно привести бот-сети, которые используются для реализации DDoS-атак. Бот — это агент, который «не виден» для системы защиты информации в компьютере, но начинает порождать поток сообщений вонне по сигналу его центра управления.

Отметим следующую важную особенность компьютерной поддержки малого и среднего бизнеса. Почти одинаковые компьютеры могут быть заражены одинаковым вредоносным кодом, что порождает возможность массового вывода из строя слабозащищенных компьютеров цифровой экономики. Массовый вывод из строя компьютерной поддержки цифровой экономики может породить панику, которая парализует любую деловую активность, нанести большой экономический ущерб и потребовать для восстановления экономических связей больших затрат на приобретение техники и программного обеспечения.

Качественное обеспечение информационной безопасности [4, 5] требует больших затрат, что неприемлемо для малого и среднего бизнеса. Поэтому массовый вывод из строя слабозащищенных компьютеров цифровой экономики представляется важной актуальной проблемой. Далее в статье предлагается два способа ее решения.

2 Предотвращение массового вывода из строя компьютеров с помощью специального облака

Любое облако состоит из следующих трех компонентов:

- (1) вычислительные ресурсы, принадлежащие провайдеру;
- (2) множество клиентов, нуждающихся в сервисах, предоставляемых облаком;

- (3) сеть связи, позволяющая соединяться любому клиенту с точкой предоставления услуг облака.

Решение проблемы защиты от массового вывода из строя слабозащищенных компьютеров цифровой экономики может быть основано на сервисах безопасности, которые предоставляет публичное облако. Для простоты будем считать, что рассматриваемое облако предоставляет только сервисы безопасности, которые организованы следующим образом.

1. Каждый клиент может организовать любое соединение только через облако. При этом компьютер или корпоративная сеть малого или среднего бизнеса имеет единственный криптографически защищенный канал с точкой доступа к сервисам облака. Любые соединения, требуемые для ведения бизнеса, организованы с помощью единственных защищенных каналов с облаком так, что клиент запрашивает связь с требуемой организацией, а облако вызывает по защищенному каналу точку доступа вызываемой организации. Далее устанавливается соединение, которое может быть открытым в том смысле, что в облаке происходит расшифрование сообщения на ключе клиента и зашифрование на ключе вызываемой организации. Это решение является упрощением решения [4]. Другим вариантом выступает защищенное соединение, когда с помощью открытых ключей вырабатывается общий ключ защищаемого соединения, а облако служит транзитным узлом в обмене зашифрованными сообщениями опять же по единственному каналу для каждого хоста.
2. Очень важный сервис — выход клиента в интернет с помощью защищенного доступа к облаку. В этом случае в облаке расшифровываются запросы клиента и осуществляется выход в интернет по этим запросам от имени облака. Результаты взаимодействия облака с интернетом по защищенному каналу передаются клиенту. При этом облако защищает клиента с помощью:
 - полноценных сервисов DMZ (demilitarized zone) для контроля передаваемых клиенту программ;
 - антивирусных программ;
 - систем обнаружения вторжений — IDS (Intrusion Detection System);
 - систем предотвращения вторжений — IPS (Intrusion Prevention System);
 - глубокого анализа пакетов — DPI (Deep Packet Inspection);
 - предотвращения потери данных — DLP (Data Lost Prevention).

Указанные стандартные методы защиты снижают опасность атак на компьютеры малого и среднего бизнеса. Однако они не решают проблему защиты от массового вывода из строя компьютеров цифровой экономики. Для решения этой проблемы в облаке создается полигон, эмулирующий компьютерные системы малого и среднего бизнеса. Этот полигон можно рассматривать как «ловушку»

(Honey Pot) для сигнала по выводу из строя компьютеров малого и среднего бизнеса.

Ясно, что сигнал на массовый вывод из строя компьютеров также вызовет соответствующую реакцию на специально построенном полигоне [6]. Это позволит блокировать сигналы, поступающие из глобальной сети, в частности из интернета. Если этот сигнал будет выявлен от одного или нескольких клиентов, то эти клиенты будут заблокированы. Таким образом реализуется решение о предотвращении массового вывода из строя слабозащищенных компьютеров малого и среднего бизнеса цифровой экономики.

3 Предотвращение массового вывода из строя компьютеров с помощью систем виртуализации

Рассматриваемый в этом разделе метод защиты основан на специальной архитектуре компьютеров [7, 8], имеющих сетевые взаимодействия.

Условно система виртуализации построена следующим образом. С аппаратной частью компьютера общается гипервизор, управляемый выделенной операционной системой. Через гипервизор с аппаратной платформой общаются гостевые операционные системы.

Для решения рассматриваемой проблемы предполагается наличие трех гостевых машин (операционных систем):

- (1) первая гостевая машина имеет свободный выход в глобальную сеть и запускается каждый раз из чистого образа;
- (2) вторая гостевая машина служит для электронного документооборота, связанного с бизнес-процессами;
- (3) третья гостевая машина реализует криптографические преобразования на текущих ключах, связанных по бизнесу организаций.

Взаимодействие между первой и второй машинами осуществляется только через третью машину. Все три гостевые машины имеют независимые области памяти. Таким образом, бизнес-документация не пересекается с открытой информацией из глобальной сети. Вся бизнес-документация должна иметь резервные копии на внешних носителях.

Защищенность от массового вывода из строя слабозащищенных компьютеров малого и среднего бизнеса цифровой экономики основана прежде всего на трудности проблемы захвата гипервизора и проникновения из одной гостевой машины в другую [7, 9, 10].

В предположении о невозможности массового захвата гипервизоров различных компьютеров защищенность обосновывается следующим образом. Непосредственная подача команды на вывод из строя компьютеров через интернет выводит из строя гостевые машины первого типа. Если команда на вывод из строя исходит от одного или нескольких гостевых компьютеров второго типа, то поражение локализуется в этих гостевых компьютерах, реализующих непосредственную связь

с источником сигнала на разрушение. Такие машины могут передавать сигнал тревоги через глобальную сеть с призывом блокировать соединение с источниками сигнала на разрушение. Поскольку атакуемых машин ограниченное число, то угроза массового вывода из строя будет локализована. При этом резервные копии позволят восстановить значительную часть испорченных данных.

4 Заключение

В статье рассмотрены два случая возможности массового вывода из строя слабозащищенных компьютеров малого и среднего бизнеса цифровой экономики с помощью сигналов из глобальной сети или отдельных компьютеров, содержащих вредоносный код. Первый метод основан на создании связанных между собой региональных открытых облаков, предоставляющих сервисы безопасности малому и среднему бизнесу. Второй метод основан на массовом внедрении в компьютеры архитектуры виртуальных машин, ограничивающих возможности вредоносного кода получать или транслировать сигналы массового вывода из строя слабозащищенных компьютеров малого и среднего бизнеса цифровой экономики. При этом можно использовать слабую криптографию с часто меняющимися ключами.

Конечно, возможно другими способами передавать сигналы вредоносному коду, находящемуся в микропроцессорах. Например, это могут быть специальные радиосигналы. Здесь также возможны меры противодействия, которые будут рассматриваться в других работах.

Литература

1. Грушо А. А., Применко Э. А., Тимонина Е. Е. Теоретические основы компьютерной безопасности. — М.: Академия, 2009. 272 с.
2. Тимонина Е. Е. Анализ угроз скрытых каналов и методы построения гарантированно защищенных распределенных автоматизированных систем: Дис. . . . докт. техн. наук. — М., 2004. 204 с.
3. Грушо А. А., Грушо Н. А., Тимонина Е. Е. Методы защиты информации от атак с помощью скрытых каналов и враждебных программно-аппаратных агентов в распределенных системах // Вестник РГГУ. Сер. Документоведение и архивоведение. Информатика. Защита информации и информационная безопасность, 2009. Т. 10. С. 33–45.
4. Grusho A. A., Timonina E. E., Shorgin S. Ya. Modelling for ensuring information security of the distributed information systems // 31th European Conference on Modelling and Simulation Proceedings. — Dudweiler, Germany: Digitaldruck Pirrot GmbH, 2017. P. 656–660. http://www.scs-europe.net/dlib/2017/ecms2017acceptedpapers/0656-probstat_ECMS2017_0026.pdf.
5. Грушо А. А., Грушо Н. А., Тимонина Е. Е. Синтез архитектуры информационной безопасности в распределенных информационно-вычислительных системах // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы, 2017. № 2. С. 16–22.

6. *Grusho A., Grusho N., Timonina E.* Detection of anomalies in non-numerical data // 8th Congress (International) on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops Proceedings. — Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2016. P. 273–276. <https://ieeexplore.ieee.org/document/7765370>.
7. *Грушо А. А., Грушо Н. А., Тимонина Е. Е., Шоргин С. Я.* Возможности построения безопасной архитектуры для динамически изменяющейся информационной системы // Системы и средства информатики, 2015. Т. 25. № 3. С. 78–93.
8. *Грушо А. А., Грушо Н. А., Левыкин М. В., Тимонина Е. Е.* Безопасные архитектуры распределенных информационно-вычислительных систем на основе комплексной виртуализации // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы, 2016. № 4. С. 32–35.
9. *Грушо А. А., Грушо Н. А., Тимонина Е. Е.* Оценка защищенности в безопасных архитектурах распределенных информационных систем // Системы и средства информатики, 2016. Т. 26. № 4. С. 31–37.
10. *Грушо Н. А., Сенчило В. В.* Моделирование безопасных архитектур распределенных информационно-вычислительных систем на основе комплексной виртуализации // Системы и средства информатики, 2018. Т. 28. № 1. С. 110–122.

Поступила в редакцию 27.01.19

METHODS OF PROTECTION AGAINST MASS INACTIVATION OF LOW PROTECTED COMPUTERS OF DIGITAL ECONOMY

A. A. Grusho, N. A. Grusho, and E. E. Timonina

Institute of Informatics Problems, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119133, Russian Federation

Abstract: Development of digital economy generates new threats of information security. The serious economic damage to small and medium business can put mass inactivation of low protected computers. The paper deals with certain ways to prevent such vulnerabilities. Two approaches of creation of protection against mass inactivation of low protected computers of digital economy are suggested. The first approach is connected with creation of a specialized cloud, providing services of information security. Communication of low protected computers through Internet connection is carried out only through this cloud. The second approach is based on the idea of virtualization of computers. The special architecture of guest virtual machines is suggested. It is proved that in certain conditions, the proposed solutions prevent mass inactivation of low protected computers of digital economy.

Keywords: information security; digital economy; cloudy computing systems; virtualization

DOI: 10.14357/08696527190101

Acknowledgments

The paper was supported by the Russian Foundation for Basic Research (project 18-29-03081).

References

1. Grusho, A., Ed. Primenko, and E. Timonina. 2009. *Teoreticheskie osnovy komp'yuternoy bezopasnosti* [Theoretical bases of computer security]. Moscow: Academy. 272 p.
2. Timonina, E. E. 2004. Analiz ugroz skrytykh kanalov i metody postroeniya garantirovanno zashchishchennykh raspredelennykh avtomatizirovannykh sistem [The analysis of threats of covert channels and methods of creation of guaranteed protected distributed automated systems]. Moscow. D.Sc. Diss. 204 p.
3. Grusho, A., N. Grusho, and E. Timonina. 2009. Metody zashchity informatsii ot atak s pomoshch'yu skrytykh kanalov i vrazhdebnykh programmno-apparatnykh agentov v raspredelennykh sistemakh [Methods of information protection against covert channels attacks and malicious software/hardware agents in distributed systems]. *Vestn. RGGU. Ser. Dokumentovedenie i arkhivovedenie. Informatika. Zashchita informatsii i informatsionnaya bezopasnost'* [RGGU Bull. Ser. Document science and archive science. Informatics. Information security and information security] 10:33–45.
4. Grusho, A. A., E. E. Timonina, and S. Ya. Shorgin. 2017. Modelling for ensuring information security of the distributed information systems. *31th European Conference on Modelling and Simulation Proceedings*. Digitaldruck Pirrot GmbH Dudweiler, Germany. 656–660. Available at: http://www.scs-europe.net/dlib/2017/ecms2017acceptedpapers/0656-probstat_ECMS2017_0026.pdf (accessed January 27, 2019).
5. Grusho, A. A., N. A. Grusho, and E. E. Timonina. 2017. Information security architecture synthesis in distributed information computation systems. *Autom. Control Comp. S.* 51(8):799–804.
6. Grusho, A., N. Grusho, and E. Timonina. 2016. Detection of anomalies in non-numerical data. *8th Congress (International) on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops Proceedings*. Piscataway, NJ: IEEE. 273–276. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7765370> (accessed January 27, 2019).
7. Grusho, A., N. Grusho, E. Timonina, and S. Shorgin. 2015. Vozmozhnosti postroeniya bezopasnoy arkhitektury dlya dinamicheski izmenyayushchey informatsionnoy sistemy [Possibilities of secure architecture creation for dynamically changing information systems]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 25(3):78–93.
8. Grusho, A. A., N. A. Grusho, M. V. Levykin, and E. E. Timonina. 2016. Bezopasnye arkhitektury raspredelennykh informatsionno-vychislitel'nykh sistem na osnove kompleksnoy virtualizatsii [Secure architecture of distributed information systems on the basis of integrated virtualization]. *Problemy informatsionnoy bezopasnosti. Komp'yuternye sistemy* [Problems of Information Security. Computer Systems] 4:32–35.
9. Grusho, A. A., N. A. Grusho, and E. E. Timonina. 2016. Otsenka zashchishchennosti v bezopasnykh arkhitekturakh raspredelennykh informatsionnykh sistem [Security eval-

- uation in secure architecture of distributed information systems]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 26(4):31–37.
10. Grusho, N. A., and V. V. Senchilo. 2018. Modelirovanie bezopasnykh arkhitektur raspredelennykh informatsionno-vychislitel'nykh sistem na osnove kompleksnoy virtualizatsii [Modeling of secure architecture of distributed information systems on the basis of integrated virtualization]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 28(1):110–122.

Received January 27, 2019

Contributors

Grusho Alexander A. (b. 1946) — Doctor of Science in physics and mathematics, professor, principal scientist, Institute of Informatics Problems, Federal Research Center “Computer Sciences and Control” of the Russian Academy of Sciences; 44-2 Vavilov Str., Moscow 119133, Russian Federation; grusho@yandex.ru

Grusho Nikolai A. (b. 1982) — Candidate of Science (PhD) in physics and mathematics, senior scientist, Institute of Informatics Problems, Federal Research Center “Computer Sciences and Control” of the Russian Academy of Sciences; 44-2 Vavilov Str., Moscow 119133, Russian Federation; info@itake.ru

Timonina Elena E. (b. 1952) — Doctor of Science in technology, professor, leading scientist, Institute of Informatics Problems, Federal Research Center “Computer Sciences and Control” of the Russian Academy of Sciences; 44-2 Vavilov Str., Moscow 119133, Russian Federation; eltimon@yandex.ru

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ФИНАНСОВОГО РЫНКА В УСЛОВИЯХ ЦИФРОВОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ ЭКОНОМИКИ РОССИИ*

А. А. Зацаринный¹, В. И. Королёв²

Аннотация: Финансовый рынок представлен как объект защиты, функционирующий в экономической сфере в условиях правовых отношений. Выполнен анализ и предложена структура цифровой экономики. Структурирован инструментальный уровень реализации экономических процессов — «платформы и технологии». Рассмотрен характер новых вызовов и проблем обеспечения информационной безопасности при цифровой трансформации. Предложены базовые подходы к обеспечению информационной безопасности в условиях сетевых архитектур операционных и информационно-аналитических систем финансового рынка: аналитические системы безопасности и системы ситуационных центров (ССЦ).

Ключевые слова: финансовый рынок; цифровая экономика; информационная безопасность; экономическая безопасность; угроза безопасности; система обнаружения вторжений; ситуационный центр

DOI: 10.14357/08696527190102

1 Финансовый рынок как объект защиты

Категория «финансовый рынок» — междисциплинарная категория, предметом деятельности которой являются как экономическая сфера, так и правовые отношения.

В Российской Федерации финансовый рынок принято называть национальным финансовым рынком. Фондовый, кредитный, валютный и другие рынки — по сути, сегменты национального финансового рынка. Предметная структура финансового рынка представлена на рис. 1.

Экономическая сфера деятельности предполагает наличие определенной институциональной структуры, обеспечивающей функционирование рынка.

Финансовый рынок как юридическая категория — система общественных отношений, в которой происходит мобилизация и перераспределение денежных

* Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты 18-29-03124 и 18-29-03081).

¹ Федеральное исследовательское учреждение «Информатика и управление» Российской академии наук, AZatsarinny@ipiran.ru

² Институт проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук; Финансовый университет при Правительстве РФ; Российская академия народного хозяйства и государственной службы при Президенте Российской Федерации, vkorolev@ipiran.ru

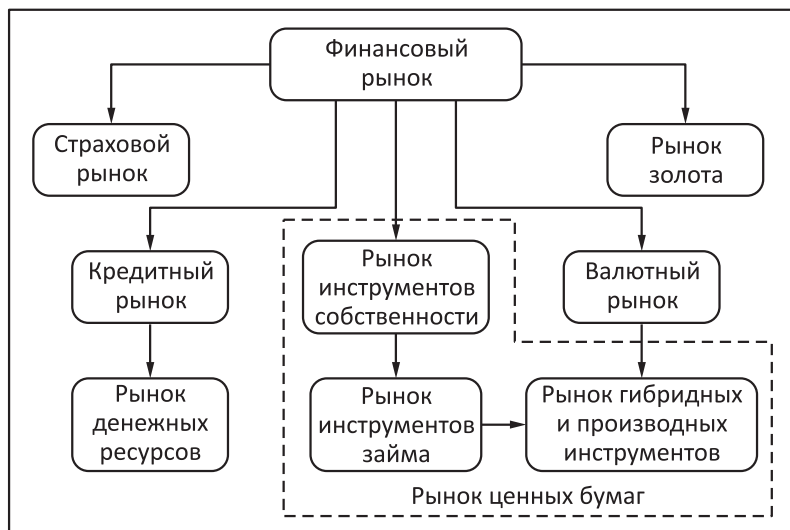


Рис. 1 Предметная структура финансового рынка

средств между субъектами воспроизводственных связей, выступающих объектом правового регулирования.

Процессорная платформа реализации современного финансового рынка — платформа функционирования цифровых информационных технологий (ИТ).

Совокупность перечисленных компонентов определяет финансовый рынок как объект защиты.

Такой подход позволяет сформулировать определение финансового рынка как объекта защиты:

Финансовый рынок — совокупность институтов, финансовых инструментов, инфраструктуры и экономических отношений, обеспечивающих перераспределение свободного денежного капитала от владельцев к пользователям этого капитала. При этом инфраструктура рассматривается как в аспекте экономических отношений, так и с точки зрения технологической реализации процессов деятельности.

Исходя из этих предпосылок, рассмотрим на концептуальном уровне технологические аспекты реализации финансового рынка и обеспечения его безопасности в условиях цифровой трансформации экономики.

2 Представление цифровой экономики с позиций цифровых технологий

В соответствии с программой «Цифровая экономика Российской Федерации» [1] создание необходимых условий для развития цифровой экономики является государственной приоритетной задачей.

Цифровые технологии широко и эффективно используются в сфере финансово-кредитной деятельности. Вся операционная среда банковской деятельности фактически перешла на «цифру», информационные технологии обеспечивают эффективный менеджмент финансово-банковской деятельности за счет создания информационно-аналитических систем. Однако новые эффективные функциональные и технологические возможности порождают новые вызовы и угрозы в части безопасности. Угрозы безопасности по своей природе и последствиям становятся все более критичными.

Цифровые технологии глубоко погружаются в процессы деятельности (бизнес-процессы, процессы управления, сервисные процессы), становятся их составной частью. Вследствие этого недостаточно предъявлять к ним традиционные требования по защите информации, следует иметь надежную обрабатывающую и функциональную среду. Ее необходимо либо изначально создавать абсолютно надежной, что практически невозможно ввиду ее сложности и природных свойств, либо постоянно поддерживать ее штатную работоспособность и надежность, что требует обеспечения мониторинга функционирования с выявлением аномалий и созданием методов и средств возвращения функционирования в штатное состояние.

В условиях цифровой трансформации экономики решение проблемы экономической безопасности все в большей степени переходит в область обеспечения информационной безопасности.

Изменения в экономических отношениях, связанные с цифровой трансформацией экономики, представлены структурой отношений на рис. 2.

Структура отражает положения программы «Цифровая экономика Российской Федерации» и учитывает решения, связанные с другими нормативными документами по экономической безопасности и системной инженерии. Она включает три взаимосвязанных реализационных уровня.

Два из этих уровней — **рынки и отрасли экономики** и **субъекты-среда экономической деятельности** — относятся непосредственно к предметной области экономической деятельности и экономической науки.

Третий уровень, **платформы и технологии**, — *инструментальный уровень реализации экономических процессов*. От вида и эффективности средств этого уровня зависит исполнительная эффективность реализации тех или иных экономических концепций, программ и моделей.

В качестве инструмента реализации экономической деятельности рассматриваются цифровые информационные технологии и «цифровизация» (компьютеризация, средства искусственного интеллекта, роботизация и т. д.) производства и бизнес-процессов.

Рассмотрим сегмент «платформы и технологии» (3-й уровень).

Базовым ресурсом сегмента «платформы и технологии» служат информационные ресурсы (ИР). Их современное состояние, прежде всего в части назначения при использовании в информационных технологиях, диктует выделение по крайней мере трех разделов:



Рис. 2 Структура представления цифровой экономики

- (1) **специальные ИР**, обеспечивающие автоматизацию бизнес-процессов, производственных и управленческих процессов, информационную поддержку принятия решений;
- (2) **предметные ИР**, обеспечивающие реализацию модельного искусственного интеллекта (аналитические модели по событиям и ситуациям, роботизация производства, управления, действий и пр.);
- (3) **ИР Big Data** — структурированные и неструктурированные данные больших объемов и значительного многообразия в предметной области экономической деятельности, которые могут стать источником информационной интервенции (*как конструктивной, так и отрицательной*) в процессах деятельности.

Следующий системный аспект связан с управлением, которое представляется как процессный экономический менеджмент. Процессный подход в менеджменте в общем виде включает функции планирования, мотивации, организации и контроля, объединенные с помощью коммуникационных связей и систем принятия решений. Вектор управления ориентирован на реальную экономическую деятельность, ее объекты — «умные» объекты и сервисы, обеспечивающие информатизацию и автоматизацию через ИТ, реализующие модельный искусственный интеллект, а также на регулирование информационной интервенции.

Особо следует остановиться на проблеме регулирования информационной интервенции. Новые технологии породили огромные массивы данных (Big Data), возможность их обрабатывать и эффективно использовать. Среди главных преимуществ больших данных для бизнеса можно выделить [2]:

- поиск новых источников дохода (56%);
- улучшение опыта клиентов (51%);
- новые продукты и услуги (50%);
- приток новых клиентов и сохранение лояльности старых (47%).

Big Data — новая парадигма хранения и обработки данных, требующая новых компетенций для поддержания и обслуживания технологии работы с ними. Кроме того, пока не существует единой методологии обеспечения безопасности больших данных, которую можно взять за основу разработки и внедрения системы управления безопасностью больших данных. Из-за существующих проблем компании вынуждены самостоятельно разрабатывать подходы к обеспечению безопасности Big Data [3]. Однако глубины проработки вопроса хотя бы уровня нормативов ИСО пока ни одна из них не достигла.

В сложившейся ситуации процесс работы с Big Data оправданно может ассоциироваться с информационной интервенцией, требующей регулирования.

Процессный экономический менеджмент в международной практике связан с управлением качеством функционирования организации и регулируется серией стандартов ИСО-9000.

Процессный экономический менеджмент в предложенной структуре осуществляется с учетом включения в процесс управления распределенных ситуационных центров, работающих с федеральными органами исполнительной власти и органами государственной власти субъектов Российской Федерации. Распределенные ситуационные центры в соответствии с положениями «Стратегии экономической безопасности Российской Федерации на период до 2030 года» [4] обеспечивают функционирование системы управления рисками, связанными с экономической безопасностью.

3 Аспект информационной безопасности

Экономические системы относятся к базовым критическим системам государства, поэтому важнейший аспект, системно влияющий на цифровую транс-

формацию экономики, связан с обеспечением информационной безопасности. Значимость, ответственность и эффективность решения проблемы обеспечения информационной безопасности кардинально возрастают.

Подтверждение того, что цифровая среда гарантированно безопасна или по крайней мере контролируема и динамически адаптируема к штатному режиму функционирования, требует внимательного анализа возможных новых вызовов и угроз безопасности, поиска методов и средств их нейтрализации.

Безусловно, традиционные детерминированные подходы к защите информации и исходные положения, на базе которых они формировались, должны использоваться в целях решения традиционных задач по защите информации при ее автоматизированной обработке.

Но цифровая трансформация экономической деятельности предъявляет требования безопасности не только к информации, но и к цифровой (компьютерной и телекоммуникационной) среде, предоставляющей средства и механизмы ее реализации. Происходит смещение акцента требований по безопасности из области исключительно информационной в более широкую область ИР, информационно-технологической и функциональной среды, цифровых сервисов и средств производства, как это отмечено на рис. 2.

С учетом новых вызовов должны быть сформированы подходы к определению угроз и оценке соответствующих рисков. Необходимо рассматривать по крайней мере две разновидности угроз [5]:

- (1) угрозы информации (*вектор атаки от источника угроз на информационные объекты и средства обработки информации*);
- (2) информационные угрозы (*угрозы информационной сферы, цифровой среды, направленные на процесс экономической деятельности, на деятельность субъекта*).

А риски, связанные с применением информационных технологий, должны проецироваться на риски в основной деятельности (финансовые, банковские, предпринимательские и др.) (рис. 3).

По существу, такой подход к соотношению угроз и рисков позволяет понять сущность экономической безопасности в зависимости от цифровой среды.

Появление новых системных решений в области информационных технологий (распределенная сетевая обработка информации, облачные архитектуры, удаленный доступ, мобильные системы и т. д.) также привело к дальнейшему переосмыслению представления об информационной безопасности. Сформировались понятия киберпространства, киберсреды и, соответственно, кибербезопасности.

В современной среде реализации кредитно-финансовых операций часто встречаются процессы обработки информации, которые не всегда являются детерминированными, когда последующее состояние системы может характеризоваться не только как предсказуемое, но и как случайное, зависящее от ряда динамически меняющихся факторов. Это обуславливает постановку и решение

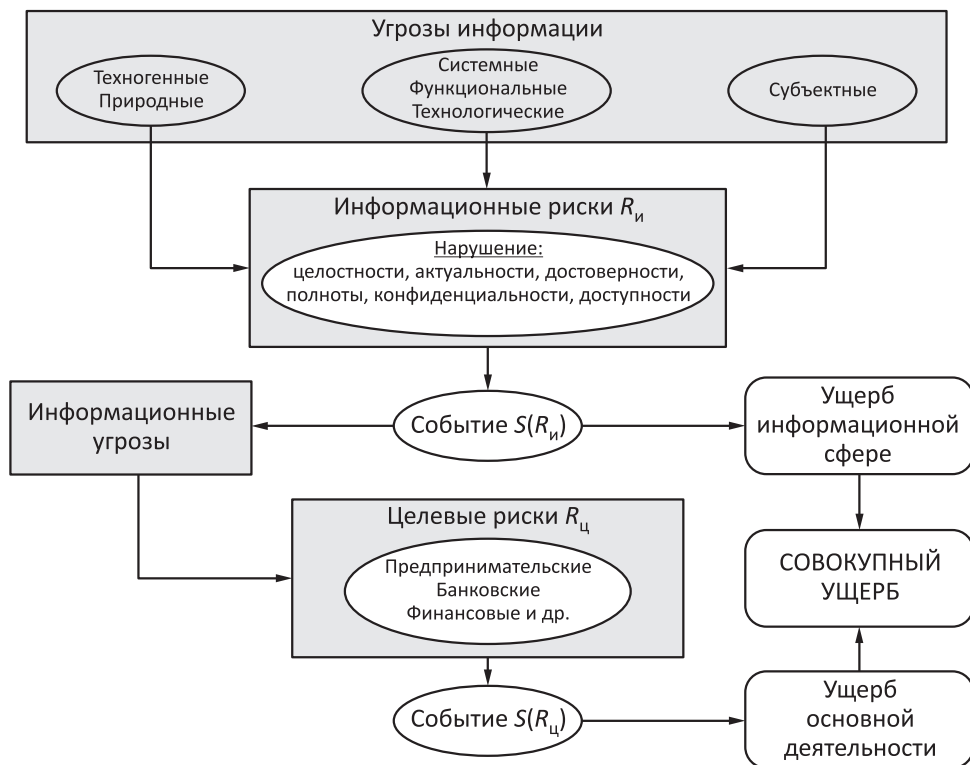


Рис. 3 Соотношение угроз и рисков в цифровой среде

задач обеспечения информационной безопасности в рамках стохастических процессов.

Все эти проблемы требуют поиска приемлемых методов и средств обеспечения безопасности, а также предъявляют новые требования к фундаментальным положениям, связанным с действующей в настоящее время нормативно-методической базой по защите информации.

4 Аналитические системы безопасности на основе мониторинга

Реализовать контроль безопасности в современной информационной цифровой среде с учетом аспектов, связанных с появлением стохастических процессов, возможно только путем динамического мониторинга, анализа аномалий, динамического обучения и оперативного принятия решений.

В контексте этого подхода широко используются **системы обнаружения и противодействия кибератакам** — СОПКА (в ранней терминологии —



Рис. 4 Классификация аномалий в сети

системы обнаружения вторжений, СОВ), позволяющие за счет сенсорной системы хостовых и сетевых датчиков обеспечивать мониторинг состояния безопасности, выполнять аналитическую работу и реагировать на возникающие аномалии.

Система обнаружения и противодействия кибератакам функционирует на основе специальной базы данных (*информационный фонд СОПКА*), которая включает сегмент управляющей информации централизованного хранения данных для обеспечения функционирования СОПКА и сегмент регистрации событий, связанных с текущими инцидентами информационной безопасности в сети и контролируемой автоматизированной системой (АС). События рассматриваются как аномалии (рис. 4), идентифицируются путем применения эвристических и аналитических методов и регистрируются в процессе обработки и передачи информации для анализа и последующей ответной реакции.

Характер аномалий показывает, что мониторинг СОПКА ориентирован именно на *текущие события* в цифровой компьютерной и телекоммуникационной среде АС и на *оперативную реакцию* на них.

Разнообразие аномалий, способы их реализации и проявления, вероятностный характер событий, связанных с аномалиями, определяют необходимость

решения прогнозных тактических задач, для чего необходимо предусматривать интегрированные системы сбора информации и анализа событий с разноранговыми связями между локальными системами обнаружения, такие как, например, информационно-аналитическая система ГосСОПКА [6]. В соответствии с Федеральным законом «О безопасности критической информационной инфраструктуры Российской Федерации» [7] более глубокий анализ и прогнозирование возможных событий нарушения информационной безопасности в цифровой технологической среде касается прежде всего объектов, информационные системы которых относятся к критической информационной инфраструктуре РФ.

Финансовый рынок РФ как объект защиты относится к этому классу объектов. Поэтому стратегической задачей в части обеспечения информационной безопасности в сетевой IT-инфраструктуре корпоративного киберпространства финансового рынка РФ является создание интегрированной информационно-аналитической СОПКА с архитектурой поранговой концентрации информации (вплоть до информационного взаимодействия с системой ГосСОПКА) и выполнения анализа инцидентов, связанных с аномалиями ИБ, на всем корпоративном киберпространстве.

5 Ситуационные центры и обеспечение экономической безопасности

Как показал анализ отношений угроз и рисков в информационной сфере и основной деятельности объектов, на экономическую безопасность финансового рынка как объекта защиты существенно влияет информационная безопасность: информационные риски порождают финансовые и банковские риски. И в этом плане перспективным направлением обеспечения безопасности финансового рынка как объекта деятельности в целом (*практически его экономической безопасности*) представляется функциональная интеграция систем обнаружения вторжений и систем ситуационного управления (ССЦ) [8], требования к которым и развитие которых регламентируется для критических систем соответствующими государственными нормативными и методологическими документами [9].

Этот подход схематично отражен в структуре представления цифровой экономики (см. рис. 2), однако является отдельной исследовательской задачей в части сегментирования и взаимодействия компонентов: модели информационного фонда инцидентов, постановки информационно-аналитических задач, технологий и механизмов принятия решений и реагирования [10].

6 Заключение

В работе рассмотрен ряд принципиальных вопросов, связанных с цифровой трансформацией экономики России в части безопасности финансового рынка как технологического объекта защиты, и на концептуальном уровне предложены их решения.

Резюме в отношении сущности понятия «цифровая экономика» можно подвести словами из доклада Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики»: «В словосочетании «Цифровая экономика» всегда первична экономика» [11].

Цифровая среда информационных технологий и операционных процессов — инструментарий реализации финансово-экономических отношений. Цифровые технологии становятся составной частью финансово-экономической деятельности. При этом для обеспечения безопасности следует иметь надежную цифровую обрабатывающую и функциональную среду.

Это требует, во-первых, системно подходить к представлению угроз и рисков безопасности, взаимно связывая информационно-технологические риски и риски основной деятельности, оценивая взаимосвязанный ущерб как конечный ущерб.

Во-вторых, учитывая сложность современных цифровых информационных и операционных технологий, проблему информационной безопасности и безопасности цифровой среды необходимо рассматривать не только как локальную детерминированную задачу отдельных АС, но и как интегрированную проблему безопасности киберпространства, в котором функционируют системы. Это обуславливает необходимость широкого использования мониторинговых аналитических систем обнаружения кибератак и противодействия им, а также рассмотрения взаимодействия оперативного мониторинга безопасности и процессов реализации экономической безопасности деятельности с участием ситуационных центров как стратегического уровня безопасности.

Литература

1. Цифровая экономика Российской Федерации: Программа, утвержденная распоряжением Правительства РФ от 28.07.2017 № 1632-р.
2. Защита Big Data: проблемы и решения. <http://www.it-weekly.ru/it-news/security/117831.html>.
3. Черняк Л. Безопасность Больших Данных. <https://www.osp.ru/os/2013/02/13034551>.
4. Стратегия экономической безопасности Российской Федерации на период до 2030 года: Указ Президента РФ от 13.05.2017 № 208.
5. Королёв В. И. Методология построения комплексной защиты информации на объектах информатизации // Системы высокой доступности, 2009. Т. 5. № 4. С. 4–24.
6. Дрюков В. Задачи операционной безопасности объектов КИИ в рамках функционирования центров ГосСОПКА. <https://www.anti-malware.ru/practice/solutions/critical-information-infrastructure-objects-operational-security-goals>.
7. О безопасности критической информационной инфраструктуры Российской Федерации: Федеральный закон № 187-ФЗ от 26.07.2017.
8. Зацаринный А. А. Ситуационные центры как основа информационно-аналитической поддержки принятия решений в органах государственной власти // Аналитика развития и безопасности страны: реалии и перспективы: Сб. мат-лов 1-й Всеросс. конф. — М.: Столица, 2014. С. 277–295.

9. Стратегия национальной безопасности Российской Федерации: Указ Президента РФ от 31.12.2015 № 683. Ст. 112.
10. *Зацаринный А. А., Королёв В. И.* Сегментирование информационно-технологической инфраструктуры ситуационного центра по признаку контуров безопасности // Системы и средства информатики, 2016. Т. 26. № 3. С. 136–147.
11. Цифровая экономика: глобальные тренды и практика российского бизнеса. — Институт менеджмента инноваций НИУ ВШЭ, 2017. <https://imi.hse.ru/pr2017.1>.

Поступила в редакцию 31.08.18

TECHNOLOGICAL ASPECTS OF INFORMATION SECURITY IN THE FINANCIAL MARKET IN TERMS OF DIGITAL TRANSFORMATION OF THE RUSSIAN ECONOMY

A. A. Zatsarinny¹ and V. I. Korolev^{1,2,3}

¹Institute of Informatics Problems, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation

²Financial University under the Government of the Russian Federation, 49 Leningradskiy Prosp., Moscow 125993, Russian Federation

³Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration, 82 Vernadsky Prosp., Moscow 119571, Russian Federation

Abstract: The financial market is presented as an object of protection, functioning in the economic sphere at the conditions of legal relations. The analysis is performed and the structure of the digital economy is proposed. The instrumental level of implementation of economic processes — “platforms and technologies” — is structured. The nature of new challenges and problems of information security during digital transformation is considered. The authors propose the basic approaches of information security in network architectures of operating and information analytical systems of the financial market: analytical security systems and systems of situation centers.

Keywords: financial market; digital economy; information security; economic security; security threat; intrusion detection system; situation center

DOI: 10.14357/08696527190102

Acknowledgments

The work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (projects 18-29-03124 and 18-29-03081).

References

1. Programma “Tsifrovaya ekonomika Rossiyskoy Federatsii.” Rasporyajenie Pravitel’stva Rossijskoy Federatsii ot 28.07.2017 No. 1683-r [The program “Digital Economy of the Russian Federation.” The decree of the RF Government dated 28.07.2017 No. 1632-r].
2. Zashchita Big Data: problemy i resheniya [Big Data protection: Problems and solutions]. Available at: <http://www.it-weekly.ru/it-news/security/117831.html> (accessed August 31, 2018).
3. Cherniyak, L. Bezopasnost’ Bol’shikh Danykh [Big Data Security]. Available at: <https://www.osp.ru/os/2013/02/13034551/> (accessed August 31, 2018).
4. Strategiya ekonomicheskoy bezopasnosti Rossiyskoy Federatsii na period do 2030 goda, utverzhdena Ukazom Prezidenta RF ot 13.05.2017 No. 208 [Strategy of economic security of the Russian Federation for the period up to 2030, approved by the Decree of the President of RF dated 31.12.2015 No. 208].
5. Korolev, V. I. 2009. Metodologiya postroeniya kompleksnoy zashchity informatsii na ob’ektakh informatizatsii [Methodology of creation of complex information security on the objects of informatization]. *Sistemy vysokoy dostupnosti* [Systems of High Availability] 5(4):4–24.
6. Drukov, V. Zadachi operatsionnoy bezopasnosti ob”ektov kriticheskoy informatsionnoy infrastruktury v ramkakh funktsionirovaniya tsentrov sistemy GosSOPKA [Tasks of operational security of objects of critical information infrastructure within functioning of the centers of the state security Service]. Available at: <https://www.anti-malware.ru/practice/solutions/critical-information-infrastructure-objects-operational-security-goals> (accessed August 31, 2018).
7. Federal’nyy zakon 187-FZ ot 26.07.2017 [Federal law No. 187-FZ of 26.07.2017] “O bezopasnosti kriticheskoy infrastruktury Rossiyskoy Federatsii” [On the security of the critical information infrastructure of the Russian Federation].
8. Zatsarinny, A. A. 2014. Situatsionnye tsentry kak osnova informatsionno-analiticheskoy podderzhki prinyatiya resheniy v organakh gosudarstvennoy vlasti [Situational centers as a basis of information and analytical support of decision-making in Government]. *Sb. mat-lov 1-y Vseross. konf. “Analitika razvitiya i bezopasnosti strany: realii i perspektivy”* [1st All-Russia Conference “Analytics of Development and Safety of the Country: Realities and Prospects” Proceedings]. Moscow: Stolitsa. 277–295.
9. Strategiya natsional’noy bezopasnosti Rossiyskoy Federatsii, utverzhdena Ukazom Prezidenta RF ot 31.12.2015 No. 683, st. 112 [Strategy of national security of the Russian Federation, approved by the Decree of the President of RF dated 31.12.2015 No. 683, Art. 112].
10. Zatsarinny, A. A., and V. I. Korolev. 2016. Segmentirovanie informatsionno-tekhnologicheskoy infrastruktury situatsionnogo tsentra po priznaku konturov bezopasnosti [The segmentation of situation center informational and technological infrastructure by safety circle attribute]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 26(3):136–147.
11. Tsifrovaya ekonomika: global’nye trendy i praktika rossiyskogo biznesa [Digital economy: Global trends and practice of Russian business]. National Research University Higher School of Economics. Available at: https://imi.hse.ru/pr2017_1 (accessed August 31, 2018).

Received August 31, 2018

Contributors

Zatsarinny Alexander A. (b. 1951) — Doctor of Science in technology, professor, Deputy Director, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences (FRC CSC RAS); principal scientist, Institute of Informatics Problems, FRC CSC RAS; 44-2 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation; AZatsarinny@ipiran.ru

Korolev Vadim I. (b. 1943) — Doctor of Science in technology, professor; leading scientist, Institute of Informatics Problems, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation; professor, Financial University under the Government of the Russian Federation, 49 Leningradskiy Prosp., Moscow 125993, Russian Federation; senior scientist, Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration, 82 Vernadsky Prosp., Moscow 119571, Russian Federation; VKorolev@ipiran.ru

СИСТЕМА НАУЧНЫХ СЕРВИСОВ КАК АКТУАЛЬНЫЙ КОМПОНЕНТ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ*

А. А. Зацаринный¹, В. А. Кондрашев², А. П. Сучков³

Аннотация: Успешное продвижение цифровизации научных исследований во многом обусловлено возможностью создания эффективной системы широкодоступных научных сервисов. Система научных сервисов должна обеспечивать поддержку процессов автоматизированного подбора релевантных сервисов и осуществления различных формальных и неформальных коммуникаций исследователя и государства, научного сообщества и бизнеса. Эффективность такой системы напрямую зависит от ее полноты и целостности, что обусловлено широтой охвата научными сервисами всех видов научной деятельности. Полноту и целостность системы научных сервисов может дать системный анализ методологии научных исследований и выявление на этой основе всей совокупности обеспечивающих ее процессов. В статье рассмотрена современная модель процессов научных исследований, определен круг обеспечивающих научных сервисов, дана классификация таких сервисов.

Ключевые слова: модель процессов научных исследований; научные сервисы; система научных сервисов

DOI: 10.14357/08696527190103

1 Введение

В настоящий момент развитие экономики Российской Федерации решительно связывается с внедрением подходов и технологий цифрового развития. Старт этим процессам был дан Президентом России В. В. Путиным в Послании Федеральному собранию 1 декабря 2016 г. [1–3], в котором были обозначены такие ключевые позиции, как фундаментальная наука, исследовательская инфраструктура, IT-индустрия, собственные передовые разработки, цифровые технологии и, наконец, программа развития цифровой экономики.

Российская наука обладает всеми необходимыми компонентами для рассмотрения в качестве отрасли цифровой экономики: наличие развитой инфраструктуры, организационных структур, нормативной базы, высокого уровня компетенций и высококвалифицированных научных коллективов. При этом

*Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (проект 18-29-03091).

¹Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук, AZatsarinny@ipiran.ru

²Институт проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук, VKondrashev@frccsc.ru

³Институт проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук, ASuchkov@ipiran.ru

все перечисленные компоненты становятся «цифровыми» и наука как отрасль экономики также становится «цифровой».

В связи с этим представляется логичной постановка задачи «Цифровая наука», а именно: цифровая экономика с позиций науки или, наоборот, наука в условиях вызовов цифровой экономики [4].

Другим, не менее важным обстоятельством является объективная смена подходов к проведению научных исследований, а именно: переход к новой парадигме в научных исследованиях, основанной на анализе накопленных данных в конкретных предметных областях, естественно в формализованном цифровом виде. Проведение таких исследований становится неотъемлемой частью различных областей науки, экономики, бизнеса на основе инструментария интенсивного использования данных.

Научные и образовательные организации России обладают широкой, распределенной по территории страны сетью центров коллективного пользования (ЦКП) и уникальных научных установок, обладающих колоссальным спектром научных услуг в различных областях науки. Необходима систематизация этих услуг и повышение эффективности их использования на основе создания современной исследовательской инфраструктуры, которая предоставляла бы широкий спектр возможностей по научным сервисам не только для научных организаций, но и для внешних пользователей.

В ФИЦ ИУ РАН на основе платформенного подхода создается прототип подобной инфраструктуры, который представляет собой совокупность трех компонентов. Первый — центр компетенций, в котором концентрируются знания в конкретной области. Второй — материально-техническая среда в виде высокопроизводительного центра обработки данных с гибридной архитектурой. Наконец, третий — это совокупность научных сервисов, которые создаются и накапливаются на этой платформе научными подразделениями ФИЦ ИУ РАН [5].

2 Система научных сервисов и цифровая наука

Успешное продвижение цифровизации научных исследований во многом обусловлено возможностью создания эффективной системы широкодоступных научных сервисов. Научный сервис — совокупность действий (процессов) и средств обеспечения процессов (ресурсов) по обслуживанию выполнения конкретных работ и реализации проектов научно-исследовательского и прикладного характера путем сервисной деятельности и предоставления потребителю (исследователям, специалистам или организациям) оборудования, расходных материалов, информационно-коммуникационных ресурсов, обеспечивающих ресурсов, продуктов интеллектуальной научной деятельности и обслуживающих человеческих ресурсов (субъекты сервисной деятельности). Результатом сервисной деятельности является услуга [6]. Очевидно, что научный сервис опирается как на цифровые технологии (автоматическое и автоматизированное предоставление услуг), так и на использование интеллектуальных и обслуживающих человеческих ре-

сурсов. Система научных сервисов должна обеспечивать поддержку процессов автоматизированного подбора релевантных сервисов и осуществления различных формальных и неформальных коммуникаций исследователя и государства, научного сообщества и бизнеса.

Научным коллективом ФИЦ ИУ РАН в рамках проводимых исследований [6] обоснованы концептуальные и системотехнические подходы к созданию системы управления научными сервисами (СУС), которые обеспечиваются ЦКП и уникальными научными установками (УНУ) академических институтов.

Разработаны модели СУС, в которых учитываются субъекты системы управления в виде администраторов системы, в виде пользователей (заказчиков), персонала ЦКП (УНУ), а также аналитиков, которые получают доступ к обобщенной информации для ее анализа с возможностью формирования отчетов по видам ЦКП, видам услуг, научным направлениям и с различными временными срезами. Эта система реализована в виде действующего макета на базе центра обработки данных ФИЦ ИУ РАН. Также разработан ряд инновационных системотехнических решений по построению управления деятельностью организационных систем, которые могут найти применение при реализации программы цифровой экономики.

Создаваемые в ЦОД ФИЦ ИУ РАН вычислительные мощности активно задействуются в рамках научных программ сотрудников ФИЦ ИУ РАН и их коллег из других академических институтов. Так, в 2017 г. с использованием высокопроизводительных вычислений выполнены исследовательские работы по следующим тематикам:

- молекулярно-динамическое моделирование процесса взаимодействия частиц;
- квантово-механические расчеты структурных свойств многокомпонентных материалов;
- обратные задачи подводной акустики;
- интеллектуальный поиск и анализ больших массивов текстов;
- классификация изображений;
- интеллектуальный анализ данных;
- сегментация трехмерных медицинских изображений.

Эффективность такой системы напрямую зависит от ее полноты и целостности, что обусловлено широтой охвата научными сервисами всех видов научной деятельности. Полноту и целостность системы научных сервисов может дать системный анализ методологии научных исследований и выявление на этой основе всей совокупности обеспечивающих ее процессов. Методология науки изучается и систематизируется в рамках специального раздела философии — философии науки [7]. В философии науки модели процессов научного исследования выполняют две функции: во-первых, обеспечивают описание того, как осуществляется научное исследование на практике, и, во-вторых, дают объяснение, почему научное исследование преуспевает в достижении подлинного знания.

3 Модель процессов научного исследования

Классическая модель научного исследования исходит от Аристотеля, который различал формы приближенного и точного рассуждения, излагал тройственную схему абдукции (способ выдвижения гипотез), дедукции и индукции, а также рассматривал сложные формы выводов, такие как рассуждение по аналогии. Обобщенный состав методологического арсенала научного исследования включает в себя общие методы, восходящие к Аристотелю, общенаучные методы и специальные методы, характерные для области исследования (рис. 1).

В современном представлении научное исследование — взаимоувязанная совокупность процессов, включающая ряд типовых компонентов, состав которых можно с некоторым приближением вычленить из неформальных философских рассуждений [7]:

- формулировка научной проблемы;
- предварительный анализ доступной научно-технической информации (НТИ) (факты, теории, гипотезы);
- формулировка и сравнительный анализ исходных гипотез;
- планирование научных исследований;
- организация и проведение эксперимента;
- анализ и обобщение полученных результатов;
- проверка исходных гипотез, принятие решений;
- формулирование фактов и положений, их обоснование и описание (получение продукта знаний).

Объединение этих компонентов в последовательности взаимосвязанных процессов позволяет выделить две основные группы процессов в модели научных исследований: «Целеполагание» и «Исследование», а также входящие в них

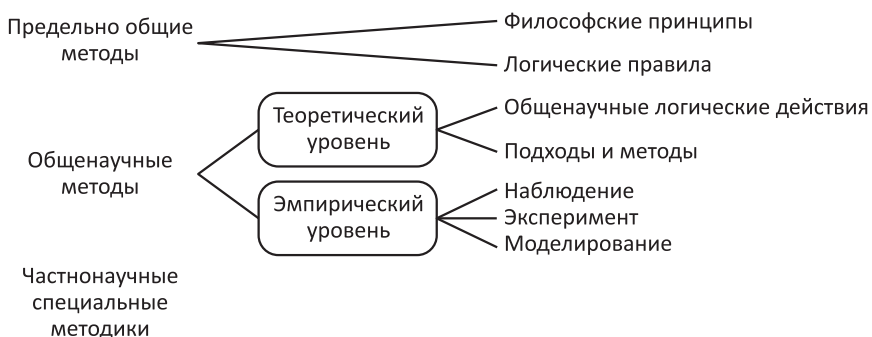


Рис. 1 Состав методологического арсенала научного исследования [7]

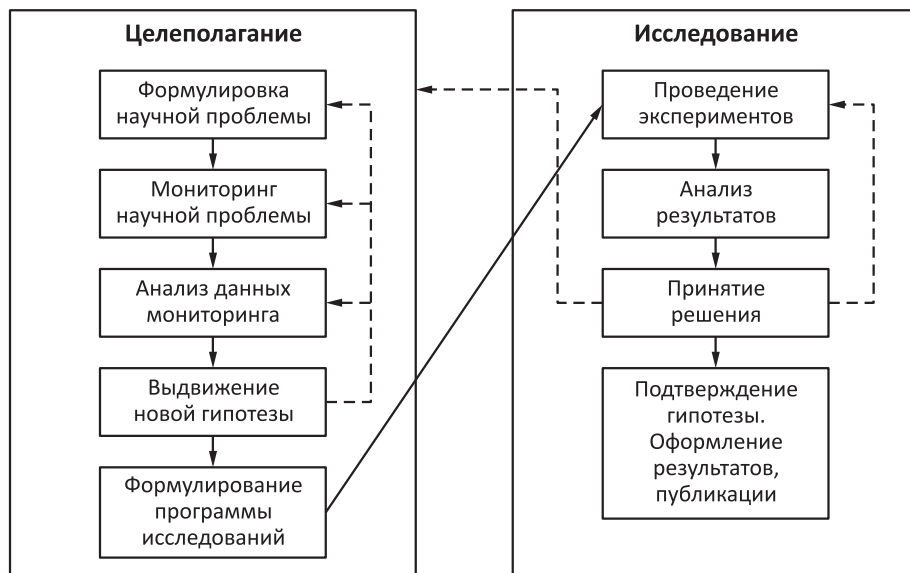


Рис. 2 Основные группы процессов модели

компоненты и связи между ними (рис. 2). Разделение на две группы обусловлено наличием двух основополагающих циклов модели. Стадия «Целеполагание» представляет собой цикл из пяти базовых процессов (формулировка научной проблемы, мониторинг научной проблемы, анализ данных мониторинга, выдвижение новой гипотезы, формирование программы исследований), обеспечивающих осмысление и формулировку целей исследования в виде научной гипотезы и плана исследований. На стадии «Исследование» (с процессами проведения экспериментов, анализа результатов, принятия решения, оформления результатов) осуществляется реализации плана исследования с целью получения положительного (новое знание) или отрицательного результата (возврат к стадии «Целеполагание» для корректировки целей исследования). Данная двухуровневая процессная схема применяется для анализа различных явлений, в частности для изучения процессов стратегического планирования [8].

Рассмотрим подробнее содержание процессов представленной модели с точки зрения их реализации и обеспечения с помощью научных сервисов.

Формулировка научной проблемы

Научная проблема — это суждение (или система суждений), содержащее в себе теоретически осознанный вопрос, при этом не существует известного алгоритма его разрешения, а решение этого вопроса имеет (должно иметь) существенную

новизну [7]. Внутренний стимул формирования проблемы часто выступает в виде несоответствия эмпирического базиса и теоретических ресурсов:

- (1) как реакция на открытие каких-то новых явлений, фактов, не укладывающихся в готовые концептуальные схемы, что требует активизации теоретического потенциала научной области;
- (2) как теоретическое опережение, когда теория развивается быстрее, чем появляются подкрепляющие ее данные (скажем, данные предсказаний), т. е. существует некоторый недостаток фактического материала, который стимулирует эмпирические исследования.

Формулировка, осмысление и обсуждение научной проблемы осуществляются в научном сообществе и становятся его достоянием путем опубликования этих процессов в научной печати, на различных научных форумах и в ходе неформального общения. Таким образом, сервисная поддержка этих процессов может выражаться в форме наукометрического анализа публикаций, интеллектуального анализа специализированных социальных сетей и других средств научных коммуникаций.

Предварительный анализ доступной научно-технической информации

На этой стадии научного исследования задача системы мониторинга НТИ — сбор данных об изучаемой научной проблеме (факты, теории, гипотезы) и ее окружении, что влечет необходимость при создании соответствующих сервисов решения ряда серьезных информационных проблем анализа неструктурированной информации, среди которых:

- классификация и рубрикация документов;
- извлечение фактов, понятий, связей (feature extraction);
- построение семантических сетей;
- аннотирование, суммаризация (summarization);
- тематическое индексирование (thematic indexing);
- создание таксономий и тезаурусов;
- анализ фронта исследований;
- интеллектуальный поиск;
- анализ эмоциональных оценок.

Основу процесса извлечения структурированной информации из неструктурированного текста (текстмайнинг) составляет определение и идентификация сущностей из текста на естественном языке и выявление связей между этими сущностями. Это позволяет решить ряд прикладных задач в интересах исследователя, среди которых: систематизация информации, выявление новых сведений

об объектах мониторинга в условиях отсутствия единых форматов обмена данными, выявление тенденций и аномалий в потоках публикаций. Как правило, такие методы анализа опираются на формализованные в том или ином виде знания о предметной области и специализированные методы обработки информации, реализованные в виде наукоемкого программного обеспечения, опыт создания и практического применения которого накоплен в ФИЦ [9]. Как правило, такие программные продукты обладают инструментальными средствами настройки на конкретное приложение.

Можно выделить следующие примеры необходимых для этого источников данных, представляющих собой отечественные и зарубежные базы данных (БД) НТИ:

- публикации на английском языке ресурса arXiv.org (1 млн 250 тыс. документов) по естественным наукам;
- англоязычная Википедия (5 млн 164 тыс. статей);
- БД по американским патентам (USPTO с 2002 по 2016 гг.): 2 млн 965 тыс. патентов;
- БД по международным патентам (WIPO): 2 млн 384 тыс. патентов.

Другим значимым источником в этой области служат отечественные и зарубежные электронные реферативные БД:

- БД ВИНТИ РАН;
- электронный каталог ГПНТБ России;
- Scopus (SciVerse Scopus) — библиографический индекс, Elsevier;
- Web of Science — библиографический индекс, Thomson Reuters;
- NTIS (National Technical Information Service) — политематическая БД, U.S. Department of Commerce;
- Life Sciences Collection — БД по естественным наукам, Cambridge Scientific Abstracts;
- Biological Abstracts — БД по биологии, Biological Abstracts Inc.;
- Biotechnology & Bioengineering — БД по биотехнологии и биоинженерии, Cambridge Scientific Abstracts and Engineering Information Inc.;
- Chemical Engineering and Biotechnology Abstracts — БД по химической инженерии и биотехнологии, The Royal Society of Chemistry;
- Compendex Plus — БД по техническим наукам, Engineering Information Inc.;
- Corporate & Industry Research Reports (CIRR) — БД аналитических отчетов фирм, JA Micropublishing;
- Current Contents — еженедельное обозрение содержания научных периодических изданий, Institute for Scientific Information;

- Derwent Biotechnology Abstracts — БД по биотехнологии, Derwent Publications Ltd.;
- MEDLINE — БД по медицине и биологии, National Library of Medicine;
- TOXLINE — БД по токсикологии, National Library of Medicine, Swedish National Chemicals Inspectorate.

Не претендуя на полноту и окончательность формирования перечня ресурсов в этом направлении, отметим их тематическое разнообразие, значительные объемы и необходимость наличия глубоких научных компетенций для эффективного использования таких данных.

Формулировка и сравнительный анализ исходных гипотез

Под гипотезой (*греч.* hypothesis — «основание; догадка») понимают научное утверждение (систему утверждений), которое:

- (1) по своей логической характеристике имеет статус предположения;
- (2) по своему содержанию представляет собой (в случае подтверждения) некоторое новое знание;
- (3) по своей цели должно существенно продвинуть научное познание (либо прямо предложить решение проблемы или задачи, либо существенно способствовать этому).

Можно выделить следующие стадии формирования гипотезы:

- (1) обнаружение проблемы — уже на стадии предварительной постановки научной проблемы идет выдвижение и приблизительная оценка различных гипотез; здесь у исследователя возникают различные догадки относительно подхода к проблеме, производится первичная оценка этих идей;
- (2) выдвижение гипотезы — ученый в явном виде формулирует ту рабочую гипотезу, которая прошла первичный отбор и была оценена как заслуживающая внимания;
- (3) разработка гипотезы — ученый анализирует гипотезу, разворачивает скрытый в ней потенциал, т. е. изучает ее взаимосвязи с исходной теорией, выводит следствия из системы «исходная теория плюс новая гипотеза», разрабатывает исследовательский проект проверки гипотезы.

Выдвижение научной гипотезы является актом творчества исследователя и, по мнению авторов, в настоящее время нет адекватных средств автоматизации этого процесса. Реальную поддержку могут оказать сервисы работы с НТИ и коммуникации в научном сообществе.

Планирование научных исследований (разработка исследовательского проекта)

В содержание данного этапа входит разработка исследовательского проекта, что связано не только с теоретико-методологическим рассмотрением подходов к проблеме, но и с институционально предписанными действиями по планированию и подготовке будущих исследований. Прежде всего это касается процесса так называемого обоснования темы исследования, т. е. представления исследовательского проекта научному сообществу и его административно-организационным инстанциям. Общий смысл процедуры обоснования темы состоит в том, чтобы продемонстрировать наличие важной нерешенной научной (или научно-практической) проблемы и показать, что предполагаемое исследование действительно должно решить те или иные аспекты исходной проблемы. С точки зрения использования научных сервисов здесь возможна автоматизация подготовки и обмена установленными формализованными электронными документами, а также сервисы сетевого планирования и управления проектами.

Организация и проведение эксперимента

Эксперимент представляет собой исследовательскую ситуацию изучения явления в специально создаваемых контролируемых условиях, позволяющих активно управлять ходом данного процесса, т. е. вмешиваться в него и видоизменить его в соответствии с исследовательскими задачами, а также воспроизводить изучаемое явление при воспроизведении данных условий. Назовем некоторые основания классификации. К разновидностям экспериментов относят:

- (1) по условиям проведения — естественные и искусственные (включая моделирующие — натурные, вычислительные, мысленные и пр.);
- (2) по целям исследования — преобразующие, контролирующие, констатирующие, поисковые и др.;
- (3) по числу факторов — однофакторные и многофакторные;
- (4) по степени контролируемости факторов — активные и пассивные (регистрирующие).

Большой массив существующих научных сервисов лежит в экспериментальной области и связан с так называемыми Центрами коллективного пользования и уникальными научными установками, генерирующими в том числе необработанные данные эксперимента для широкого круга научных коллективов.

По результатам аудита, проведенного 95 экспертами из научных и образовательных организаций, в том числе не подведомственных ФАНО России [1], ЦКП и УНУ были разделены по трем категориям:

- I категория — лидеры в данной области, обладающие широким кругом пользователей, уникальными методиками, современным и дорогостоящим научным оборудованием;

II категория — стабильно развивающиеся (функционирующие) ЦКП и УНУ;

III категория — это ЦКП и УНУ, обеспечивающие узкопрофильные исследования в рамках государственного задания базовой организации, обладают низкой степенью доступности оборудования для организации научных сервисов.

По результатам анализа из 174 ЦКП 39% отнесены к первой, 43% — ко второй и 18% — к третьей категории; из 146 УНУ 38% отнесено к первой, 46% — ко второй и 16% — к третьей категории [6].

Заметим, что стадия организации и проведения эксперимента для ряда исследований (особенно в области наук с интенсивным использованием данных) может быть проведена в рамках других исследований. В этом случае исследовательский проект, направленный на анализ данных, пропускает стадию организации и проведения эксперимента и использует доступные необработанные данные, ранее накопленные в другом проекте.

Анализ и обобщение полученных результатов

Цель анализа данных — выявить тенденции, общие принципы, стоящие за единичными данными, изучить те или иные отношения между индивидуальными феноменами, описать структуру области данных.

Для наук с интенсивным использованием данных эта стадия исследовательского проекта является центральной.

Наличие массовых явлений и процессов, развивающихся во времени, дает возможность применять различные статистические методы анализа и интеллектуальной подготовки данных:

- анализ временных рядов, характеризующих изменение количественных и качественных атрибутов узлов и связей наблюдаемых объектов (анализ трендов, сезонных колебаний, тенденций и аномалий);
- предобработка данных (восстановление пропущенных данных, снижение размерности массивов данных, выделение главных компонентов);
- прогнозирование изменения параметров с учетом выявленных трендов и анализируемых сценариев;
- статистическая оценка количественных и качественных характеристик потоков событий.

Дискретная структура наблюдаемых данных позволяет применять следующие методы и технологии:

- выделение фактов и формализация фактографических данных на основе лингвистического анализа слабоструктурированной информации;
- идентификация и регистрация объектов, слияние подсетей;

- поиск подобных пространственно-временных конфигураций методами теории графов (изоморфизм и изоморфное вложение графов);
- логические выводы (поиск решения) на семантической сети;
- поиск прямых и ассоциативных связей (путей на графе);
- расчет интегральных и целевых показателей на графах.

Большую роль может сыграть развитие научных сервисов, реализующих специальные методы анализа по отраслям науки с использованием систем, основанных на знаниях, различных методов численного моделирования, методов оптимизации, машинного обучения, искусственного интеллекта.

Применяются также методы визуализации данных в виде таблиц, графиков, диаграмм и других графических объектов.

Несомненно, указанные методы могут быть реализованы как широкодоступные научные сервисы.

Проверка исходных гипотез, принятие решений

Эта процедура неоднозначна, так как встает необходимость выбора наиболее адекватной гипотезы из множества конкурирующих предположений, ведь зачастую с одними и теми же эмпирическими данными могут неплохо согласовываться сразу несколько гипотез. Внутри совокупности альтернативных гипотез возможна только сравнительная оценка их приемлемости, но не существует какой-либо абсолютной шкалы, пользуясь которой как универсальным критерием можно было бы ранжировать любые гипотезы на предмет их правдоподобности. Гипотезы можно лишь сравнивать между собой в относительных терминах (лучше подтверждена — менее подтверждена, более приемлема — менее приемлема и т. п.). Причем сравнение гипотез осуществляется на основе содержательных критериев, учитывающих специфику конкретной предметной области и не задаваемых заранее извне. Таким образом, цифровизация этого процесса затруднительна.

После осуществления проверки гипотезы на основе данных эксперимента осуществляется принятие решения из следующих альтернатив:

- в случае подтверждения гипотезы осуществляется переход к процессам формулирования фактов и положений, их обоснования и описания (получение продукта знаний);
- если эмпирических данных не хватает, принимается решение о продолжении экспериментов;
- если гипотеза опровергнута, то необходимо возвратиться к стадии «Целеполагание»:
 - для корректировки плана исследования;
 - корректировки научной гипотезы;
 - корректировки научной проблемы.

Формулирование фактов и положений, их обоснование и описание (получение продукта знаний)

Продукт знаний обычно оформляется в виде научно-технического отчета, научной публикации либо публичного доклада на разного рода научных собраниях. Существующие технологии в этой области позволяют говорить о возможности использования следующих сервисов:

- улучшение качества статей (адаптация по требованиям оформления, рецензирование, семантический анализ текстов, услуги по написанию и продвижению публикаций);
- автоматизированный перевод;
- проверка заимствований, антиплагиат;
- анализ редакционных политик и выбор издания.

4 Состав системы научных сервисов

Итак, систематизация процессов научного исследования позволяет сформировать ориентировочный набор научных сервисов, который может лечь в основу системы цифровизации науки. Рассмотрим основные группы сервисов.

Сервисы интеллектуального поиска информации и мониторинга НТИ:

- доступа к реферативным и полнотекстовым ресурсам НТИ;
- интеллектуального поиска информации;
- наукометрического анализа публикаций;
- интеллектуального анализа специализированных социальных сетей и других средств научных коммуникаций.

Сервисы извлечения фактов и знаний:

- классификация и рубрикация документов;
- извлечение фактов, понятий, связей;
- построение семантических сетей;
- аннотирование, суммаризация;
- тематическое индексирование;
- создание таксономий и тезаурусов;
- анализ фронта исследований;
- анализ эмоциональных оценок.

Аналитические сервисы:

- статистического анализа:
 - анализ временных рядов, характеризующих изменение количественных и качественных атрибутов узлов и связей наблюдаемых объектов (анализ трендов, сезонных колебаний, тенденций и аномалий);

- прогнозирование изменения параметров с учетом выявленных трендов и анализируемых сценариев;
- статистическая оценка количественных и качественных характеристик потоков событий;
- дискретного анализа;
- выделение фактов и формализация фактографических данных на основе лингвистического анализа слабоструктурированной информации;
- идентификация и регистрация объектов, слияние подсетей;
- поиск подобных пространственно-временных конфигураций методами теории графов (изоморфизм и изоморфное вложение графов);
- логические выводы (поиск решения) на семантической сети;
- поиск прямых и ассоциативных связей (путей на графе);
- расчет интегральных и целевых показателей на графах;
- специальных методов анализа по отраслям науки:
 - методы управления данными, машинного обучения и искусственного интеллекта (системы, основанные на знаниях);
 - моделирование (непрерывных физических процессов, дискретных систем, имитационное моделирование);
 - методы решения экстремальных задач, исследования операций и оптимального управления;
- визуализации данных в виде таблиц, графиков, диаграмм и других графических объектов.

Сервисы коммуникаций:

- сервисы работы с НТИ и коммуникации в научном сообществе;
- автоматизация подготовки и обмена установленными формализованными электронными документами.

Сервисы планирования:

- сетевое планирование;
- управление проектами.

Сервисы доступа к услугам ЦКП и УНУ:

- интеллектуальный поиск предоставляемых услуг;
- оформление заявок на услуги.

Сервисы подготовки публикаций:

- улучшение качества статей (адаптация по требованиям оформления, рецензирование, семантический анализ текстов, услуги по написанию и продвижению публикаций);
- автоматизированный перевод;

- проверка заимствований, антиплагиат;
- анализ редакционных политик и выбор издания.

Состав этих групп и критерии их образования могут лечь в основу системы классификации и кодирования научных сервисов.

Реализация системы широкодоступных научных сервисов в соответствии с [2] должна осуществляться с использованием сетевых форм организации научной, научно-технической и инновационной деятельности на базе цифровых платформ. Цифровая платформа в данном случае — это совокупность автоматизированных процессов взаимодействия участников научно-технического процесса на основе использования научных сервисов, обеспечивающих повышение эффективности научных исследований за счет применения цифровых технологий, оптимизации и стандартизации данных процессов и обеспечения общего информационного пространства. Представленная систематизация научных сервисов на основе сформулированной обобщенной модели процессов научного исследования, по мнению авторов, может способствовать полноте и целостности функционала создаваемых цифровых платформ.

Литература

1. Послание Президента РФ В. В. Путина Федеральному Собранию 1 декабря 2016 года.
2. Стратегия научно-технологического развития Российской Федерации: Указ Президента РФ № 642 от 01.12.2016.
3. Цифровая экономика Российской Федерации: Программа, утвержденная распоряжением Правительства РФ от 28.07.2017 № 1632-р.
4. *Зацаринный А. А., Киселев Э. В., Козлов С. В., Колин К. К.* Информационное пространство цифровой экономики России. Концептуальные основы и проблемы формирования / Под общ. ред. А. А. Зацаринного. — М.: ФИЦ ИУ РАН; НИПКЦ Восход-А, 2018. 236 с.
5. *Зацаринный А. А., Волович К. И., Кондрашев В. А.* Методологические вопросы управления научными сервисами научных и образовательных организаций Российской Федерации // Радиолокация, навигация, связь: Сб. тр. XXIII Междунар. науч.-технич. конф. — Воронеж: Вэлборн, 2017. Т. 1. С. 7–14.
6. Исследование вопросов управления результатами научно-исследовательской деятельности организаций, подведомственных ФАНО России, и научными сервисами сети ЦКП ФАНО: Отчет о НИР «Сервис-У». — М.: ФИЦ ИУ РАН, 2016. 437 с.
7. *Ушаков Е. В.* Введение в философию и методологию науки. — М.: Экзамен, 2005. 528 с.
8. *Сучков А. П., Босов А. В., Макошко А. А.* Ситуационный анализ в процессах стратегического планирования в области обеспечения национальной безопасности // Инновации, 2018. № 8(238). С. 33–39.
9. *Осипов Г. С.* Приобретение знаний интеллектуальными системами. — М.: Наука, 1997. 112 с.

Поступила в редакцию 07.12.18

THE SYSTEM OF SCIENTIFIC SERVICES AS A RELEVANT COMPONENT OF SCIENTIFIC RESEARCH

A. A. Zatsarinny^{1,2}, *V. A. Kondrashev*², and *A. P. Suchkov*²

¹Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation

²Institute of Informatics Problems, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation

Abstract: The successful promotion of digitalization of scientific research is largely due to the possibility of creating an effective system of widely available scientific services. The system of scientific services should support the processes of automated selection of relevant services and implementation of various formal and informal communications of the researcher and the state, scientific community and business. The effectiveness of such a system depends on its completeness and integrity due to the breadth of the coverage of all types of scientific activities by scientific services. A systematic analysis of the methodology of scientific research and the identification on this basis of the whole set of processes that provide it can give the completeness and integrity of the system of scientific services. The article considers the modern model of research processes, defines the range of providing scientific services, and provides the classification of such services.

Keywords: model of research processes; scientific services; system of scientific services

DOI: 10.14357/08696527190103

Acknowledgments

The work was partly supported by the Russian Foundation for Basic Research (project 18-29-03091).

References

1. Poslanie Prezidenta RF V. V. Putina Federal'nomu Sobraniyu 1 dekabrya 2016 goda [Message from Russian President Vladimir Putin to the Federal Assembly, December 1, 2016].
2. Strategiya nauchno-tehnologicheskogo razvitiya Rossiyskoy Federatsii: Ukaz Prezidenta RF No. 642 ot 01.12.2016 [Strategy of scientific and technological development of the Russian Federation, approved. Decree of the President of the Russian Federation No. 642 from 01.12.2016].
3. Tsifrovaya ekonomika Rossiyskoy Federatsii: Programma, utverzhennaya Rasporyazheniem Pravitel'stva RF ot 28.07.2017 No. 1632-r [Program “Digital economy of the Russian Federation” approved. Order of the Government of the Russian Federation from 28.07.2017 No. 1632-p].

4. Zatsarinny, A. A., E. V. Kiselev, S. V. Kozlov, and K. K. Kolin. 2018. *Informatsionnoe prostranstvo tsifrovoy ekonomiki Rossii. Kontseptual'nye osnovy i problemy formirovaniya* [Information space of the digital economy of Russia. Conceptual framework and problems of formation]. Moscow: FRC CSC RAS, Vosход-A. 236 p.
5. Zatsarinny, A. A., K. I. Volovich, and V. A. Kondrashev. 2017. Metodologicheskie voprosy upravleniya nauchnymi servisami nauchnykh i obrazovatel'nykh organizatsiy Rossiyskoy Federatsii [Methodological issues of scientific services management of scientific and educational organizations of the Russian Federation]. *23th Scientific and Technical Conference (International) "Radar, Navigation, Communication" Proceedings*. Voronezh. 1:7–14.
6. FRC CSC RAS. 2016. Issledovanie voprosov upravleniya rezul'tatami nauchno-issledovatel'skoy deyatelnosti organizatsiy, podvedomstvennykh FANO Rossii, i nauchnymi servisami seti TsKP FANO [Research of management issues resulting from the research activities of the organizations subordinate to FASO of Russia, and scientific services of network of FASO centers of collective use]. Moscow. Otchet o NIR "Servis-U" [Research Report "Servis-U"]. 437 p.
7. Ushakov, E. V. 2005. *Vvedenie v filosofiyu i metodologiyu nauki* [Introduction to philosophy and methodology of science]. Moscow: Ekzamen. 528 p.
8. Suchkov, A. P., A. V. Bosov, and A. A. Makosko. 2018. Situatsionnyy analiz v protsessakh strategicheskogo planirovaniya v oblasti obespecheniya natsional'noy bezopasnosti [Situational analysis in the processes of strategic planning in the field of national security]. *Innovatsii* [Innovations] 8(238):33–39.
9. Osipov, G. S. 1997. *Priobretenie znaniy intellektual'nymi sistemami* [Knowledge acquisition intelligent systems]. Moscow: Nauka. 112 p.

Received December 7, 2018

Contributors

Zatsarinny Alexander A. (b. 1951) — Doctor of Science in technology, professor, Deputy Director, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences (FRC CSC RAS); principal scientist, Institute of Informatics Problems, FRC CSC RAS; 44-2 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation; AZatsarinny@ipiran.ru

Kondrashev Vadim A. (b. 1963) — senior scientist, Institute of Informatics Problems, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation; VKondrashev@frcsc.ru

Suchkov Alexander P. (b. 1954) — Doctor of Science in technology, leading scientist, Institute of Informatics Problems, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation; ASuchkov@ipiran.ru

ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СТРУКТУРА ГИБРИДНОЙ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ МНОГОАГЕНТНОЙ СИСТЕМЫ ГЕТЕРОГЕННОГО МЫШЛЕНИЯ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМЫ ВОССТАНОВЛЕНИЯ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОСЕТИ*

А. В. Колесников¹, С. В. Листопад²

Аннотация: Проблемы оперативно-диспетчерского управления региональными электросетями характеризуются неоднородностью, частичной наблюдаемостью объекта управления, а также его динамическим характером, обуславливающим взаимозависимость выполняемых действий и сложность исправления ошибочных решений. Традиционные абстрактно-математические модели ограничены и не релевантны таким динамическим средам, поэтому привлекаются коллективы экспертов различных специальностей, но, тем не менее, из-за ограниченности времени на принятие решений организовать всестороннее коллективное решение проблемы не представляется возможным. Для информационного обеспечения решения проблем предлагается новый класс интеллектуальных систем, моделирующих коллективное принятие решений под руководством фасилитатора — гибридные интеллектуальные многоагентные системы гетерогенного мышления (ГИМСГМ). Рассматривается функциональная структура такой системы для решения проблемы восстановления распределительной электросети после масштабных аварий.

Ключевые слова: гетерогенное мышление; гибридная интеллектуальная многоагентная система; проблема восстановления распределительной электросети

DOI: 10.14357/08696527190104

1 Введение

При возникновении аварии в распределительной электросети критически важна скорость восстановления электроснабжения [1, 2]. Для снижения экономических и социальных потерь большинство энергоснабжающих организаций разрабатывают руководящие принципы и операционные процедуры возобновления электроснабжения. Подобные инструкции создаются и по результатам анализа предыдущих аварий коллективами экспертов из энергетиков электроснабжающей организации, представителей проектных институтов, разработавших генерацию

* Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 18-07-00448а).

¹Балтийский федеральный университет им. И. Канта; Калининградский филиал Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук, avkolesnikov@yandex.ru

²Калининградский филиал Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук, ser-list-post@yandex.ru

и электросетевой комплекс данной организации, а также представителей производителей эксплуатируемого оборудования [3]. Однако аварийные условия системы могут серьезно отличаться от принятых при разработке плана, что снижает вероятность успеха действий, приводя к недопустимым нагрузкам, уровням напряжения или срабатыванию систем защиты [4]. Организовать же всестороннее коллективное решение проблемы после аварии не представляется возможным в связи с ограниченным временем принятия решений.

В этой связи актуальна разработка интеллектуальных информационных систем, интегрирующих знания экспертов различных специальностей, согласование нескольких критериев оптимальности и учет множества ограничений в условиях динамических непосредственно не наблюдаемых сред и дефицита времени на принятие решения. Для моделирования подобных структур в целях информационной подготовки и поддержки принятия решений предлагается комбинировать гибридный интеллектуальный подход А. В. Колесникова [5], аппарат многоагентных систем в смысле В. Б. Тарасова [6] и методики гетерогенного мышления [7–9]. Результатом должен стать новый класс интеллектуальных систем — гибридные интеллектуальные многоагентные системы гетерогенного мышления.

2 Проблема восстановления электроснабжения после аварии

Процесс восстановления системы электроснабжения (СЭС) — наращивание ее структуры в течение несколько часов или дней после погашения при согласовании подготовки и ввода множества взаимозависимых объектов, сохранивших работоспособность после аварии, а также объектов, работоспособность которых восстанавливается действиями персонала [10, 11]. Планирование восстановления энергосистемы — комбинаторная проблема, требующая обширных знаний, включающая множество ограничений и условий, по которым необходимы оценки операторов, что дополнительно усложняет ее комплексное решение [1]. Три основные особенности делают эту проблемную ситуацию актуальной для современных планировщиков: частичная наблюдаемость, размерность пространства состояний, которая делает полное перечисление состояний абсолютно невозможным, последствия действия сложно моделировать [12].

Известно множество постановок данной проблемной ситуации, и предлагаются новые методы восстановления, альтернативные обычно используемым процедурам. В простейшем, «игровом» виде она может быть описана следующим образом. Электросеть представляется графом $PS = \langle V, E \rangle$, узлы V которого могут быть трех типов: центр питания $v^s \in V^s \subseteq V$, потребитель $v^l \in V^l \subseteq V$ и шина $v^b \in V^b \subseteq V$. Ребра графа E обозначают линии электропередач с переключателями, размыкающими или замыкающими линию. Запитанные линии образуют радиальную структуру, т. е. в графе отсутствуют циклы запитанных линий. Центр питания характеризуется величиной максимальной генерируемой мощности, потребитель — величиной номинальной потребляемой мощности и со-

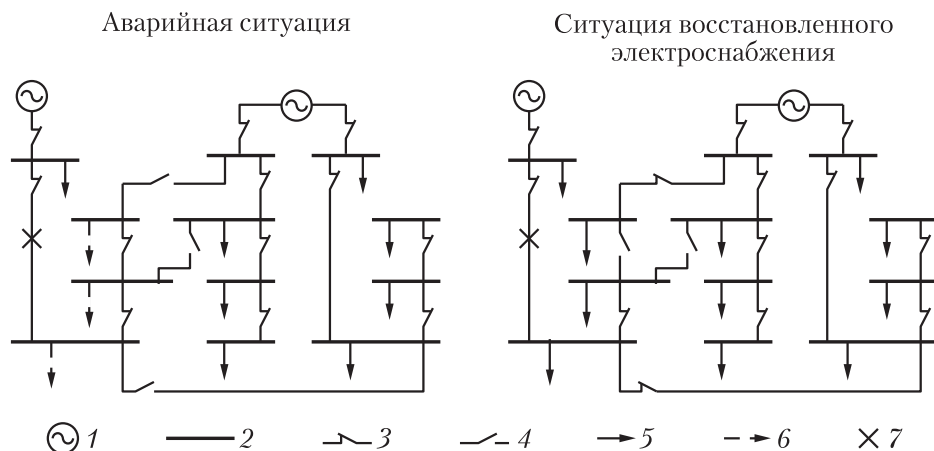


Рис. 1 Пример графа при «игровом» планировании восстановления энергосистемы: 1 — питающий центр; 2 — шина; 3 — линия с замкнутым переключателем; 4 — линия с разомкнутым переключателем; 5 — запитанный потребитель; 6 — обесточенный потребитель; 7 — аварийная линия

стоянием (запитан/отключен), а линии электропередачи — пропускной способностью (максимально допустимая мощность), состоянием (включена/отключена) и работоспособностью (исправна/авария). Требуется определить, какие линии нужно включить/выключить и в каком порядке, чтобы обеспечить максимально возможный объем потребления мощности при соблюдении следующих эксплуатационных ограничений: поддержание радиальной структуры включенных линий; для каждой линии суммарная величина нагрузок, которые питаются через эту ветвь, не должна превышать пропускную способность ветви.

Пример графа электросети для такой задачи показан на рис. 1. В левой части рисунка в нормальном состоянии все нагрузки распределены между двумя питающими центрами, циклы из замкнутых линий отсутствуют. При возникновении аварии в такой сети три потребителя, отмеченные штриховыми стрелками, оказываются обесточены. Справа на рис. 1 показана ситуация восстановления электроснабжения, когда всех трех обесточенных потребителей нельзя запитать от одной линии электропередач из-за возникающей перегрузки. В этом случае погашенный участок разделен на две части размыканием замкнутого в нормальном состоянии переключателя. После этого становится возможным запитать обесточенных потребителей от разных линий рабочей части сети.

Такое «игровое» планирование восстановления энергосистемы может использоваться для тестирования методов оптимизации с целью последующей крупно- или мелкозернистой их гибридизации для решения проблемы планирования восстановления энергосистемы (ППВЭ). Без гибридизации методы игрового планирования не релевантны ППВЭ из-за существенно большего числа ти-

пов объектов и их свойств, которые необходимо учитывать для построения допустимого плана, а также характерных для ППВЭ НЕ-факторов в смысле А. С. Нариньяни [13]. Увеличение числа типов моделируемых объектов связано, например, с невозможностью дистанционных переключений в части электросети, наличия распределенной генерации и активных потребителей, необходимостью учета физических процессов в электросети. К числу НЕ-факторов ППВЭ можно отнести, например, следующие: недоопределенность места аварии на момент планирования восстановления; неточность величины мощности, потребляемой каждым клиентом и генерируемой каждым источником распределенной генерации; нечеткость времени выполнения операций по восстановлению элементов электросети; некорректность работы датчиков аварийного режима; неполнота модели электросети.

На основе анализа работ [2, 12, 14–16], посвященных планированию восстановления распределительной электросети после аварий, была сформулирована ППВЭ, состоящая в разработке плана восстановления энергосистемы, включающего в себя последовательность включения и выключения переключателей, последовательность поездок ремонтных бригад для выполнения переключений и восстановительных работ.

Исходные данные для ППВЭ:

- элементы электросети;
- множества:
 - (1) отношений инцидентности между элементами электросети, множество расположений;
 - (2) маршрутов проезда между расположениями;
 - (3) ремонтных бригад;
 - (4) транспортных средств, ресурсов для восстановления электросети, действий по восстановлению электросети.

Критерии оптимальности плана:

- минимизация времени отключения приоритетной нагрузки;
- максимизация общей восстановленной мощности нагрузки;
- максимизация показателя надежности энергосистемы (устойчивости к последующим авариям).

Ограничения на план:

- сохранение радиальной структуры сети запитанных линий;
- для каждой линии суммарная величина нагрузок, которые питаются от источника распределенной генерации через нее, не должна превышать ее пропускную способность;
- соблюдение баланса активной и реактивной мощности;

- величины напряжения и частоты должны лежать в допустимых пределах;
- потребители, не затронутые первоначальным отключением, не должны отключаться в результате переключений;
- выполнение работ бригадами с соответствующим допуском при наличии в их транспортном средстве необходимых ресурсов;
- вместимость транспортного средства;
- рабочее время бригад;
- транспортные средства должны вернуться на базу;
- при принудительном разделении энергосистемы на острова линии связи между островами должны иметь оборудование синхронизации для последующего объединения островов.

В соответствии с проблемно-структурной методологией А. В. Колесникова [5] эта проблема была редуцирована в декомпозицию, содержащую следующие задачи:

- (1) локализация места аварии с учетом возможности отказа датчиков аварийного режима, для решения которой необходимы знания инженера по релейной защите и автоматике;
- (2) оперативное и краткосрочное прогнозирование активной и реактивной мощностей, потребляемых каждым клиентом после подключения к сети, для решения которой необходимы знания инженера по анализу и прогнозированию режимов энергопотребления;
- (3) оценка требований к выполнению действий по восстановлению элементов электросети, для решения которой необходимы знания инженера по ремонту энергетического оборудования;
- (4) построение маршрутов выездных бригад для выполнения переключений и восстановления поврежденного оборудования (актуальны знания начальника района электрических сетей);
- (5) определение порядка переключений, для решения которой необходимы знания инженера по оперативным режимам организации электроэнергетики;
- (6) составление плана восстановления — задача координации промежуточных решений и интеграции частных решений задач, для решения которой необходимы знания диспетчера регионального оперативно-технологического управления.

Для решения ППВЭ предлагается моделировать коллективное принятие решений оперативным персоналом энергоснабжающей организации, энергетиками, логистами, специалистами по охране труда посредством ГИМСГМ.

3 Функциональная структура гибридной интеллектуальной многоагентной системы гетерогенного мышления

Для компьютерного моделирования методов гетерогенного мышления в малом коллективе экспертов предлагается функциональная структура ГИМСГМ, представленная на рис. 2, — гибридная интеллектуальная многоагентная система [17], расширенная агентом-фасилитатором, организующим коллективные процессы, и соответствующими отношениями между ним и агентами подсистемы решения задачи.

Интерфейсный агент отвечает за взаимодействие с пользователем: запрашивает входные данные и выдает результат, а также визуализирует процесс решения проблемы.

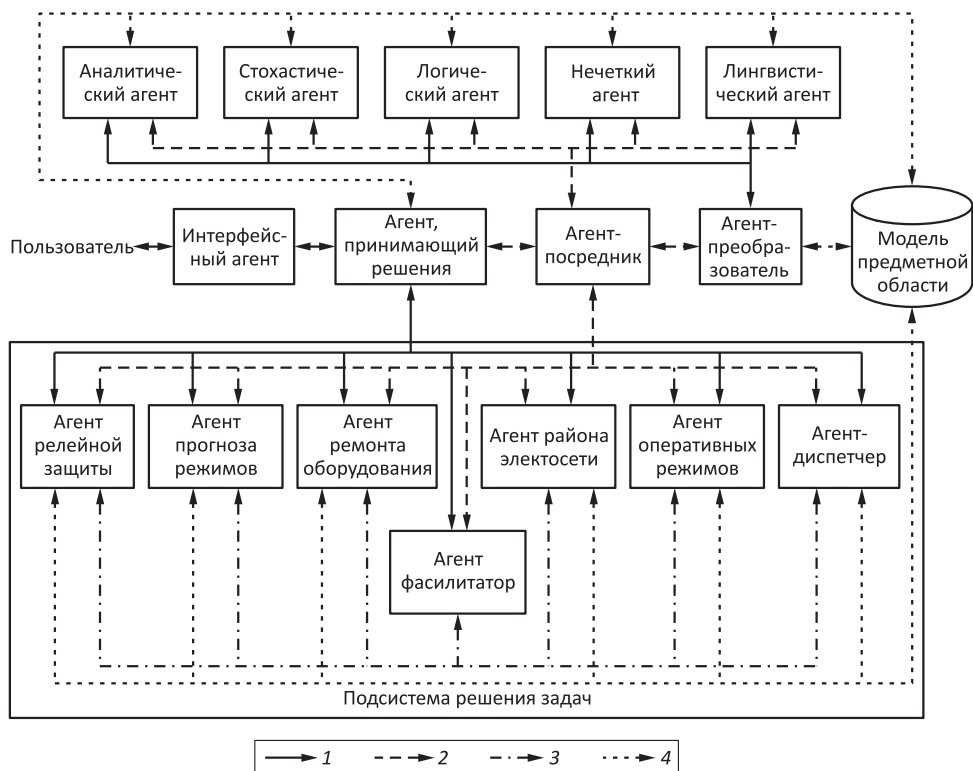


Рис. 2 Функциональная структура ГИМСГМ: 1 — отношения агентов: запросы информации, передача результатов их решения; 2 — отношения агентов: запросы помощи в решении задач; 3 — отношения фасилитации; 4 — взаимодействие (получение сведений из модели, обновление модели) агентов с моделью предметной области

Агент, принимающий решения, моделирующий работу начальника центральной диспетчерской службы регионального диспетчерского управления, ставит задачи агентам-экспертам, собирает результаты работы, определяет, достигнут ли критерий останова, и либо принимает итоговое решение, либо запускает новую итерацию процесса решения проблемы.

Агенты-эксперты: агент релейной защиты, агент прогноза режимов энергопотребления, агент ремонта оборудования, агент района электросети, агент оперативных режимов; агент-диспетчер — имея знания о соответствующей своей «специальности» предметной области и моделируя определенный вид мышления, генерирует решения.

Агент-посредник выполняет служебную работу по отслеживанию имен, моделей и возможностей зарегистрированных агентов.

Агенты-решатели в верхней части рис. 2 вместе с агентом-преобразователем реализуют гибридную составляющую ГИМСГМ, комбинируя разнородные знания, методы, модели и алгоритмы решения задач. Модель предметной области — семантическая сеть, основа взаимодействия агентов, строится по концептуальной модели решаемой задачи.

Ключевое отличие ГИМСГМ от гибридных интеллектуальных многоагентных систем [17] — наличие агента-фасилитатора, который отвечает за организацию эффективной коллективной работы агентов: идентифицирует этапы процесса решения проблемы, состав агентов-экспертов и их «стиль мышления», сложившуюся ситуацию в ГИМСГМ, возникающие положительные и отрицательные групповые эффекты, воздействует на агентов-экспертов, чтобы активировать релевантные ситуации «стиль мышления», минимизировать отрицательные эффекты и усилить положительные, используя среди прочего модель «ромба группового принятия решений» [9]. Согласно этой модели процесс решения проблемы ГИМСГМ проходит три стадии: дивергентного мышления, бурления и конвергентного мышления. На стадии дивергентного мышления агенты-эксперты генерируют множество вариантов решения проблемы, а агент-фасилитатор стимулирует их выработку соответствующими методами [18]. В случае если даже с применением методов дивергентного мышления противоречий не возникает, т. е. задача имеет очевидное решение, процесс завершается. В противном случае между агентами ГИМСГМ возникают конфликты по поводу знаний, убеждений, мнений, т. е. своего рода когнитивный конфликт [18, 19]. Конфликт — отличительная черта стадии бурления, позволяющая агенту-фасилитатору принять меры по сближению точек зрения агентов. На стадии конвергентного мышления агенты совместно переформулируют, дорабатывают предложенные решения, пока не получают коллективное решение, релевантное разнообразию моделей экспертов ГИМСГМ.

Для управления коллективной работой агентов-экспертов ГИМСГМ агент-фасилитатор должен иметь нечеткую базу знаний о релевантности «стилей мышления» агентов различным ситуациям принятия решений в ГИМСГМ, а методов — различным особенностям проблем и стадиям процесса коллективного

принятия решений. Для формирования такой базы знаний необходимо провести серию вычислительных экспериментов по решению проблем из различных классов [5] и установить соответствие между классом проблем и релевантными подходами к организации гетерогенного мышления.

Предлагаемый класс ГИМСГМ обеспечивает комбинирование репрезентации неоднородной функциональной структуры сложной задачи (проблемы) с гетерогенным коллективным мышлением интеллектуальных агентов, что создает условия для решения проблем без упрощения и идеализации в условиях динамической среды. В отличие от традиционных абстрактно-математических моделей, применяемых для решения проблем в условиях подобных сред, в частности проблемы планирования восстановления электросети после масштабных аварий, ГИМСГМ благодаря достаточному запасу компонентов и самоорганизации имеют развитые возможности и средства адаптации к изменениям среды, в том числе путем модификации своей структуры и параметров.

4 Заключение

Рассмотрены особенности решения проблем в условиях динамических сред на примере проблемы планирования восстановления электроснабжения в региональной распределительной электросети после масштабных аварий. Предложена функциональная структура ГИМСГМ для решения данной задачи, рассмотрено назначение ее основных элементов, что в целом перемещает имитацию коллективной работы в область синергетической информатики, когда для получения результата, большего, чем сумма работ, выполняемых индивидуально отдельными агентами, необходимо их взаимодействие. Применение методов гетерогенного мышления в таких системах релевантно моделирует эффективные практики коллективного решения проблем. Внедрение таких систем в практику оперативно-диспетчерского управления позволит вырабатывать решения в проблемных ситуациях сложных динамических сред региональных электросетей.

Литература

1. Автоматизация диспетчерского управления в электроэнергетике / Под ред. Ю. Н. Руденко, В. А. Семенова. — М.: МЭИ, 2000. 648 с.
2. Успенский М. И., Кызродев И. В. Методы восстановления электроснабжения в распределительных сетях. — Сыктывкар, 2010. 124 с.
3. Авария в энергосистеме Калининградской области. <http://allabc.ru/energetika/2212-avariya-v-energositeme-kaliningradskoj-oblasti.html>.
4. Барабаш А. Л., Бонабо Э. Безмасштабные сети // В мире науки, 2003. № 8. С. 54–63.
5. Колесников А. В. Гибридные интеллектуальные системы. Теория и технология разработки. — СПб.: СПбГТУ, 2001. 711 с.

6. *Tarasov V. B.* От многоагентных систем к интеллектуальным организациям: философия, психология, информатика. — М.: Эдиториал УРСС, 2002. 352 с.
7. *Gardner H.* Multiple intelligences — the theory in practice. — New York, NY, USA: Basic Books, 1993. 320 p.
8. *De Bono E.* Parallel thinking: From Socratic to De Bono thinking. — Melbourne: Penguin Books, 1994. 228 p.
9. *Kaner S., Lind L., Toldi C., Fisk S., Beger D.* The facilitator's guide to participatory decision-making. — San Francisco, CA, USA: Jossey-Bass, 2011. 368 p.
10. *Adibi M. M., Fink L. H.* Overcoming restoration challenges associated with major power system disturbances // IEEE Power Energy M., 2006. Vol. 4. Iss. 5. P. 68–77.
11. *Мастерова О. А., Барская А. В.* Эксплуатация электроэнергетических систем и сетей. — Томск: ТПУ, 2006. 100 с.
12. *Thiebaux S., Cordier M.-O.* Supply restoration in power distribution systems — a benchmark for planning under uncertainty // 6th European Conference on Planning Proceedings. — Palo Alto, CA, USA: AAAI Press, 2001. P. 85–96.
13. *Нариньяни А. С.* Инженерия знаний и НЕ-факторы: краткий обзор-08 // Вопросы искусственного интеллекта, 2008. № 1. С. 61–77
14. *Кызродев И. В., Успенский М. И.* Автоматизация восстановления электроснабжения в распределительных сетях // Известия Коми научного центра УрО РАН, 2010. № 2. С. 84–91.
15. *Kumar V., Kumar H. C. R., Gupta I., Gupta H. O.* DG integrated approach for service restoration under cold load pickup // IEEE T. Power Deliver., 2010. Vol. 25. Iss. 1. P. 398–406.
16. *Hentenryck P., Coffrin C.* Transmission system repair and restoration // Math. Program. B, 2015. Vol. 151. P. 347–373.
17. *Колесников А. В., Кириков И. А., Листопад С. В., Румовская С. Б., Доманицкий А. А.* Решение сложных задач коммивояжера методами функциональных гибридных интеллектуальных систем / Под ред. А. В. Колесникова. — М.: ИПИ РАН, 2011. 295 с.
18. *Колесников А. В., Листопад С. В.* Модель гибридной интеллектуальной многоагентной системы гетерогенного мышления для информационной подготовки оперативных решений в региональных электрических сетях // Системы и средства информатики, 2018. Т. 28. № 4. С. 31–41.
19. *Tang A. Y. C., Basheer G. S.* A Conflict Resolution Strategy Selection Method (ConfRSSM) in multi-agent systems // Int. J. Advanced Computer Sci. Appl., 2017. Vol. 8. Iss. 5. P. 398–404.

Поступила в редакцию 31.01.19

FUNCTIONAL STRUCTURE OF THE HYBRID INTELLIGENT MULTIAGENT SYSTEM OF HETEROGENEOUS THINKING FOR SOLVING THE PROBLEM OF RESTORING THE DISTRIBUTION POWER GRID

A. V. Kolesnikov^{1,2} and S. V. Listopad²

¹Immanuel Kant Baltic Federal University, 14 A. Nevskogo Str., Kaliningrad 236041, Russian Federation

²Kaliningrad Branch of the Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 5 Gostinaya Str., Kaliningrad 236000, Russian Federation

Abstract: The problems arising in the operational and dispatching management of regional power grids are characterized by heterogeneity, partial observability of the control object, as well as its dynamic nature, which determines the interdependence of the actions performed and the complexity of correcting erroneous decisions. Traditional abstract-mathematical models are limited and irrelevant to such dynamic environments and, therefore, teams of experts of different specialties are involved but due to the limited time for decision-making, it is not possible to organize comprehensive collective problem solving process. The new class of intelligent systems that simulate collective decision-making under the guidance of the facilitator, who manages the discussion, namely, hybrid intelligent multiagent systems of heterogeneous thinking, is proposed to solve such problems. The paper deals with the functional structure of such system to solve the problem of restoring the distribution power grid after large-scale accidents.

Keywords: heterogeneous thinking; hybrid intelligent multiagent system; the problem of restoring the distribution power grid

DOI: 10.14357/08696527190104

Acknowledgments

The reported study was funded by the Russian Foundation for Basic Research according to the research project No. 18-07-00448A.

References

1. Rudenko, Yu.N., and V. A. Semenova, eds. 2000. *Avtomatizatsiya dispetcherskogo upravleniya v elektroenergetike* [Automation of dispatching control in electric power industry]. Moscow: MPEI Publ. 648 p.
2. Uspenskiy, M. I., and I. V. Kyzrodev. 2010. *Metody vosstanovleniya elektro-snabzheniya v raspredelitel'nykh setyakh* [Methods for restoring electrical supply in distribution networks]. Syktyvkar, 2010. 124 p.

3. Avariya v energosisteme Kaliningradskoy oblasti [Accident in the power system of the Kaliningrad region]. Available at: <http://allabc.ru/energetika/2212-avariya-v-energosteme-kaliningradskoy-oblasti.html> (accessed December 25, 2018).
4. Barabashi, A. L., and E. Bonabo. 2003. Bezmasshtabnye seti [Nonscale networks]. *V mire nauki* [In the World of Science] 8:54–63.
5. Kolesnikov, A. V. 2001. *Gibridnye intellektual'nye sistemy. Teoriya i tekhnologiya razrabotki* [Hybrid intelligent systems: Theory and technology of development]. St. Petersburg: Saint-Petersburg State Institute of Technology Publs. 711 p.
6. Tarasov, V. B. 2002. *Ot mnogoagentnykh sistem k intellektual'nym organizatsiyam: filosofiya, psikhologiya, informatika* [From multiagent systems to intelligent organizations: Philosophy, psychology, and informatics]. Moscow: Editorial URSS. 352 p.
7. Gardner, H. 1993. *Multiple intelligences — the theory in practice*. New York, NY: Basic Books. 320 p.
8. De Bono, E. 1994. *Parallel thinking: From Socratic to De Bono thinking*. Melbourne: Penguin Books. 228 p.
9. Kaner, S., L. Lind, C. Toldi, S. Fisk, and D. Beger. 2011. *The facilitator's guide to participatory decision-making*. San Francisco, CA: Jossey-Bass. 368 p.
10. Adibi, M. M., and L. H. Fink. 2006. Overcoming restoration challenges associated with major power system disturbances. *IEEE Power Energy M.* 4(5):68–77.
11. Masterova, O. A., and A. V. Barskaya. 2006. *Ekspluatatsiya elektroenergeticheskikh sistem i setey* [Operation of power systems and networks]. Tomsk: TPU. 100 p.
12. Thiebaux, S., and M.-O. Cordier. 2001. Supply restoration in power distribution systems — a benchmark for planning under uncertainty. *6th European Conference on Planning Proceedings*. Palo Alto, CA: AAAI Press. 85–96.
13. Narinyani, A. S. 2008. Inzheneriya znaniy i NE-factory: kratkiy obzor-08 [Knowledge engineering and non-factors: A brief overview-08]. *Voprosy iskusstvennogo intellekta* [Artificial Intelligence Issues] 1:61–77.
14. Kyzrodev, I. V., and M. I. Uspensky. 2010. Avtomatizatsiya vosstanovleniya elektrosnabzheniya v raspredelitel'nykh setyakh [Power supply restorative automation in distributive networks]. *Izvestiya Komi nauchnogo tsentra UrO RAN* [Proceedings of the Komi Scientific Center, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences] 2:84–91.
15. Kumar, V., H. C. R. Kumar, I. Gupta, and H. O. Gupta. 2010. DG integrated approach for service restoration under cold load pickup. *IEEE T. Power Deliver.* 25(1):398–406.
16. Hentenryck, P., and C. Coffrin. 2015. Transmission system repair and restoration. *Math. Program. B* 151:347–373.
17. Kolesnikov, A. V., I. A. Kirikov, S. V. Listopad, S. B. Rumovskaya, and A. A. Domnitskiy. 2011. *Reshenie slozhnykh zadach kommivoyazhera metodami funktsional'nykh gibridnykh intellektual'nykh sistem* [Complex travelling salesman problems solved by the methods of the functional hybrid intelligent systems]. Moscow: IPI RAN. 295 p.
18. Kolesnikov, A. V., and S. V. Listopad. 2018. Model' gibridnoy intellektual'noy mnogoagentnoy sistemy geterogennogo myshleniya dlya informatsionnoy podgotovki operativnykh resheniy v regional'nykh elektricheskikh setyakh [Model of a hybrid intelligent multiagent system of heterogeneous thinking for preparation of information about operational decisions in a regional power system]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 28(4):31–41.

19. Tang, A. Y. C., and G. S. Basheer. 2017. A Conflict Resolution Strategy Selection Method (ConfRSSM) in multi-agent systems. *Int. J. Advanced Computer Sci. Appl.* 8(5):398–404.

Received January 31, 2019

Contributors

Kolesnikov Alexander V. (b. 1948) — Doctor of Science in technology; professor, Institute of Physical and Mathematical Sciences and Information Technology, Immanuel Kant Baltic Federal University, 14 A. Nevskogo Str., Kaliningrad 236041, Russian Federation; leading scientist, Kaliningrad Branch of the Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 5 Gostinaya Str., Kaliningrad 236022, Russian Federation; avkolesnikov@yandex.ru

Listopad Sergey V. (b. 1984) — Candidate of Science (PhD) in technology; senior scientist, Kaliningrad Branch of the Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 5 Gostinaya Str., Kaliningrad 236022, Russian Federation; ser-list-post@yandex.ru

ИНФОРМАЦИОННАЯ ПОДДЕРЖКА ИНТЕГРАЦИОННОЙ ПЛАТФОРМЫ МНОГОМАСШТАБНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ*

К. К. Абгарян¹, Е. С. Гаврилов²

Аннотация: Рассмотрены вопросы поиска эффективных решений в области вычислительного материаловедения, которые существенно зависят от возможности за ограниченное время провести многофакторный анализ атомно-кристаллических и квантовых свойств новых материалов. Для такого класса задач в работе применяется технология многомасштабного моделирования, которая предполагает применение распределенных вычислений на высокопроизводительных программных комплексах. Без верификации полученных результатов предсказательного моделирования по экспериментальным данным не представляется возможным создавать адекватные многомасштабные модели, отражающие сущность реальных многомасштабных процессов, которые проходят при получении новых материалов. Важным фактором при практической реализации представленных подходов выступает разработка многокомпонентных интегрированных программных комплексов для информационной поддержки многомасштабного моделирования.

Ключевые слова: многомасштабное моделирование; информационная поддержка; интеграционная платформа; программный комплекс

DOI: 10.14357/08696527190105

1 Введение

Решение современных многомасштабных проблем в связи со своей огромной ресурсоемкостью требует постоянного увеличения вычислительных возможностей аппаратных средств и обновления высокоэффективных программных решений. Технология многомасштабного моделирования предполагает применение распределенных вычислений на высокопроизводительных программных комплексах. Поиск эффективных решений в области материаловедения существенно зависит от возможности за ограниченное время провести многофакторный анализ атомно-кристаллических и квантовых свойств новых материалов. Кроме того, без верификации полученных результатов предсказательного моделирования по экспериментальным данным не представляется возможным создавать адекватные

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 19-08-01191 А).

¹Вычислительный центр им. А. А. Дородницына Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук; Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), kristal83@mail.ru

²Вычислительный центр им. А. А. Дородницына Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук; Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), eugavrilov@gmail.com

многомасштабные модели, отражающие сущность реальных многомасштабных процессов, которые они воспроизводят. Важным фактором при практической реализации представленных в работе подходов выступает разработка многокомпонентных интегрированных программных комплексов.

Решение многомасштабных прикладных задач предполагает проведение вычислительных экспериментов со сложным комбинированием различных инструментальных средств и вычислительных модулей, которые в больших распределенных системах [1] традиционно называются ресурсами. Эффективное управление ресурсами диктует повышенные требования к информационному контенту — динамически изменяющимся и взаимодействующим с вычислительными модулями наборам данных. Данная проблема характеризуется:

- сложностью постановки задач и подходов к их решению;
- многообразием методов и средств моделирования;
- объемами данных и неоднородностью их типов и свойств;
- особенностями подготовки информационного контента и разнообразием методик обработки полученных результатов.

Проблемно-ориентированные информационно-вычислительные программные средства обычно охватывают лишь ограниченный круг прикладных задач предметной области [2, 3] из-за ряда объективных и субъективных факторов, ограничивающих их применение и использование. Для проектирования и реализации систем информационной поддержки вычислительных экспериментов необходимо:

- сформировать слой формального описания взаимодействующих компонентов системы;
- обеспечить наличие развитой интеграционной платформы, т. е. технологической основы для построения и исследования многоуровневых цепочек из тех или иных приложений, обеспеченных необходимыми потоками данных;
- добиваться гибкости архитектурного решения при изменяющихся требованиях как по качеству реализуемой стратегии моделирования, так и по объему загружаемых и сохраняемых данных;
- учитывать требования к изменяющимся системным и аппаратным средствам реализации вычислительного процесса;
- иметь в виду наличие вариативных инструментов реализации сценариев и диспетчеризации вычислительных, интерфейсных и информационных составляющих в рамках децентрализованной, распределенной по гетерогенным узлам системы.

В большинстве концептов бизнес-приложений, таких как логистика, финансы, производство, в сервисной поддержке научных вычислительных экспериментов известный принцип максимальной автоматизации не очень популярен.

Причина этому — человеческий фактор, т. е. основная роль исследователя. Поэтому перед разработчиками средств информационной поддержки и реализации интеграционной основы будущей системы стоит задача предоставить специалистам в предметной области удобный, понятный, гибкий и масштабируемый набор инструментов для подготовки, выполнения и анализа различных по сложности и времени выполнения заданий.

2 Принципы обеспечения информационной поддержки интеграционных систем для многомасштабного моделирования физических явлений и процессов

В настоящее время достаточно часто встречаются исследования [4–7], где формальная спецификация информационных объектов предметной области формулируется в терминах конечно-множественных представлений, которые, в частности, могут быть реализованы посредством доменных моделей — конечных наборов (множеств) данных с поддержкой операций по их обработке. В статье [7] представлены новые понятия и определения, применяемые для описания информационной технологии многомасштабного моделирования. Вводится понятие «базовая модель-композиция», для описания которой применяется теоретико-множественный аппарат [6, 7]. При решении конкретных задач с помощью данной технологии из базовых моделей-композиций составляются многомасштабные композиции (МК) — информационные аналоги многомасштабных моделей (примеры представлены ниже), передающие содержание многомасштабных вычислительных процессов.

В данном разделе показано, как на базе МК строятся сложные иерархические программные системы, применяемые для решения задач многомасштабного моделирования физических явлений и процессов.

При построении интеграционных систем информационного обеспечения многомасштабного моделирования применяется гибридный подход к хранению данных (используются реляционные и документно-ориентированные базы данных). Согласно разработанной технологии базовые модели-композиции (БК) представляют собой информационные аналоги базовых физико-математических моделей [7]. Базовые модели-композиции могут быть представлены в виде таблиц, элементами которых выступают данные и методы их обработки, задействованные в физико-математических моделях. При решении практических задач такие таблицы заполняются конкретными данными и методами их обработки и таким образом формируются экземпляры БК. Можно считать, что базовая модель-композиция представляет собой базовый класс в модели предметной области. Соответственно, экземпляры БК представляются объектами классов-наследников БК в объектно-ориентированном языке программирования [8] и могут храниться в виде документов в документно-ориентированной базе данных [8, 9]. Следуя такой логике, МК можно представить как коллекцию, состоящую из

сгруппированных документов с иерархической структурой, отражающей последовательность присоединения документов (экземпляров БК).

Посредством этих классов осуществляется взаимодействие моделей с конкретной реализацией алгоритма в вычислительном модуле. Документы (экземпляры БК) состоят из типизированной и нетипизированной частей:

- типизированная часть (определяемая атрибутивным составом базовой композиции) отвечает за стыковку БК в МК. Стыковка реализуется посредством сценариев;
- нетипизированная часть содержит специфичные для реализации алгоритма и вычислительного модуля параметры и данные, которые не используются другими БК в сценарии МК.

Необходимо отметить, что среди известных типов баз данных, применяемых для хранения данных вычислительных экспериментов, наиболее подходящей считается документная. Для использования нормализованных и требующих соблюдения строгой целостности данных более удобной оказывается классическая реляционная база данных. Особенностью данной работы является применение гибридного подхода к манипулированию данными. Такой подход, подробно описанный в статье [9] и книге [10], состоит в использовании в одной информационной системе нескольких типов баз данных (документных и реляционных). В данной работе речь идет о гибридном хранении данных. Как отмечалось ранее, БК хранятся в виде документов в документно-ориентированной базе данных [8, 9], а справочные данные, необходимые для выполнения вычислительных экспериментов, хранятся в реляционной базе данных. При этом связь между экземплярами БК в МК — реляционная, с отнесением к соответствующему масштабу.

Таким образом, система информационной поддержки задачи компьютерного моделирования физических процессов интегрирует в универсальную платформу соответствующую МК.

3 Применение сервисно-ориентированной архитектуры для вычислительных модулей

Многообразие типов, платформ, языков программирования и технологий, используемых в вычислительных модулях, порождает системные проблемы при их интеграции в единую вычислительную среду.

В общем случае вычислительный модуль может представлять собой программу, исполняемую локально на платформах Windows, Linux или на вычислительном кластере (MPI, message passing interface) с использованием специфических ресурсов (ядер CPU (central processing unit), GPU (graphics processing unit), библиотек), на физическом узле или в виртуальной машине (специально подготовленном Docker-контейнере).

Для решения задач многомасштабного моделирования используется комбинация модулей обоих типов, причем число модулей для сквозного решения одной задачи составляет от 5 до 7. В дальнейшем для решения целых классов задач потребуется от десятков до сотен модулей. Таким образом, для разработки интеграции необходима сервисная архитектура, обладающая свойством слабой связности, которая позволяла бы масштабировать разработку и интеграцию вычислительных модулей. К тому же программа, представленная в виде сервиса, может быть опубликована в едином сервис-каталоге для повторного использования. В качестве примеров можно привести доступные облачные сервисы Microsoft Azure Machine Learning, Amazon Machine Learning.

Для того чтобы программа (вычислительный модуль) могла быть представлена в виде сервиса, она должна удовлетворять нескольким простым критериям:

- работать в пакетном (неинтерактивном) режиме;
- передавать входные-выходные данные через файлы или другие средства операционной системы, доступные для автоматизации;
- предоставлять возможность управления процессом расчета:
 - запуск;
 - мониторинг процесса расчета;
 - форсированное завершение работы;
 - ведение протокола работы (логирование).

Один из простых способов проектирования интеграции, состоящей из множества независимых сервисов, — микросервисная архитектура [11], обеспечивающая:

- слабую связность;
- независимость процесса разработки, тестирования и развертывания сервисов;
- возможность использовать разные технологии (языки программирования, платформы, базы данных);
- масштабирование на уровне отдельных сервисов.

На рис. 1 представлен сервис для расчетного модуля.

Сервис состоит из следующих компонентов:

- контроллер модуля, отвечающего за запуск, мониторинг выполнения расчета, чтение протокола работы и форсированный останов работы модуля;
- локальная база данных, которая хранит:
 - справочные данные, необходимые только этому модулю;
 - промежуточные или временные результаты расчетов, если это необходимо контроллеру модуля;
 - состояние текущих выполняемых расчетов (ID задачи, PID процесса, статус, время запуска и т. п.);

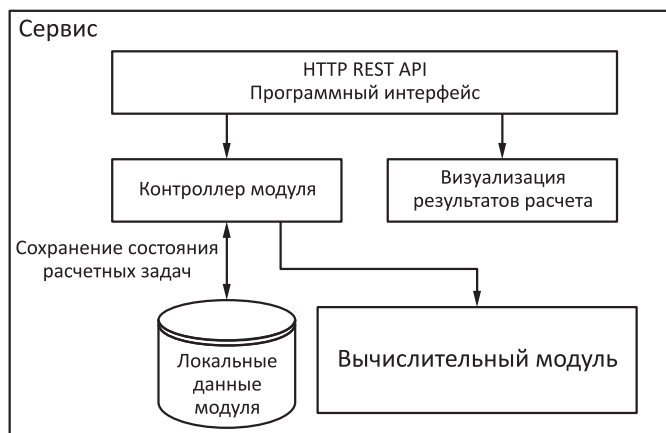


Рис. 1 Вычислительный модуль как сервис

- программный интерфейс для предоставления доступа к функциям контроллера через HTTP (REST, representational state transfer);
- специфическая визуализация результатов или процесса расчета (опционально).

Кроме специфической функциональности сервис расчетного модуля должен обладать общими для всех свойствами, обеспечивая безопасность (аутентификацию и авторизацию доступа, что особенно актуально для лицензируемых и авторских разработок), аудит, абстрагирование от реального расположения сервиса, автоматическое масштабирование (при развертывании в облаке). Эту общую функциональность может обеспечить дополнительный слой, обычно называемый шлюзом для программного интерфейса (API Gateway). Шлюз служит единой точкой входа для всех клиентов API-сервисов и берет на себя общую функциональность, унифицируя при необходимости протокол обмена данными. Таким образом, общий архитектурный ландшафт, представленный на рис. 2 на примере двух сервисов, состоит из следующих компонентов:

- сервисы VASP и «Молекулярная динамика» (выбраны для примера) предоставляют REST-интерфейс для управления расчетами и визуализацию собственных результатов расчетов;
- шлюз API служит точкой доступа для всех сервисов, обеспечивая контроль доступа, аудит, логирование и другую аспектную функциональность для всех сервисов;
- веб-приложение для создания и запуска многомасштабных моделей служит рабочим местом исследователя, планирующего серию вычислительных экспериментов. Приложение вызывает сервисы через шлюз;

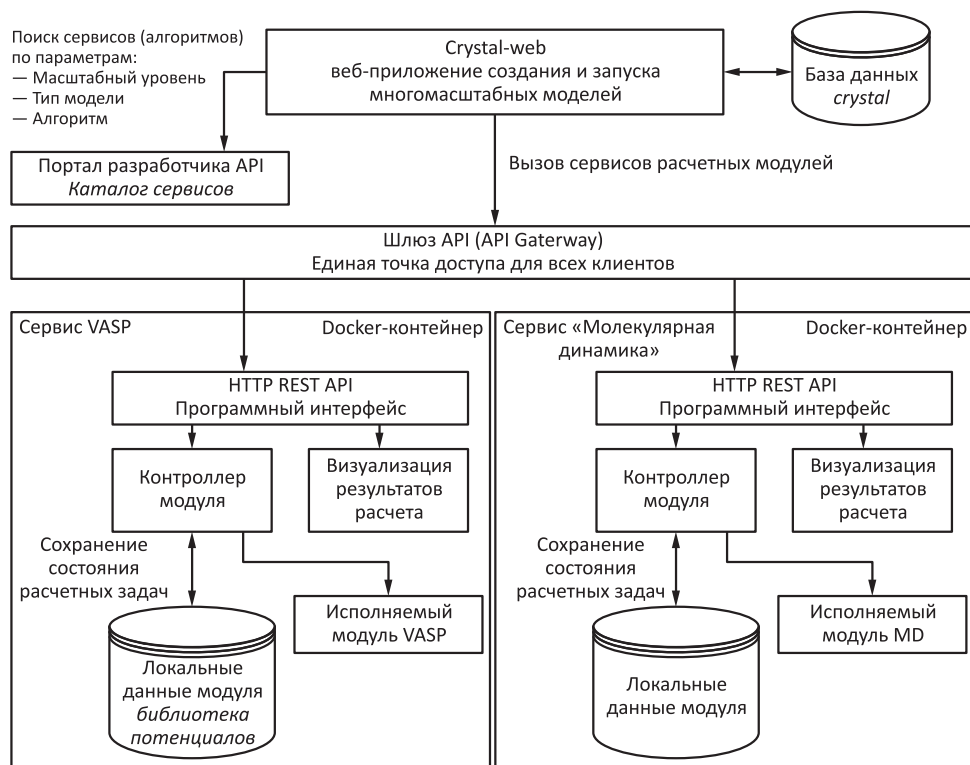


Рис. 2 Общий ландшафт сервисно-ориентированной архитектуры

- база данных crystal выступает основным хранилищем метаданных и данных вычислительных экспериментов;
- портал разработчика API — опциональное веб-приложение, позволяющее искать сервисы, подходящие под запрошенный масштабный уровень, тип модели и алгоритм, заданный в многомасштабной композиции.

Таким образом, предложенная сервисная архитектура решает проблемы с многообразием методов и средств моделирования, позволяя интегрировать большое число существующих и будущих разработок научных коллективов для использования в многомасштабном моделировании.

Литература

1. Таненбаум Э., ван Стеен М. Распределенные системы. Принципы и парадигмы / Пер. с англ. — СПб.: Питер, 2003. 877 с. (*Tanenbaum A. S., van Steen M. Distributed systems: Principles and paradigms. — Prentice Hall, 2001. 803 p.*)

2. *Абгарян К. К., Гаврилов Е. С., Марасанов А. М.* Информационная поддержка задач компьютерного моделирования высокоскоростного взаимодействия твердых тел // *Int. J. Open Information Technologies*, 2014. Vol. 2. No. 12. P. 12–16. <http://injoit.org/index.php/j1/article/view/167/122>.
3. *Абгарян К. К., Гаврилов Е. С., Марасанов А. М.* Информационная поддержка задач многомасштабного моделирования композиционных материалов // *Int. J. Open Information Technologies*, 2017. No. 12. P. 24–29.
4. *Evans E.* Domain-driven design: Tackling complexity in the heart of software. — Addison Wesley Professional, 2003. 560 p.
5. *Бродский Ю. И.* Модельный синтез и модельно-ориентированное программирование. — М.: ВЦ РАН, 2013. 142 с.
6. *Абгарян К. К.* Многомасштабное моделирование в задачах структурного материаловедения. — М.: МАКС Пресс, 2017. 284 с.
7. *Абгарян К. К.* Информационная технология построения многомасштабных моделей в задачах вычислительного материаловедения // *Системы высокой доступности*, 2018. Т. 15. № 2. С. 9–15.
8. *Петцольд Ч.* Microsoft Windows Presentation Foundation: Базовый курс / Пер. с англ. — СПб.: Питер, 2012. 944 с. (*Petzold Ch. Applications = Code + Markup: A guide to the Microsoft Windows Presentation Foundation.* — Microsoft Press, 2006. 1002 p.)
9. *Fowler M.* Polyglot persistence, 2011. <https://martinfowler.com/bliki/PolyglotPersistence.html>.
10. *Рихтер Дж.* CLR via C#. Программирование на платформе Microsoft.NET Framework 4.5 на языке C# / Пер. с англ. — СПб.: Питер, 2017. 896 с. (*Richter D. CLR via C#.* — 4th ed. — Developer reference ser. — Microsoft Press, 2012. 896 p.)
11. *Newman S.* Building microservices. — Sebastopol, CA, USA: O'Reilly Media, Inc., 2015. 282 p.

Поступила в редакцию 15.02.19

INFORMATIONAL SUPPORT OF THE MULTISCALE MODELING INTEGRATION PLATFORM

K. K. Abgaryan^{1,2} and E. S. Gavrilov^{1,2}

¹Dorodnicyn Computing Center, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 40 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation

²Moscow Aviation Institute (National Research University), 4 Volokolamskoe Shosse, Moscow 125080, Russian Federation

Abstract: The article deals with the search for effective solutions in the field of computational materials science which essentially depend on the possibility of conducting a multifactorial analysis of the atomic-crystalline and quantum properties of the new materials for a limited time. For this class

of tasks, a multiscale modeling technology is used, which involves the use of distributed computing in high-performance software packages. Without verification of the results of predictive modeling from experimental data, it is not possible to create adequate multiscale models that reflect the essence of real multiscale processes which take place when new materials are received. An important factor in the practical implementation of the presented approaches is the development of multicomponent integrated software systems for information support of multiscale modeling.

Keywords: multiscale modeling; information support; integration platform; software package

DOI: 10.14357/08696527190105

Acknowledgments

The work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (project 19-08-01191 A).

References

1. Tanenbaum, A. S., and M. van Steen. 2001. *Distributed systems: Principles and paradigms*. — Prentice Hall. 803 p.
2. Abgaryan, K. K., E. S. Gavrilov, and A. M. Marasanov. 2014. Informatsionnaya podderzhka zadach komp'yuternogo modelirovaniya vysokoskorostnogo vzaimodeystviya tverdykh tel [Support task of computer simulation of high-speed interaction of solids]. *Int. J. Open Information Technologies* 2(12):12–16. Available at: <http://injoit.org/index.php/j1/article/view/167/122> (accessed February 15, 2019).
3. Abgaryan, K. K., E. S. Gavrilov, and A. M. Marasanov. 2017. Informatsionnaya podderzhka zadach mnogomasshtabnogo modelirovaniya kompozitsionnykh materialov [Multiscale modeling for composite materials computer simulation support]. *Int. J. Open Information Technologies* 12:24–29.
4. Evans, E. 2003. *Domain-driven design: Tackling complexity in the heart of software*. Addison Wesley. 560 p.
5. Brodskiy, Yu. I. 2013. Model'nyy sintez i model'no-orientirovannoe programmirovaniye [Model synthesis and model-oriented programming]. Moscow: CC RAS. 142 p.
6. Abgaryan, K. K. 2017. *Mnogomasshtabnoe modelirovaniye v zadachakh strukturnogo materialovedeniya* [Multiscale modeling for structural materials science applications]. Moscow: MAKS Press. 284 p.
7. Abgaryan, K. K. 2018. Informatsionnaya tekhnologiya postroeniya mnogomasshtabnykh modeley v zadachakh vychislitel'nogo materialovedeniya [Information technology is the construction of multiscale models in problems of computational materials science]. *Sistemy vysokoy dostupnosti* [High Availability Systems] 15(2):9–15.
8. Petzold, Ch. 2006. *Applications = Code + Markup: A guide to the Microsoft Windows Presentation Foundation*. Microsoft Press. 1002 p.
9. Fowler, M. 2011. Polyglot persistence. Available at: <https://martinfowler.com/bliki/PolyglotPersistence.html> (accessed February 15, 2019).

10. Richter, D. 2012. *CLR via C#*. 4th ed. Developer reference ser. Microsoft Press. 896 p.
11. Newman, S. 2015. *Building microservices*. O'Reilly Media, Inc. 282 p.

Received February 15, 2019

Contributors

Abgaryan Karine K. (b. 1963) — Doctor of Science in physics and mathematics, Head of Department, Dorodnicyn Computing Center, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 40 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation; Head of Department, Moscow Aviation Institute (National Research University), 4 Volokolamskoe Shosse, Moscow 125080, Russian Federation; kristal83@mail.ru

Gavrilov Evgeny S. (b. 1985) — scientist, Dorodnicyn Computing Center, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 40 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation; senior lecturer, Moscow Aviation Institute (National Research University), 4 Volokolamskoe Shosse, Moscow 125080, Russian Federation; eugavrilov@gmail.com

СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ПАКЕТНЫХ КОММУТАТОРОВ НА ОСНОВЕ ИНТЕГРИРОВАННЫХ СЕТЕВЫХ ПРОЦЕССОРОВ

*В. Б. Егоров*¹

Аннотация: Постоянное совершенствование и усложнение протоколов обеспечения качества обслуживания и сетевой безопасности в пакетных сетях заставляет разработчиков коммутаторов и маршрутизаторов во все большей степени отдавать предпочтение методам программной коммутации перед аппаратным продвижением пакетов, а в реализации этих методов — программируемым приборам с дополнительной функциональностью для эффективной поддержки сетевых функций. К таким приборам относятся интегрированные сетевые процессоры (ИСП), представляющие собой практически готовые недорогие программируемые коммутаторы, воплощающие концепцию коммутации на общей памяти. При очевидных достоинствах этой концепции, таких как простота реализации и гибкость, ее «узким местом», принципиально ограничивающим пропускную способность коммутатора, оказывается сама общая память. Предлагаемая подсистема буферирования сетевых кадров и пакетов, которая может быть интегрирована в сетевые процессоры, позволяет снять это ограничение и существенно повысить потенциальную пропускную способность программируемых пакетных коммутаторов на их основе.

Ключевые слова: буферирование; интегрированный сетевой процессор; коммутация на общей памяти; пакетная коммутация

DOI: 10.14357/08696527190106

1 Введение

Постоянное совершенствование и усложнение протоколов обеспечения качества обслуживания и сетевой безопасности в телекоммуникационных сетях заставляет разработчиков пакетных коммутаторов и маршрутизаторов во все большей степени отдавать предпочтение методам программной коммутации (soft switching) перед аппаратным продвижением (hard forwarding) пакетов, а в реализации этих методов — программируемым приборам с дополнительной функциональностью, направленной на эффективную реализацию сетевых функций. К таким приборам в первую очередь относятся интегрированные коммуникационные микроконтроллеры (ИКМ) [1, 2] и ИСП [3, 4]. Между ИКМ и ИСП нет принципиальных различий. В общем случае ИСП предполагает более широкие по сравнению

¹Институт проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук, VEgorov@ipiran.ru

с ИКМ функциональные возможности, достигаемые за счет более сложной организации прибора и, соответственно, более высокой степени его интеграции. Но нередко выбор изготовителем того или иного термина объясняется скорее фирменной традицией, чем действительными характеристиками конкретного продукта или категории продуктов. В дальнейшем будем пользоваться акронимом ИСП как обобщающим для высокоинтегрированных программируемых приборов с организацией, нацеленной на максимально эффективное решение типовых задач инфраструктуры пакетных сетей.

2 Типичный современный интегрированный сетевой процессор

Современный ИСП — это высокопроизводительный программируемый процессор, дополненный контроллерами внешней оперативной и flash-памяти, встроенными сетевыми и общесистемными интерфейсами (PCIe — Peripheral Component Interconnect Express, SATA — Serial Advanced Technology Attachment, USB — Universal Serial Bus, SPI — Serial Peripheral Interface, I²C — Inter-Integrated Circuit и др.), а также специфическими средствами поддержки типовых сетевых функций, включая сопроцессоры и аппаратные ускорители. Центральный процессор ИСП может быть универсальным или специализированным, одно- или многоядерным. Набор сетевых интерфейсов ИСП в настоящее время сводится, как правило, к высокоскоростным интерфейсам Ethernet со скоростями передачи данных 1 (GE), 10 (10GE) и 40 Гбит/с (40GE). Сопроцессоры и специфические функциональные блоки сетевой ориентации могут включать ускорители табличного и контекстного поиска, а также средства информационной и сетевой безопасности. Внутреннюю организацию типичного современного ИСП демонстрирует рис. 1 на примере приборов семейства QorIQ P1/T1 компании Freescale Semiconductor (ныне NXP) [5, 6].

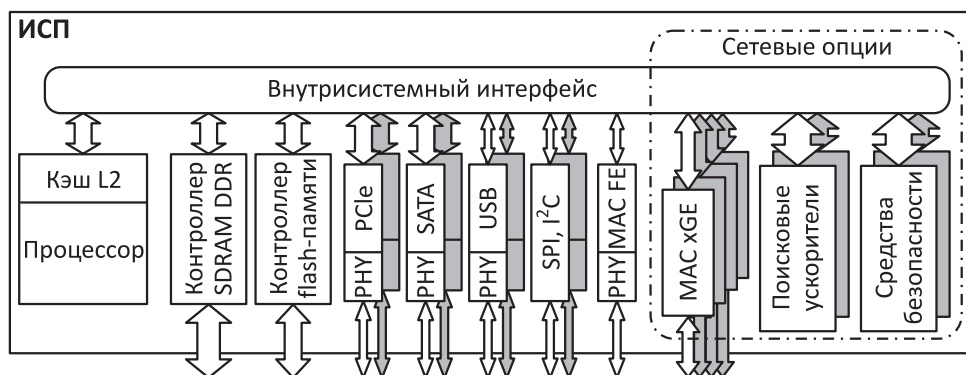


Рис. 1 Обобщенная структура ИСП семейства QorIQ P1/T1

Центральным связующим элементом ИСП служит внутрисистемный интерфейс (ВСИ), в качестве которого в моделях небольшой производительности может выступать традиционная системная шина [5], а в высокопроизводительных — некая коммутационная структура, обладающая высокой пропускной способностью и обеспечивающая поддержку когерентности кэшей многоядерных процессоров [6]. Количество интегрированных интерфейсов может варьироваться в разных моделях ИСП. Например, в ИСП семейства QoIQ P1/T1 число интерфейсов PCIe ранжируется от двух до четырех, а сетевых портов Ethernet — от трех до двенадцати.

3 Интегрированный сетевой процессор как коммутатор с общей памятью

С точки зрения применения в пакетной коммутации ИСП представляет собой практически готовый интегральный коммутатор, воплощающий концепцию коммутации на общей памяти. Эта концепция впервые была реализована программно на универсальных компьютерах, дополняемых сетевыми интерфейсными картами. При коммутации на общей памяти все принимаемые из сети пакеты буферизируются контроллерами сетевых интерфейсов (интерфейсными картами) в оперативной памяти системы с использованием механизма прямого доступа, буферизованные пакеты обрабатываются процессором, а затем они вновь возвращаются прямым доступом к памяти в контроллеры сетевых интерфейсов для отсылки в сеть.

Типичная организация потоков данных в ИСП при коммутации на общей памяти показана на рис. 2. Из рисунка видно, что «узким местом» концепции коммутации на общей памяти оказывается сама оперативная память. (Здесь подразумевается, что в любой корректно спроектированной компьютерной системе, включая ИСП, пропускная способность ВСИ не может быть ниже пропускной способности оперативной памяти, в том числе благодаря наличию альтернативы

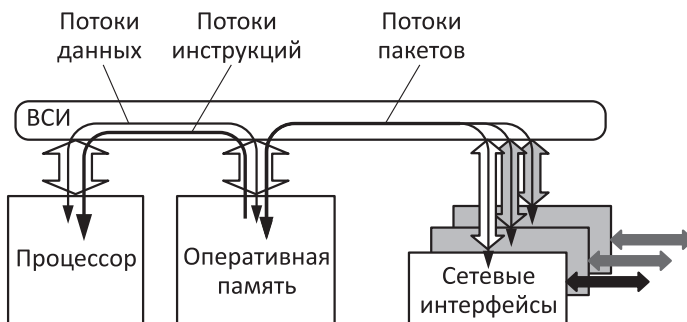


Рис. 2 Организация потоков данных в ИСП при коммутации на общей памяти

системной шине в виде адекватной коммутационной структуры.) Поскольку пропускную способность сетевых интерфейсов можно увеличивать наращиванием числа сетевых карт, а обрабатывающие возможности коммутатора — количеством ядер процессора, именно оперативная память накладывает принципиальное ограничение на общую пропускную способность такого коммутатора. Для оценки этого принципиального ограничения примем следующие типичные для пакетных коммутаторов на общей памяти, современных ИСП и массовых оперативных памяти условия:

- все сетевые порты дуплексные, основная масса входящих пакетов коммутируется, поэтому объемы записываемых в память и считываемых из памяти сетевых данных примерно одинаковы, а циклы чтения и записи в памяти более-менее регулярно чередуются;
- системная оперативная память — SDRAM (Synchronous Dynamic Random Access Memory) DDR (Double Data Rate), а режим чтения и записи данных контроллерами сетевых интерфейсов — фиксированный блочный, по 8 машинных слов в блоке (режим BL8);
- поскольку прямой доступ к памяти сетевых интерфейсов вклинивается в поток инструкций процессора и в общем случае адресуется к иным банкам памяти, каждое обращение к памяти сетевого интерфейса начинается активацией (командой *Activate*), а заканчивается предзарядом (командой *Precharge*);
- доля пропускной способности памяти, отводимая сетевым данным, S_n составляет приблизительно одну треть.

Примерные временные диаграммы (ВД) чтения и записи типовой памяти SDRAM DDR4 компании Hynix [7] при оговоренных условиях показаны на рис. 3.

Для оценки эффективности использования оперативной памяти сетевыми интерфейсами введем некий показатель эффективности использования памяти (ПЭИП) как отношение числа тактов памяти, занятых непосредственно передачей данных, к общему числу тактов в двух смежных циклах чтения и записи.

Как следует из представленных ВД, для памяти SDRAM DDR4 в режиме BL8 с активацией и предзарядом полный цикл чтения блока T_{cr} составляет 21 такт, а записи T_{cw} — 40 тактов. Так как в обоих случаях собственно передача блока данных T_d занимает четыре такта, значение ПЭИП для системной памяти при рассматриваемых условиях:

$$\text{ПЭИП}_{\text{системной памяти}} = S_n \frac{2T_d}{T_{cr} + T_{cw}} = \frac{8}{183} \text{ или } \approx 4,37\%.$$

Таким образом, современная память SDRAM DDR4 с рабочей частотой 1,6 ГГц (3200 МТ/с) способна обеспечить коммутатору с традиционной организацией потоков данных, показанной на рис. 2, удельную пропускную

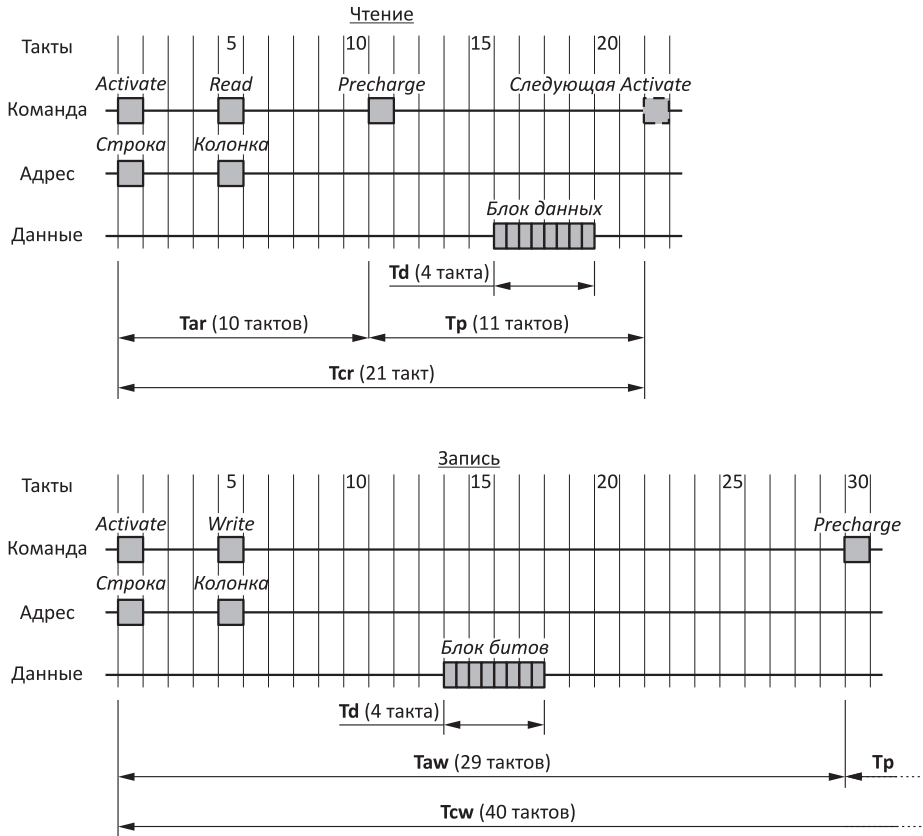


Рис. 3 Примерные ВД чтения и записи памяти SDRAM DDR4 в режиме BL8

способность сетевых данных около 0,14 Гбит/с на разряд. При типовом 64-разрядном модуле памяти получаем для такого коммутатора предел общей пропускной способности около 9 Гбит/с. Практически это означает, что на основе обычного ИСП и стандартного 64-разрядного модуля памяти можно построить «бесконфликтный» коммутатор с девятью сетевыми портами GE. (Число портов может быть бóльшим с учетом статистической недогруженности отдельных портов и при задействовании механизмов обеспечения качества обслуживания, но эти возможности нерелевантны для рассматриваемой оценки.) Таким образом, одним из основных факторов, обуславливающих относительно невысокую пропускную способность традиционных коммутаторов, реализующих концепцию коммутации на общей памяти, является низкий ПЭИП общесистемной оперативной памяти при буферировании сетевых данных. Такой вывод заставляет искать архитектурные решения, нивелирующие этот недостаток.

4 Подсистема буферирования сетевых данных

Относительно простым, но эффективным решением повышения пропускной способности коммутаторов на общей памяти могло бы стать введение в их структуру дополнительной подсистемы буферирования сетевых данных, включающей сетевые интерфейсы и отдельный контроллер памяти для буферирования кадров и пакетов. Внутренний интерфейс подсистемы буферирования (ИПБ) может подключаться к ВСИ, например через тривиальный интерфейсный мост или сегментатор интерфейса.

Первая цель введения подсистемы буферирования сетевых данных заключается в локализации их потоков внутри самой подсистемы и исключение их конкуренции с потоками инструкций и данных процессора на ВСИ, что иллюстрирует рис. 4. В результате сетевые потоки получают возможность почти монополично использовать буферную память ($S_n \approx 1$), уделяя лишь незначительную долю ее пропускной способности процессору при его обращениях через мост к заголовкам буферированных пакетов в процессе их анализа.

Второй, менее очевидной, но не менее важной целью введения подсистемы является существенное повышение ПЭИП при буферировании сетевых данных, достигаемое за счет специального режима работы буферной памяти и ИПБ — принципиально блочного интерфейса, отличающегося следующими положительными свойствами:

- согласование разрядности и ВД его работы с разрядностью и ВД буферной памяти, исключающее дополнительные задержки и накладные расходы сопряжения;
- допущение передач только больших фиксированных порций данных и отсутствие традиционных операций типа чтения слова или записи байта;
- отсутствие необходимости поддержки когерентности данных в его абонентах.

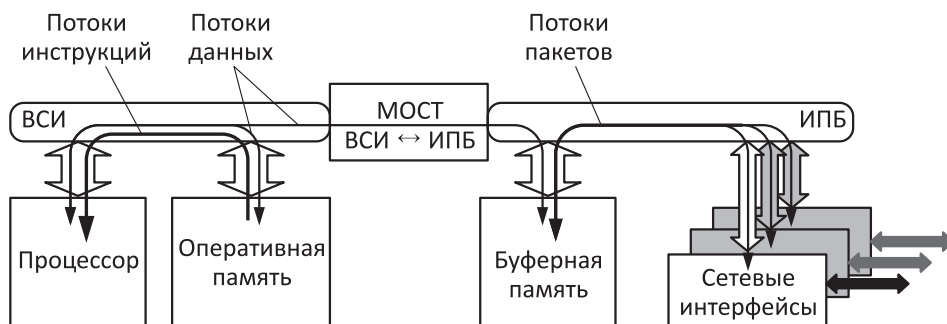


Рис. 4 Организация потоков данных в ИСП с подсистемой буферирования

На ИПБ в каждом цикле передаются исключительно «пачки» данных, состоящих из N блоков по B машинных слов, где N — число групп банков буферной памяти (у памяти SDRAM DDR4 обычно $N = 4$), а B задается режимом транзакций ($B = 8$ для VL8). «Пачки» читаются и пишутся в заданном фиксированном блочном режиме с принудительным интерливингом между группами банков памяти. Для контроллеров сетевых интерфейсов это означает, что они должны обмениваться данными с буферной памятью прямым доступом «пачками» размером, кратным $N \times B$ машинным словам. Так, при использовании стандартного 64-разрядного модуля памяти, $N = 4$ и $B = 8$ размер «пачки» данных должен быть равным или кратным 256 байтам.

Это же правило распространяется и на обращения процессора к буферной памяти через мост. Аппаратура моста может урезать, секционировать и кэшировать «пачки», но в любом случае обращение процессора даже за одним единственным байтом заголовка буферированного пакета будет приводить к считыванию из буферной памяти «пачки», кратной $N \times B$ машинным словам. Следует отметить, что «пачка» минимального размера в 256 байт целиком вмещает в себя заголовки сетевых протоколов, необходимых для коммутации на уровнях L2...L4, в частности кадра Ethernet и инкапсулированных в него пакетов IP (Internet Protocol) и TCP/UDP (Transmission Control Protocol/User Datagram Protocol). При наличии у процессора достаточного объема кэшей все его потребности в этих заголовках удовлетворятся одним-единственным циклом ИПБ. Кроме того, при необходимости разгрузки кэшей процессора прочитанные из буферной памяти «пачки» или их части могут кэшироваться аппаратурой моста.

5 Интегрированный сетевой процессор с подсистемой буферирования

Возможная структура ИСП с подсистемой буферирования сетевых данных показана на рис. 5.

У коммутатора, реализующего концепцию коммутации на общей памяти и построенного на основе ИСП с предлагаемой интегрированной подсистемой буферирования, существенно меняются условия оценки ограничения суммарной пропускной способности:

- потокам сетевых данных отводится практически вся полоса пропускания буферной памяти ($S_n \approx 1$);
- режим чтения и записи сетевых данных по-прежнему фиксированный VL8 с активизацией и предзарядом, но с принудительным интерливингом последовательно по всем группам банков памяти, вследствие чего в каждом разряде буферной памяти в каждом цикле чтения и записи всегда передаются «пачки» из $N \times B$ битов.

Примерная ВД чтения «пачки» из той же памяти SDRAM DDR4 [7] при этих условиях показана на рис. 6.

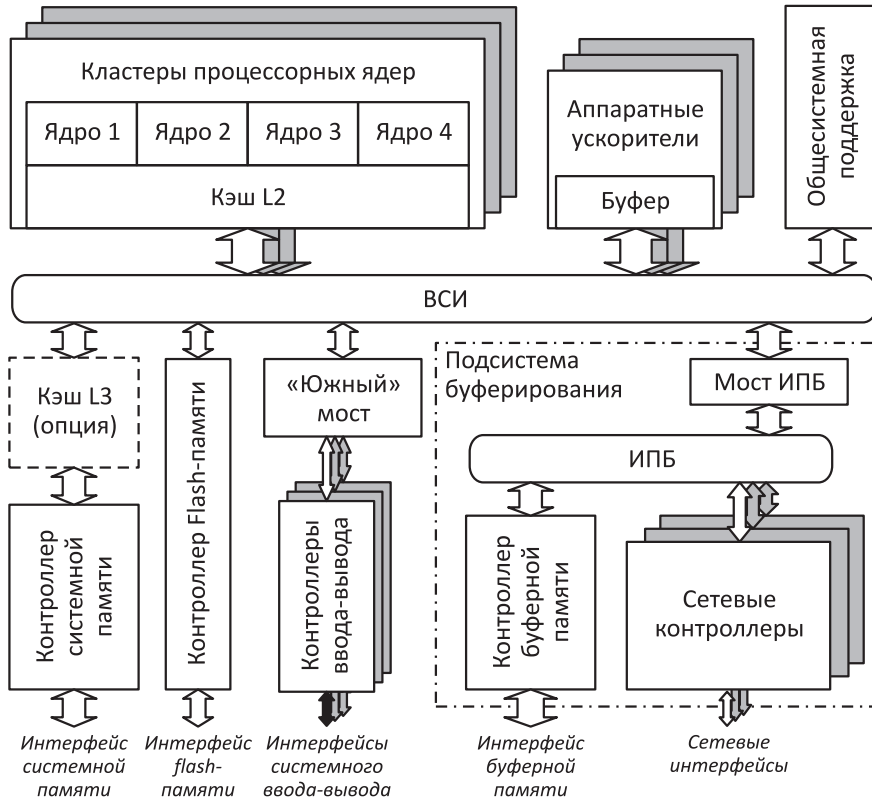


Рис. 5 Возможная структура ИСП с подсистемой буферирования

Как видно из диаграммы, цикл блочного чтения «пачки» T_{cr} составляет 33 такта. Разность длительностей циклов записи и чтения «пачки» не отличается от такой же разности записи и чтения блока в режиме VL8 на рис. 3, т.е. составляет 19 тактов, поэтому полный цикл блочной записи T_{cw} будет равен 52 тактам. В результате ПЭИП буферной памяти при равномерном чередовании чтения и записи «пачек»:

$$\text{ПЭИП}_{\text{буферной памяти}} = \frac{2T_d}{T_{cr} + T_{cw}} = \frac{32}{85} \text{ или } \approx 37,65\%.$$

Полученные 37,65% для буферной памяти по отношению к прежним 4,37% для системной означают выигрыш в использовании памяти и, как следствие, в пропускной способности коммутатора почти на порядок. Интегрированный сетевой процессор со встроенной подсистемой буферирования при использовании

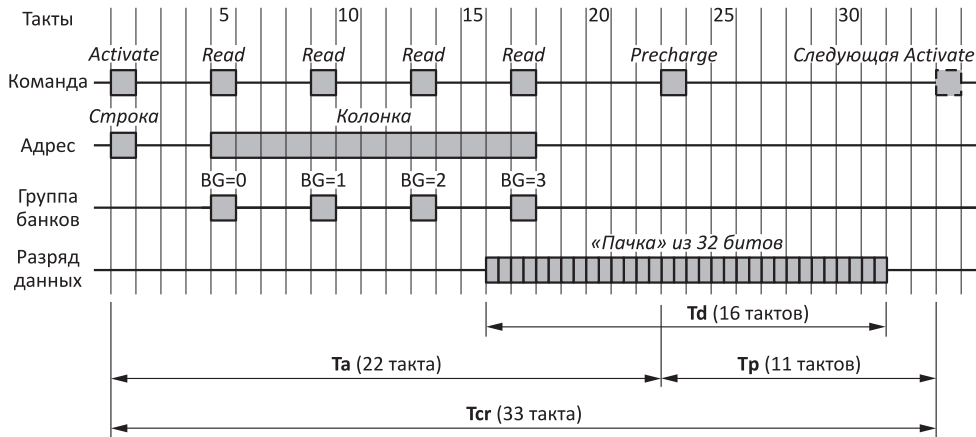


Рис. 6 Примерная ВД чтения «пачки» из памяти SDRAM DDR4

в качестве буферной той же памяти SDRAM DDR4 с рабочей частотой 1,6 ГГц обеспечил бы построенному на его основе коммутатору «бесконфликтную» удельную пропускную способность 1,2 Гбит/с на разряд памяти или суммарно при том же типом 64-разрядном модуле — 76,8 Гбит/с. Таким образом, простейший коммутатор на основе такого модифицированного ИСП уже реально способен поддерживать не единицы, а десятки сетевых портов GE либо несколько портов 10GE, а маршрутизатор доступа в магистральную сеть мог бы иметь, например, один порт 40GE «наверх» и 32...40 портов GE «вниз».

6 Заключение

В статье предложен, описан и оценен способ повышения пропускной способности пакетных коммутаторов на основе ИСП за счет дополнительной подсистемы буферирования сетевых данных: кадров и пакетов. Будучи интегрирована в ИСП, такая подсистема даст возможность повысить предел пропускной способности коммутатора или маршрутизатора, построенного на основе такого модифицированного прибора, примерно на порядок величины при сохранении относительной простоты реализации, функциональной гибкости и невысокой стоимости, свойственным коммутаторам, реализующим концепцию коммутации на общей памяти. При использовании одного-единственного ИСП с интегрированной подсистемой буферирования и одного стандартного 64-разрядного модуля памяти SDRAM DDR4 с рабочей частотой 1,6 ГГц в качестве буферной памяти такой коммутатор способен обеспечить суммарную пропускную способность около 80 Гбит/с. Предел пропускной способности такого коммутатора будет расти пропорционально увеличению разрядности и рабочей частоте буферной памяти.

Литература

1. *Егоров В. Б.* Интегрированные коммуникационные микроконтроллеры компании Freescale Semiconductor и их применение в пакетной коммутации. — М.: ИПИ РАН, 2008. 129 с.
2. *Егоров В. Б.* Аппаратные платформы пакетной коммутации и маршрутизации на основе интегрированных коммуникационных микроконтроллеров. — М.: ИПИ РАН, 2010. 147 с.
3. *Егоров В. Б.* Многоядерные интегрированные сетевые процессоры высокой пропускной способности // Электронные компоненты, 2009. № 7. С. 29–33.
4. *Егоров В. Б.* Подходы к архитектуре интегрированных многоядерных сетевых процессоров. — М.: ИПИ РАН, 2012. 108 с.
5. P1010: QorIQ P1010/14 Low-Power Communications Processors with Trust Architecture. http://www.freescale.com/webapp/sps/site/prod_summary.jsp?code=P1010&nodeld=018rH325E4017B.
6. T1040: QorIQ T Series Quad- and Dual-Core Communications Processors. http://www.freescale.com/webapp/sps/site/prod_summary.jsp?code=T1040&nodeld=018rH325E4017B.
7. SK Hynix. DDR4 SDRAM Device Operation. <http://www.skhynix.com/static/filedata/fileDownload.do?seq=507>.

Поступила в редакцию 19.06.18

A WAY TO ENHANCE THROUGHPUT OF PACKET SWITCHES BUILT ON THE BASIS OF INTEGRATED NETWORK PROCESSORS

V. B. Egorov

Institute of Informatics Problems, Federal Research Center “Computer Sciences and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119133, Russian Federation

Abstract: Permanent perfection and complication of protocols related to quality of service and network security forces packet switches’ creators to shift their preferences from the hardware packet forwarding to soft switching methods and, implementing these methods, to programmable devices with additional network functionality. From this standpoint, network processors represent practically ready to use inexpensive programmable switches realizing the concept of switching on shared memory. Alongside with many merits, this concept has an intrinsic throughput limitation resulting from the memory sharing itself. A subsystem for buffering network frames and packets, which could be integrated into a network processor, removes this limitation and enables the latter to implement easily a programmable switch with an essentially higher potential throughput and all merits of switching on shared memory preserved.

Keywords: buffering; integrated network processor; packet switching; switching on shared memory

DOI: 10.14357/08696527190106

References

1. Egorov, V. B. 2008. *Integrirrovannyye kommunikatsionnyye mikrokontrollery kompanii Freescale Semiconductor i ikh primeneniye v paketnoy kommutatsii* [Integrated communication microcontrollers and their application in the packet switching]. Moscow: IPI RAN. 129 p.
2. Egorov, V. B. 2010. *Apparatnyye platformy paketnoy kommutatsii na osnove integrirrovannykh kommunikatsionnykh mikrokontrollerov* [Packet switching hardware platforms on the base of integrated communication microcontrollers]. Moscow: IPI RAN. 147 p.
3. Egorov, V. 2009. Mnogoyadernyye integrirrovannyye setevyye protsessory vysokoy propusknoy sposobnosti [Multicore integrated processor with high throughput]. *Elektronnyye komponenty* [Electronic Components] 7:29–33.
4. Egorov, V. B. 2012. *Podkhody k arkhitekture integrirrovannykh mnogoyadernyykh setevyykh protsessorov* [Approaches to architecture of multicore network processors]. Moscow: IPI RAN. 108 p.
5. P1010: QorIQ P1010/14 Low-Power Communications Processors with Trust Architecture. Available at: <https://www.nxp.com/products/processors-and-microcontrollers/applications-processors/qorIQ-platforms/p-series/qorIQ-p1010-and-p1014-low-power-communications-processors-with-trust-architecture:P1010> (accessed June 19, 2018).
6. T1040: QorIQ T1040 and T1020 Series Multicore Communications Processors. Available at: <https://www.nxp.com/products/processors-and-microcontrollers/applications-processors/qorIQ-platforms/t-series/qorIQ-t1040-and-t1020-multicore-communications-processors:T1040> (accessed June 19, 2018).
7. DDR4 SDRAM. Device Operation. SK Hynix. Available at: <http://www.skhynix.com/static/filedata/fileDownload.do?seq=507> (accessed June 19, 2018).

Received June 19, 2018

Contributor

Egorov Vladimir B. (b. 1948) — Candidate of Science (PhD) in technology, leading scientist, Institute of Informatics Problems, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119133, Russian Federation; VEgorov@ipiran.ru

ВИДЫ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ В СТРУКТУРЕ ГЕНЕРАЛИЗАЦИИ ГЕОДАННЫХ

*Д. А. Никишин*¹

Аннотация: Предложено целостное описание многоуровневой структуры генерализации геоданных, содержащей неоднородные информационные объекты (ИО). Представлена типология отношений ИО различных уровней обобщения, в контексте которой определен формальный критерий свойства обратимости генерализации. Рассмотрена типология неоднородностей, возникающих при сопоставлении некоторых типов ИО, и способы их устранения. Вводится критерий неоднородности структуры генерализации, понятие сегмента однородной генерализации. Приведены практические примеры неоднородной генерализации в топографии.

Ключевые слова: геоданные; картографическая генерализация; генерализация пространственных данных; цифровая картография; геоинформатика

DOI: 10.14357/08696527190107

1 Введение

Данная работа продолжает цикл публикаций, посвященных тематике генерализации пространственных данных в контексте формирования подходов к построению обобщающей методологии обратимой генерализации и спецификации ИО (ОГИО) [1], которую предполагается распространить на процессы генерализации данных как в текстовой [2–4], так и в пространственно-временной форме [5, 6].

Актуальность создания методологии ОГИО определяется необходимостью разработки моделей информатики и геоинформатики, описывающих конкретно-абстрактные и абстрактно-конкретные преобразования данных в интегрированных информационных системах на основе единой парадигмы информационных трансформаций полиадического компьютеринга [7]. Одним из практических применений этого может служить, например, совершенствование методов информационного поиска, анализа и визуализации данных [8–10].

Целью работы ставился анализ структуры многоуровневой генерализации геоданных и возможных ее неоднородностей, влияющих на методы и процессы генерализации. Необходимо отметить, что неоднородность генерализируемых данных выступает ключевым фактором сложности создаваемой методологии обратимой генерализации.

¹Институт проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук, dmnikishin@mail.ru

2 Многоуровневая структура генерализации

Под *информационным объектом* ниже понимается совокупность данных, которая обрабатывается (в том числе генерализируется) как единое целое — т. е. является элементом данных. С другой стороны, ИО служит модельным описанием того или иного объекта, выделяемого в описываемой предметной области (в географическом контексте — геообъекта).

Сущность процесса *генерализации*, согласно определению из [11], можно охарактеризовать как «действие, направленное к отысканию и выделению главного, общего, определяющего». Хотя процесс генерализации применяется непосредственно к самим ИО (экземплярам данных), правила генерализации, по сути, определяются над *классами/типами* моделей генерализируемых данных и заключаются в алгоритмической реализации правил обобщения информации этих моделей данных. При этом в процессе генерализационного преобразования возможно вторичное уточнение его процедуры относительно свойств конкретного набора данных, например удельного соотношения объектов определенных классов/типов и/или их свойств.

Также следует отметить, что структура генерализационных преобразований в общем случае может быть *многоуровневой*, наглядными примерами служат процессы генерации масштабного ряда топографических карт или «пирамиды» цифрового изображения. Хотя на каждом уровне, в принципе, могут быть определены собственная цель (предназначение результатов) обобщения и соответствующие методы и степень генерализации исходных ИО [6], но обычно они совпадают на всех уровнях. В результате формируется многоуровневая иерархическая структура данных, в которой каждый ИО связан *отношениями генерализации* информации с соответствующими ему ИО более высокого уровня обобщения, а те, в свою очередь, соотносятся с объектами нижележащего уровня посредством *отношений детализации* (для текстовых данных применяется термин спецификация). Совпадение отношений генерализации и детализации обуславливает *принцип обратимости генерализации*, о котором шла речь в [1, 3–6].

Можно выделить следующие категории преемственности данных в смежных уровнях обобщения, проиллюстрированные на рис. 1:

- (а) *отсутствующее* («пустое») соответствие, когда исходный ИО не получает никакого отражения в генерализированном множестве данных, например фильтрация малозначимых объектов или исключение категорий данных, не соответствующих тематической направленности специфического варианта генерализации, свойство *вариантности* рассматривалось в [5, 6];
- (б) *однозначное* соответствие между исходным и генерализированным ИО («один к одному»), когда преобразование заключается в *изменении степени детальности* данных в рамках текущей модели геообъекта, упрощении его пространственного и/или семантического описания, например изменение метрического

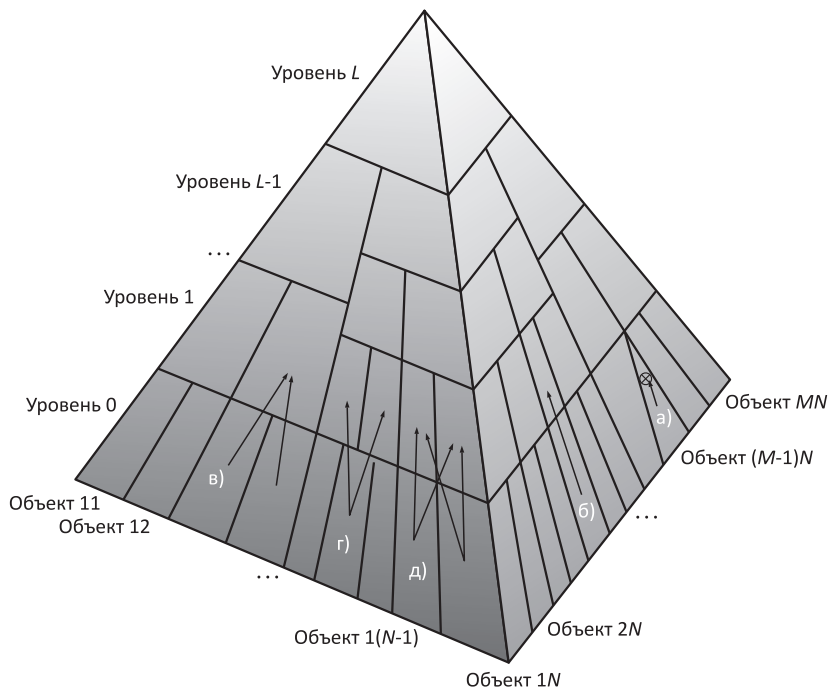


Рис. 1 Виды связей ИО в структуре генерализации данных

класса объекта с площадного на линейный или точечный, округление его числовых и текстовых характеристик [6];

- (в) *многозначное* соответствие между несколькими исходными и одним обобщающим ИО («многие к одному»), в котором можно выделить два этапа: *упрощение* каждого из исходных ИО согласно описанному выше преобразованию (б) и *слияние* данных в общий генерализованный ИО; при этом может *изменяться* сама *модель* описания генерализованного объекта: например, вместо множества отдельных объектов типа «карстовая воронка» в генерализованном наборе будет фигурировать обобщающий их объект типа «район распространения карста» [6];
- (г) *многозначное* соответствие между одним исходным и несколькими обобщающими ИО («один ко многим») возникает, когда ИО нижнего уровня не получают однозначной преемственности на высшем уровне, а их данные участвуют в формировании нескольких ИО высшего уровня. Характерным примером может служить такой геообъект, как «храм» (церковь, мечеть, пагода и т. п.), который одновременно может выступать в трех ипостасях: как собственно строение, а также как ориентир на местности и как пространственный репер из-за характерного намерения таких сооружений;

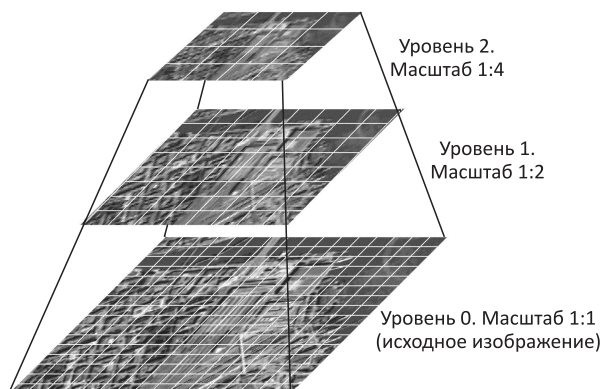


Рис. 2 Пример «пирамиды» генерализации изображения [12]

(д) отношение типа «многие ко многим» в принципе также возможно, но в контексте данной работы не рассматривается — этот вопрос требует дополнительных исследований; можно считать, что это отношение может быть представлено как совокупность рассмотренных выше категорий.

В качестве примера многоуровневой структуры *генерализации однородных данных* можно привести показанную на рис. 2 «пирамиду» цифрового растрового изображения — ряд изображений, построенный по принципу уменьшения детальности [12]. Такой подход вызван насущной необходимостью использовать варианты исходного изображения, генерализированного в различной степени, в процессах его анализа и визуализации.

В представленном случае речь идет об однородных по своей сути ИО — пикселях, представление которых на любом уровне генерализации абсолютно однотипно, при этом имеет место только один из видов связей. Все это позволяет избежать сложных сценариев анализа внутренней структуры объектов, а также ряда других проблем, присущих рассматриваемым ниже процессам генерализации неоднородных ИО.

3 Неоднородности в структуре генерализации данных

Кроме рассмотренной выше «вертикальной» сегментации структуры генерализации данных по уровням обобщения в случае присутствия в ней разнородных данных (примером служит векторная карта [5]) также имеет место ее «горизонтальная» сегментация. Она обусловлена тем, что ИО в таких наборах данных в общем случае различны между собой: во-первых, модели геообъектов образуют сложную структуру семантических и метрических классов геоонтологии; во-вторых, каждый ИО как экземпляр модели геообъекта в рамках того или иного класса может иметь собственную конечную структуру.

Эти различия имеют аналогию с проблематикой «очистки данных» (data cleaning), которая имеет место как для отдельных наборов данных, так и при интеграции данных из различных источников [13, 14]. Эта аналогия заключается в необходимости согласования данных по структуре, представлению и содержанию [15]. Но вместе с тем здесь речь идет не о наличии ошибок в данных, а о конфликтах, возникающих в процессе обобщения ИО, корректных самих по себе, но различающихся особенностями описания (представления). Такой конфликт, в общем, является не ошибкой, а лишь неоднородностью, для устранения которой требуется *приведение* (трансформация) данных ИО к сопоставимому виду.

Такая ситуация присуща не только генерализации разнотипных данных из одного набора, но может возникать и при обобщении сопоставимых данных из источников с различными концептуальными схемами (онтологиями), что является проявлением свойства альтернативности генерализации [6].

Итак, в контексте обобщения нескольких ИО предлагается выделить следующие ниже *виды неоднородностей*. Эти неоднородности и соответствующие способы их устранения¹ также проиллюстрированы на рис. 3 для пары исходных ИО1 и ИО2 и результата их обобщения — генерализированного объекта ИОГ.

1. Если имеется несколько ИО с одинаковой структурой, то при обобщении *значений идентичных свойств* этих объектов неоднородность может проявляться следующим образом:
 - (а) в виде *различия* в реальной *точности* значений, что может оказаться важным в некоторых случаях, однако никаких дополнительных действий при этом не требуется, поэтому этот случай не показан на рис. 3;
 - (б) в виде *различия* применяемых *единиц*, например в показанном на рис. 3 обобщении (в данном случае суммировании) значений свойства «площадь» требуется выраженное в м² значение пересчитать в га; при этом для согласования точности результата необходимо преобразование более точного значения (101,24 м²) в значение меньшей точности (0,01 га), а не наоборот. Аналогичный пример может иметь место при интеграции альтернативных отечественных и зарубежных данных, например значений высот, традиционно выражаемых в метрах и футах;
 - (в) в виде *различных* способов представления значений (применяемых *типов* данных), например для показанного на рис. 3 обобщения необходимо преобразование строкового значения в численное. Менее наглядным, но также важным представляется случай с обобщением значений типов вещественного числа float и double — здесь принципиальным является

¹Рассматривая процедуру генерализации как функцию, принимающую набор детальных ИО и возвращающую в качестве результата генерализированный объект(ы), способы устранения неоднородностей можно свести к временному (оперативному) пересчету этих данных, не затрагивающему данные исходных ИО.

	Класс ИО	Свойство	Тип	Единицы	Исходное значение	Преобразование	Приведенное значение
Случай 1б							
ИО1	строение	"Площадь"	float	м2	201.24	преобразование значения	0.02 (га)
ИО2	квартал	"Площадь"	float	га	0.12	без преобразования	0.12
ИОГ	квартал	"Площадь"	float	га			0.14
Случай 1в							
ИО1	строение	"Кадастровая стоимость"	string	млн. руб.	"0.84"	преобразование типа данных	0.84
ИО2	квартал	"Кадастровая стоимость"	double	млн. руб.	3.79	без преобразования	3.79
ИОГ	квартал	"Кадастровая стоимость"	double	млн. руб.			4.63
Случай 2							
ИО1	строение	"Имеет значение ориентира"	bool	--	1	без преобразования	1
ИО2	квартал	(свойство отсутствует)	--	--	--	дополнение структуры	(bool) default=0
ИОГ	квартал	"Имеет значение ориентира"	bool	--			1
Случай 3							
ИО1	строение	"Материал сооружения"	enum	--	каменное	преобразование свойства	огнестойкое
ИО2	квартал	"Характер огнестойкости"	enum	--	неогнестойкий	без преобразования	неогнестойкий
ИОГ	квартал	"Характер огнестойкости"	enum	--			смешанный

Рис. 3 Примеры неоднородностей и способов их устранения

условие приведения того операнда, чей тип данных менее емкий по своей области значений, например 32-битного float в 64-битный double, а не наоборот. В этом контексте также возникает задача обобщения значений идентичных свойств, выраженных соответственно в количественной и в качественной форме, что требует особых процедур их сопоставления (см., например, [16]).

2. Может иметь место обобщение ИО с адаптируемой структурой, в которой наличие некоторых свойств опционально и обуславливается конкретными особенностями описываемых геообъектов: у одних некое свойство имеется,

а у других оно отсутствует, поскольку неизвестно его значение или оно вообще не применимо. Такой подход реализован, например, в классификаторах топографической информации RSC отечественной ГИС «Панорама» [17], где предполагается деление набора свойств класса на «обязательные» и «возможные». Аналогичная ситуация возникает и в случае сопоставления ИО разных классов. Все это может обуславливать различие в наборах фактически имеющихся свойств у обобщаемых ИО. В случае отсутствия у некоторых ИО требуемого свойства может потребоваться дополнение его *структуры* недостающим свойством со значением по умолчанию. На рис. 3 показана ситуация, когда у одного из объектов отсутствует свойство «Имеет значение ориентира», в связи с чем оно задается со значением по умолчанию (default), равным 0 («не имеет»). В результате генерализированный квартал приобретает значение ориентира, поскольку в нем теперь содержится выдающееся здание.

3. Также возможен случай, когда обобщаемые ИО имеют *свойства*, формально определенные по-разному, но *идентичные между собой* (синонимия) или по крайней мере близкие по своей сути. На рис. 3 показан пример такой пары: свойство «Материал сооружения» и свойство «Характер огнестойкости», — сопоставление этих свойств осуществлено посредством приведения значений классификатора материалов к соответствующим значениям классификатора степеней огнестойкости. В показанном на рис. 3 примере значение «каменное» сопоставлено со значением «огнестойкий», соответственно, обобщение полученных значений привело к обобщенному значению «Характер огнестойкости = смешанный». Таким образом, для разрешения этой неоднородности требуется определение правил идентификации родственных свойств и сопоставления их значений.

В завершение нужно отметить, что на рис. 3 также присутствует ситуация, которую можно охарактеризовать как неоднородность ИО *по уровням обобщения*: ИО1 соответствует отдельному строению, а ИО2 — кварталу застройки — концепту, который уже объединил в себе отдельные строения (на предыдущем этапе генерализации). Возникновение такой ситуации возможно, если соответствующее ИО1 строение имеет особое значение (например, ориентира), вследствие чего на предыдущем этапе генерализации оно не было включено в какой-либо квартал застройки, а сохранилось как отдельный выдающийся объект.

4 Критерий неоднородности структуры генерализации

Вместе с тем нужно отметить, что даже если в множестве обобщаемых данных содержатся неоднородные ИО, то это еще не значит, что сама структура генерализационных преобразований является неоднородной. Критерием служит наличие в ней функций, обобщающих неоднородные ИО — *функций неоднородной генерализации*, но в ряде случаев нет необходимости их использовать.

Так, в коллекции разнородных изображений (например, с различным битрейтом) пирамида каждого из них генерализируется однородно, при этом ИО — вершины этих пирамид будут неоднородны между собой; но если они между собой не обобщаются, то функциональность неоднородной генерализации здесь не используется. В противном случае, если, например, эти разнородные ИО в конечном счете должны быть сведены к одному объекту, неоднородность генерализации неизбежна.

Исходя из этого, в структуре генерализации предлагается выделить новый структурный элемент — *сегмент однородной генерализации*, который можно определить как фрагмент общей структуры генерализации, в котором имеют место только функции однородной генерализации, т. е. функции, в которых участвуют наборы однородных ИО. Примером такого сегмента служит рассмотренная выше пирамида цифрового изображения (см. рис. 2). В свою очередь, неоднородная структура генерализации может включать в себя такие сегменты, которые объединяются между собой уже при помощи функций генерализации неоднородных ИО.

Примером многоуровневой структуры неоднородной генерализации в геoinформатике служит процесс генерации масштабного ряда топографических карт. Пример процедуры неоднородной генерализации — обобщение ИО, принадлежащих различным метрическим классам. Более сложным примером может служить объединение геообъектов таких классов, как «лесные массивы» и «населенные пункты», в обобщенный класс «маски местности»; а объекты типа «насыпи», «выемки», «валы», «овраги», «реки» и др. могут быть объединены в комплексный тип «преграды (для движения)».

5 Аспекты генерализации различных компонент данных

Как говорилось в работе [5], в составе геоданных можно выделить семантическую, пространственную и временную компоненты. Соответственно, применительно к генерализации данных могут иметь место ее следующие подвиды:

- *семантическая* — генерализация семантических свойств, связанная с обобщением смысловых категорий¹ в рамках текущей модели геообъекта или при переходе к более общей модели;
- *пространственная* (генерализация метрики) — способы генерализации в пространственном отношении были подробно рассмотрены в [6]. Основными способами выступают упрощение метрического описания геообъекта (в том числе связанное с преобразованием класса метрики) и агрегирование нескольких

¹ В логике аналогом семантической генерализации служит логическая операция обобщения понятий [18], посредством которой в результате расширения или исключения видового признака (т. е. прилагательного) получается другое понятие, более широкого объема, но менее конкретного содержания, результатом операции обобщения является гипероним. Переход от частного к общему, на более высокую степень абстракции, служит одним из этапов получения нового знания.

- объектов в один (в том числе в объект нового, обобщающего семантического класса);
- *временная* (генерализация по оси времени) — по своей сути сводится к обобщению кратковременной вариабельности динамически изменяющихся данных, такая генерализация применима при решении ряда задач (см., например, [19, 20]).

6 Заключение

Целью данной работы ставился анализ структуры многоуровневой генерализации геоданных, содержащей неоднородные ИО. В работе предложено целостное описание такой структуры, которое включает типологию отношений ИО различных уровней обобщения. В контексте этой типологии определен формальный критерий свойства обратимости генерализации. Также рассмотрена типология неоднородностей, возникающих при сопоставлении некоторых видов ИО, и показаны способы их устранения. Введен критерий неоднородности структуры генерализации и понятие сегмента однородной генерализации. Представленный материал проиллюстрирован практическими примерами неоднородной генерализации в топографии. Все это закладывает концептуальную основу обобщающей методологии обратимой генерализации и спецификации ИО, направленной на решение практических задач информационного поиска, анализа, обработки и визуализации данных, в том числе и в интегрированных информационных системах.

Литература

1. Зацман И. М. Методология обратимой генерализации в контексте классификации информационных трансформаций // Системы и средства информатики, 2018. Т. 28. № 2. С. 128–144.
2. Codd E. F. Extending the database relational model to capture more meaning // ACM T. Database Syst., 1979. Vol. 4. Iss. 4. P. 395–434.
3. Зацман И. М., Мамонова О. С., Щурова А. Ю. Обратимость и альтернативность генерализации моделей перевода коннекторов в параллельных текстах // Системы и средства информатики, 2017. Т. 27. № 2. С. 125–142.
4. Зацман И. М., Кружков М. Г., Лоцилова Е. Ю. Методы анализа частотности моделей перевода коннекторов и обратимость генерализации статистических данных // Системы и средства информатики, 2017. Т. 27. № 4. С. 164–176.
5. Никишин Д. А. Сопоставление особенностей представления геоданных в картографии и геоинформатике // Системы и средства информатики, 2018. Т. 28. № 2. С. 60–74.
6. Никишин Д. А. Процессы генерализации в аналоговой и цифровой картографии // Системы и средства информатики, 2018. Т. 28. № 3. С. 204–216.
7. Rosenbloom P. S. On computing: The fourth great scientific domain. — Cambridge, MA, USA: MIT Press, 2013. 307 p.

8. *Das Sarma A., Lee H., Gonzalez H., Madhavan J., Halevy A.* Efficient spatial sampling of large geographical tables // ACM SIGMOD Conference (International) on Management of Data Proceedings. — New York, NY, USA: ACM, 2012. P. 193–204.
9. *De Andrade F. G., de Souza Baptista C., Henriques H. B.* Semantic annotation of geodata based on linked-open data // 7th Conference (International) on Management of Computational and Collective Intelligence in Digital EcoSystems Proceedings. — New York, NY, USA: ACM, 2015. P. 9–16.
10. *Huang X., Choi B., Xu J., Cheung W. K., Zhang Y., Liu J.* Ontology-based graph visualization for summarized view // ACM Conference on Information and Knowledge Management Proceedings. — New York, NY, USA: ACM, 2017. P. 2115–2118.
11. *Комков А. М., Николаев С. А., Шулов Н. И.* Составление и редактирование карт. — М.: ВИА, 1958. 248 с.
12. *Комиссаров Д. В.* Методика решения проблем цифрового фототриангулирования // Труды Междунар. конф. RDAMM, 2001. Т. 6. Ч. 2. С. 213–217.
13. Schema matching and mapping / Eds. Z. Bellahsene, A. Bonifati, E. Rahm. — Berlin–Heidelberg: Springer-Verlag, 2011. 326 p.
14. *Chiang Yao-Yi, Bo Wu, Anand A., Akade K., Knoblock C. A.* A system for efficient cleaning and transformation of geospatial data attributes // 22nd ACM SIGSPATIAL Conference (International) on Advances in Geographic Information Systems Proceedings. — New York, NY, USA: ACM, 2014. P. 577–580.
15. *Hong-Hai Do.* Data conflicts // Encyclopedia of database systems. — Boston, MA, USA: Springer US, 2009. P. 565–569.
16. *Ahlers D.* Granularity as a qualitative concept for GIR // 9th Workshop on Geographic Information Retrieval Proceedings. — New York, NY, USA: ACM, 2015. Article No. 4. P. 1–2.
17. ГИС «Панорама» ПАРБ.00046-03. Форматы и спецификации данных. Формат классификатора RSC. <https://gistoolkit.ru/download/doc/formatrsc.pdf>.
18. *Гетманова А. Д.* Учебник по логике. — 2-е изд. — М.: ВЛАДОС, 1995. 303 с.
19. *Kang Q., Liao W., Agrawal A., Choudhary A.* A filtering-based clustering algorithm for improving spatio-temporal kriging interpolation accuracy // 25th ACM Conference (International) on Information and Knowledge Management Proceedings. — New York, NY, USA: ACM, 2016. P. 2209–2214.
20. *Atluri G., Karpatne A., Kumar V.* Spatio-temporal data mining: A survey of problems and methods // ACM Comput. Surv., 2018. Vol. 51. Iss. 4. P. 1–41.

Поступила в редакцию 12.02.19

TYPES OF INHOMOGENEITIES IN THE STRUCTURE OF GEODATA GENERALIZATION

D. A. Nikishin

Institute of Informatics Problems, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119133, Russian Federation

Abstract: A holistic description of the multilevel structure of the generalization of geodata containing nonuniform information objects is proposed.

A typology of relations of information objects of various levels of generalization is presented, in the context of which the formal criterion of the property of generalization reversibility is defined. The typology of inhomogeneities arising from the comparison of certain types of information objects and ways to eliminate them are considered. The criterion of heterogeneity of the structure of generalization and the concept of a segment of homogeneous generalization are introduced. Practical examples of nonuniform generalization in topography are given.

Keywords: geodata; cartographic generalization; generalization of spatial data; digital cartography; geoinformatics

DOI: 10.14357/08696527190107

References

1. Zatsman, I. M. 2018. Metodologiya obratimoy generalizatsii v kontekste klassifikatsii informatsionnykh transformatsiy [Methodology of reversible generalization in the context of classification of information transformations]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 28(2):128–144.
2. Codd, E. F. 1979. Extending the database relational model to capture more meaning. *ACM T. Database Syst.* 4(4):395–434.
3. Zatsman, I. M., O. S. Mamonova, and A. Yu. Shchurova. 2017. Obratimost' i al'ternativnost' generalizatsii modeley perevoda konnektorov v paralel'nykh tekstakh [Reversibility and alternativeness of generalization of connectives translations models in parallel texts]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 27(2):125–142.
4. Zatsman, I. M., M. G. Kruzhkov, and E. Yu. Loshchilova. 2017. Metody analiza chastotnosti modeley perevoda konnektorov i obratimost' generalizatsii statisticheskikh dannykh [Methods of frequency analysis of connectives translations and reversibility of statistical data generalization]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 27(4):164–176.
5. Nikishin, D. A. 2018. Sopostavlenie osobennostey predstavleniya geodannykh v kartografii i geoinformatike [Comparison of characteristics of the representation of geodata in cartography and geoinformatics]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 28(2):60–74.
6. Nikishin, D. A. 2018. Protsessy generalizatsii v analogovoy i tsifrovoy kartografii [A generalization processes in analog and digital cartography]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 28(3):204–216.
7. Rosenbloom, P. S. 2013. *On computing: The fourth great scientific domain*. Cambridge, MA: MIT Press. 307 p.
8. Das Sarma, A., H. Lee, H. Gonzalez, J. Madhavan, and A. Halevy. 2012. Efficient spatial sampling of large geographical tables. *ACM SIGMOD Conference (International) on Management of Data Proceedings*. New York, NY: ACM. 193–204.
9. De Andrade, F. G., C. de Souza Baptista, and H. B. Henriques. 2015. Semantic annotation of geodata based on linked-open data. *7th Conference (International) on Management of Computational and Collective Intelligence in Digital EcoSystems Proceedings*. New York, NY: ACM. 9–16.

10. Huang, Xin, B. Choi, J. Xu, W. K. Cheung, Y. Zhang, and J. Liu. 2017. Ontology-based graph visualization for summarized view. *ACM on Conference on Information and Knowledge Management Proceedings*. New York, NY: ACM. 2115–2118.
11. Komkov, A. M., S. A. Nikolaev, and N. I. Shilov. 1958. *Sostavlenie i redaktirovanie kart* [Drafting and editing maps]. Moscow: VIA. 248 p.
12. Komissarov, D. V. 2001. Metodika resheniya problem tsifrovogo fototriangulirovaniya [Method of addressing digital phototriangulation]. *Conference (International) RDAMM Proceedings*. 6(2):213–217.
13. Bellahsene, Z., A. Bonifati, and E. Rahm, eds. 2011. *Schema matching and mapping*. Berlin–Heidelberg: Springer-Verlag. 326 p.
14. Chiang, Yao-Yi, Bo Wu, A. Anand, K. Akade, and C. A. Knoblock. 2014. A system for efficient cleaning and transformation of geospatial data attributes. *22nd ACM SIGSPATIAL Conference (International) on Advances in Geographic Information Systems Proceedings*. New York, NY: ACM. 577–580.
15. Hong-Hai, Do. 2009. Data conflicts. *Encyclopedia of database systems*. Boston, MA: Springer US, 2009. 565–569.
16. Ahlers, D. 2015. Granularity as a qualitative concept for GIR. *9th Workshop on Geographic Information Retrieval Proceedings*. New York, NY: ACM. Article No. 4. P. 1–2.
17. GIS “Panorama” PARB.00046-03. 2019. Formaty i spetsifikatsii dannykh. Format klassifikatora RSC [Data formats and specifications. The format of the classifier RSC]. Available at: <https://gistoolkit.ru/download/doc/formatrsc.pdf> (accessed February 12, 2019).
18. Getmanova, A. D. 1995. *Uchebnik po logike* [A textbook on logic]. 2nd ed. Moscow: VLADOS. 303 p.
19. Kang, Q., W. Liao, A. Agrawal, and A. Choudhary. 2016. A filtering-based clustering algorithm for improving spatio-temporal kriging interpolation accuracy. *25th ACM Conference (International) on Information and Knowledge Management Proceedings*. New York, NY: ACM. 2209–2214.
20. Atluri, G., A. Karpatne, and V. Kumar. 2018. Spatio-temporal data mining: A survey of problems and methods. *ACM Comput. Surv.* 51(4):1–41.

Received February 12, 2019

Contributor

Nikishin Dmitry A. (b. 1976)—Candidate of Science (PhD) in technology, leading scientist, Institute of Informatics Problems, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation; dmnikishin@mail.ru

ИНТЕРНЕТ-КАТАЛОГ БИБЛИОТЕКИ ПО ЕСТЕСТВЕННЫМ НАУКАМ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК КАК СПЕЦИАЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИОННО-ПОИСКОВАЯ СИСТЕМА, ОРИЕНТИРОВАННАЯ НА КВАЛИФИЦИРОВАННОГО ПОЛЬЗОВАТЕЛЯ

С. А. Власова¹, Н. Е. Каленов²

Аннотация: Рассматривается сводный каталог книг и продолжающихся изданий Библиотеки по естественным наукам Российской академии наук (БЕН РАН) как пример реализации принципиально нового подхода к построению библиотечного каталога с функциями развитой информационно-поисковой системы. В этом каталоге отражаются все издания, централизованно поступающие в фонды более 50 библиотек научных организаций РАН, входящих в централизованную библиотечную систему (ЦБС) БЕН РАН. В отличие от большинства интернет-каталогов, в значительной мере ориентированных на логику поиска информации, присущую традиционным каталогам, каталог БЕН РАН позволяет обрабатывать практически неограниченный круг запросов, включающих любые элементы библиографических описаний и тематические рубрики, связанные булевыми операторами «И», «ИЛИ», «И_НЕ». Пользователю предоставляется возможность ограничить область поиска фондами заданной библиотеки, входящей в состав ЦБС БЕН РАН, а также искать только издания, доступные в полнотекстовом электронном варианте. Форма выдачи результатов поиска предоставляет развитую навигацию по ресурсам, включает показ отсканированных «информативных» страниц изданий (титульный лист, аннотация, оглавление).

Ключевые слова: электронные каталоги; интернет; библиографические описания; тематические рубрики; сетевые технологии; поисковые запросы

DOI: 10.14357/08696527190108

Особенности БЕН РАН состоят в том, что она является не изолированной библиотекой, а возглавляет ЦБС, включающую в настоящее время центральную библиотеку и ее 50 отделений, базирующихся непосредственно в научных организациях. До недавнего времени ЦБС БЕН РАН включала еще около 50 библиотек, являющихся подразделениями академических институтов. Основное предназначение БЕН РАН как головной библиотеки ЦБС — централизованное приобретение информационных ресурсов, необходимых сотрудникам обслуживаемых научных организаций, и централизованная обработка всех поступающих материалов. Все технологические процессы, связанные с этими задачами, в БЕН

¹Библиотека по естественным наукам Российской академии наук, svlasova@benran.ru

²Библиотека по естественным наукам Российской академии наук, nek@benran.ru

РАН полностью автоматизированы начиная с 1993 г. и решаются в рамках разработанных сотрудниками Библиотеки программных комплексов [1–5]. Результатом реализации этих процессов стали представленные в интернете сводный каталог журналов (<http://jurs.benran.ru/JurCat/Main>) и сводный каталог книг и продолжающихся изданий (<http://cbook.benran.ru>), функциональные возможности и интерфейс которого рассматриваются ниже.

Каталог содержит информацию о книгах и продолжающихся изданиях (материалы конференций, труды организаций и научных обществ), поступающих в ЦБС БЕН РАН начиная с 1993 г. В каталоге также отражены специальные выпуски научных журналов, посвященные конкретным событиям или персонам. Информация об издании включает стандартное основное библиографическое описание [6], дополненное сведениями обо всех авторах, редакторах, составителях и т. п., ключевыми словами, индексами универсальной десятичной классификации (УДК), переводами заглавий, необходимыми справочными данными, а также (с 2011 г.) сканами обложек, титульных листов и оглавлений.

Начальная страница каталога с демонстрацией раскрывающихся списков представлена на рис. 1.

Текст поискового запроса вводится в строки открывающейся после вызова каталога формы. Строки можно связывать логическими операторами (см. рис. 1). В каждую строку может быть введено через пробел несколько терминов, связанных логическим «И» или «ИЛИ»; по умолчанию термины связываются логическим «И». Термины можно вводить с правым усечением (т. е. осуще-

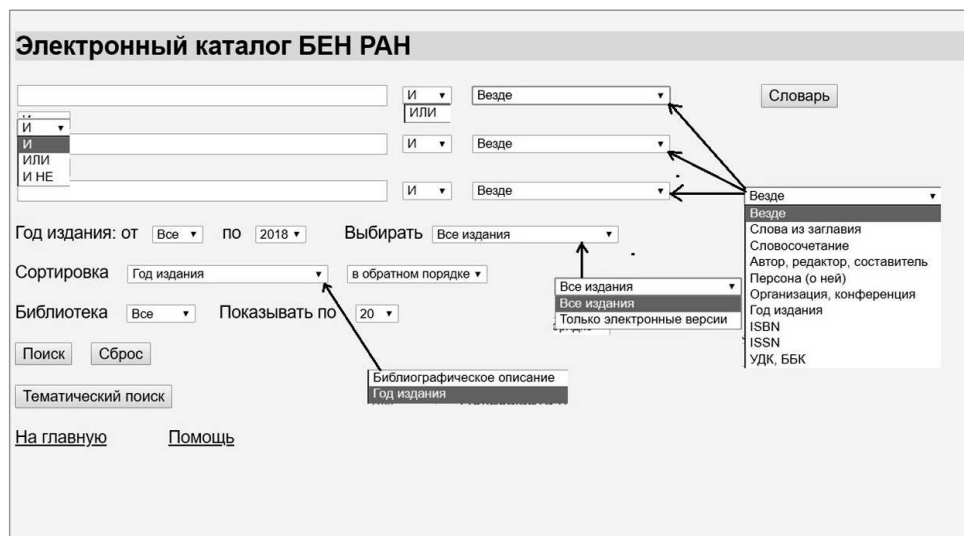


Рис. 1 Поисковая страница интернет-каталога БЕН РАН

ствлять поиск без учета окончаний слов), используя символ «*». Для каждой строки из выпадающего списка в третьем столбце поисковой формы (см. рис. 1) выбирается наименование области (поля), в которой должен быть осуществлен поиск. По умолчанию поиск будет проводиться по всему пространству данных каталога («Везде»). В совокупности с «умолчанием» в строке текста запроса (связка «И») это позволяет пользователю, привыкшему к поисковым машинам интернета, работать с каталогом в привычном режиме, не задумываясь ни о каких областях поиска, но получать при этом значительный «шум».

При формулировке запроса имеется возможность просмотра, выбора и автоматического ввода в строку запроса терминов из словарей (алфавитных списков), соответствующих выбранным полям. Словари подключены для полей «Везде» (алфавитный список всех слов, за исключением неинформативных, включенных в словарь «стоп-слов», с добавлением расшифровки принятых сокращений, включенных в специальный словарь), «Автор» и «Персона (о ней)» (алфавитный список всех форм фамилий, имен и отчеств), «Организация, конференция» (алфавитный список слов из наименований). При работе со словарями после окончания выбора нужных терминов они автоматически заносятся в строку запроса и связка «И» меняется на «ИЛИ»; вернуть «И» можно вручную.

Ограничения искомым изданиям по годам можно задать двумя способами — выбрав непрерывный интервал в специальном разделе «Год издания» «от... до...» (по умолчанию этот интервал содержит все года выпуска изданий, имеющих в каталоге), либо указать конкретные года в строке запроса, выбрав поле «Год издания» (см. рис. 1).

Результаты поиска в каталоге выдаются в виде стандартных библиографических описаний [6]; они могут быть отсортированы по году издания или по библиографическому описанию в прямом или обратном порядке (см. рис. 1). По умолчанию сортировка производится по году издания в обратном порядке (вначале выдаются издания текущего года).

Как уже указывалось, каталог БЕН РАН является сводным — в нем имеется информация о конкретном местонахождении каждого поступившего в ЦБС издания. Соответственно, при работе с каталогом пользователь может выбрать из раскрывающегося списка «Библиотека» (см. рис. 1) ту, которая его интересует.

В последние годы наряду с печатными изданиями БЕН РАН приобретает права доступа к коллекциям сетевых версий книг. Информация об этих изданиях со ссылками на их полные тексты вводится в технологическую базу данных [4] и отражается в сводном каталоге. Кроме того, ряд книг, поступающих в Библиотеку, имеет полнотекстовые версии, находящиеся в свободном доступе в интернете. К ним, в частности, относятся издания, выпущенные при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ), которые в полном объеме по договору с РФФИ получает БЕН РАН. При обработке этих изданий ссылки на их полные тексты вводятся в технологическую базу данных и попадают в каталог [7]. Интерфейс интернет-каталога позволяет пользователю выбирать только книги, имеющие ссылки на полные тексты (см. рис. 1, опция

«только электронные версии»). Выбирая эту опцию, следует иметь в виду, что ряд зарубежных коллекций книг, приобретенных БЕН РАН, доступен только ее постоянным пользователям с компьютеров отделений Библиотеки.

Отличительной особенностью каталога БЕН РАН является возможность тематического поиска изданий с различными уточнениями. Как уже указывалось выше, при обработке изданий в БЕН РАН каждому из них присваивается индекс УДК. Универсальная десятичная классификация является достаточно сложной системой [8], в нюансах которой разбираются только специалисты-систематизаторы. Хотя в каталоге БЕН РАН присутствует специальное поисковое поле («УДК, ББК», см. рис. 1), пользователь, не являющийся библиотечным специалистом, не сможет без консультаций определить, что он должен вводить, если его интересует, например, литература по моделям когнитивных процессов. Для преодоления этого барьера в БЕН РАН разработана специальная иерархическая «надстройка» над системой УДК [9], позволяющая пользователю автоматически формулировать в системе запросы на языке УДК, используя навигацию по привычным ему терминам.

В этой связи обратимся к названию данной статьи. Под введенным в него термином «квалифицированные» понимаются не специалисты в области библиотечных технологий, а пользователи, которые, обращаясь к каталогу, понимают, что они ищут и какой запрос им задать системе, чтобы найти то, что им нужно. Применительно к БЕН РАН такая постановка вопроса вполне логична. Библиотека по естественным наукам РАН является ведомственной библиотекой, ориентированной на информационное сопровождение научных исследований. Она обслуживает в первую очередь достаточно узкий круг сотрудников и аспирантов академических учреждений. Обращаясь к каталогу, они должны ориентироваться в тех областях знаний, которыми интересуются. В этом принципиальное отличие БЕН РАН от публичных библиотек, пользователями которых могут выступать любые граждане, в том числе и далекие от науки.

Рассмотрим возможности каталога БЕН РАН на примере поиска литературы по когнитивным процессам. Самый простой способ найти книги по этой тематике — ввести в первую строку поисковой формы «когнит* процесс*». Каталог (по состоянию на момент написания статьи) выдает на этот запрос 14 документов (фрагмент выдачи представлен на рис. 2). Рассмотрим вариант использования опции «Тематический поиск». После нажатия соответствующей кнопки пользователь переходит на страницу, содержащую перечень основных разделов естественных наук (рис. 3). Наименования разделов служат активными ссылками, при переходе по ним пользователю показывается список подразделов данного научного направления, элементы которого, в свою очередь, являются активными ссылками на разделы следующего уровня и т. д. до самого нижнего уровня, принятого в системе УДК. Если в данном примере пользователь не знает, в каком разделе науки искать «когнитивные процессы», он может ввести в поисковую строку фрагмент «когнит*» и автоматически перейти на рубрики всех уровней, содержащие этот фрагмент. В данном случае — это одна подрубрика (рис. 4).

Электронный каталог БЕН РАН

когнитив* процесс* И Везде

И И Везде

И И Везде

И И Везде

Год издания: от Все по 2018 Выбрать Все издания


Сортировка Год издания в обратном порядке

Библиотека Все Показывать по 20

Для поиска в найденном добавьте уточняющие термины в поисковую форму.

[На главную](#) [Помощь](#)

Найдено записей: 14

 Позитронно-эмиссионная и компьютерная томография в исследованиях когнитивных процессов / Страхова Д.И. [и др.] ; Нац. исслед. центр "Курчат. ин-т". — М., 2014. — 76, [1] с. : ил. — ISBN 978-5-904437-86-2. УДК: 612.82.3; 616-073.756.8 [Полное описание...](#)

Шифр: 813/7835-8
The Genetics of cognitive neuroscience / ed. by Goldberg Terry E. a, Weinberger Daniel R. — Cambridge (Mass.) ; London : MIT press, 2009. — XII, 297 с. — (Issues in clinical and cognitive neuropsychology). — Библиогр. в конце ст. Указ.: с. 263-297. — ISBN 978-0-262-01307-9. УДК: 159.95; 575-112; 612.8:575.11/2; 612.821.3; 616.89 [Полное описание...](#)

Рис. 2 Поисковый запрос по терминам «когнит* процесс*»

Тематический поиск

Выберите рубрику

- [Астрономия](#)
- [Биология](#)
- [Биотехнология](#)
- [География](#)
- [Геодезия, картография](#)
- [Информатика. Кибернетика](#)
- [Математика](#)
- [Медицинские науки](#)
- [Науки о Земле](#)
- [Общественные науки](#)
- [Общие вопросы естественных наук](#)
- [Общие вопросы науки и культуры](#)
- [Палеонтология](#)
- [Природа. Охрана природных ресурсов. Угрозы окружающей среде и защита от них](#)
- [Психология](#)
- [Сельское хозяйство. Аквакультура. Почвоведение. Лесное хозяйство. Охота](#)
- [Технические науки](#)
- [Физика. Механика](#)
- [Философия](#)
- [Химия. Минералогические науки. Химическая технология](#)

Фрагмент названия подрубрики

[На начало поиска](#) [На главную](#)

Рис. 3 Начальная страница тематического поиска в каталоге БЕН РАН

Тематический поиск

Поиск
Уточнение запроса
[На тематический поиск](#)

Выберите рубрику

Искусственный интеллект / Модели когнитивных процессов

Поиск
Уточнение запроса
[На тематический поиск](#)

Рис. 4 Рубрика, содержащая фрагмент «когнит»

Электронный каталог БЕН РАН

или

Год издания: от по

Сортировка

Библиотека Показывать по

Тематический поиск Для поиска в найденном добавьте уточняющие термины в поисковую форму.

[На главную](#) [Помощь](#)

Найдено записей: 267

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 ...

Шифр: 214/2754-7
 Малинецкий Георгий Геннадьевич. Математические основы синергетики. Хаос, структуры, вычислительный эксперимент / Малинецкий Г.Г. — Изд. 8-е. — М.: URSS, [2017]. — 308 с. : ил. — (Синергетика: от прошлого к будущему ; № 2). — Библиогр. в конце гл. — ISBN 978-5-9710-3870-2.
 УДК: 004.81.032.26; 007.3; 515.1; 517.53; 517.938; 517.957; 519.248; 530.192 Выпуск серии (свойский уровень)
 Подробнее...

Шифр: 214/3492-6
 Модулярная арифметика и ее приложения в инфокоммуникационных технологиях / Червяков Н.И. [и др.]. — М.: Физматлит, 2017. — 400 с., [1] л. портр. — Библиогр. в конце ч. [Изд. при поддержке РФФИ]. — ISBN 978-5-9221-1716-6.
 УДК: 004.272; 004.7.056.5; 004.81.032.26; 004-511.1; 621.391.037.372
 Подробнее...

[Электронная версия](#)

Рис. 5 Результат выполнения запроса по теме «модели когнитивных процессов»

Если нажать кнопку «Поиск», система сообщит, что найдено 267 документов (рис. 5). Все эти документы, по мнению специалистов-систематизаторов (а в БЕН РАН это специалисты, имеющие высшее естественно-научное образование по соответствующему научному направлению), в той или иной мере относятся к «когнитивным процессам». Возможно, для конкретного пользователя ряд изданий интереса не представляет, но вероятность потери важных работ при поиске по «терминологическому» запросу (сравним 14 и 267) оказывается очень высокой.

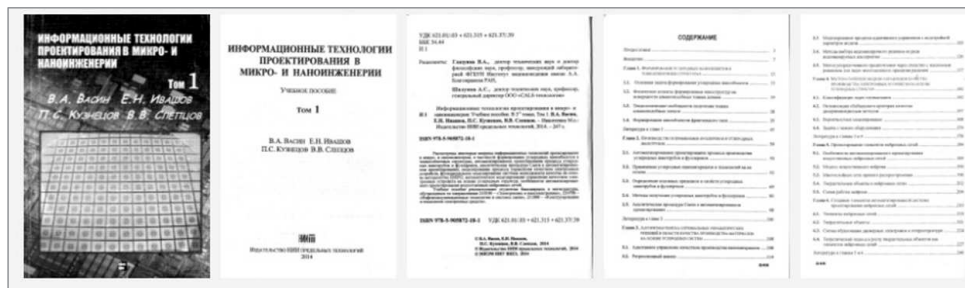


Рис. 6 Пример выдачи отсканированных страниц издания в каталоге БЕН РАН

Форма выдачи информации в каталоге БЕН РАН ориентирована на пользователя, который может скопировать простейшим образом библиографическое описание издания и вставить в список цитированной литературы при подготовке научных публикаций. Изображение обложки (см. рис. 5), сопровождающее описание каждой книги, поступившей в ЦБС БЕН РАН начиная с 2012 г., является активной ссылкой, открывающей окно со сканированными страницами книги (титльный лист, аннотация, оглавление — рис. 6), которые можно просматривать с увеличением.

Каждая выдаваемая запись содержит ссылку «подробнее», перейдя по которой пользователь видит, какая дополнительная информация включена в библиографическое описание и в каких библиотеках ЦБС имеется данная книга. В первом издании, представленном на рис. 5, имеется текст «Выпуск серии (сводный уровень)». Информация в скобках является активной ссылкой, переход по которой открывает окно со списком всех изданий, относящихся к данной серии. В рассматриваемом примере это серия «Синергетика: от прошлого к будущему», в фондах ЦБС БЕН РАН имеется 115 ее выпусков. У второй записи (см. рис. 5) имеется ссылка «Электронная версия». Переход по ней приводит на страницу сайта РФФИ, на которой размещена данная книга (http://www.rfbr.ru/rffi/ru/books/o_1968728).

Вернемся к иллюстрации дополнительных возможностей каталога БЕН РАН. Если, выбрав нужную рубрику, перейти не на «Поиск», а на «Уточнение запроса» (см. рис. 4), то, попадая на страницу поиска с заполненной первой строкой (тематическая рубрика автоматически заменяется на некоторую комбинацию индексов УДК, см. рис. 5) без выдачи списка документов, пользователь может ввести любые уточнения запроса. Например, выбрав из списка библиотек ИПИАН, получит список из 23 книг, имеющихся в отделении БЕН РАН в ИПИ РАН. Ограничив выдачу годами с 2012 по текущую дату, получит список из 67 различных изданий, относящихся к когнитивным процессам, имеющихся в ЦБС БЕН РАН, из них всего одна имеет электронную версию, доступную пользователям БЕН РАН.

Интернет-каталог БЕН РАН постоянно развивается в соответствии с появляющимися техническими возможностями Библиотеки. За 20-летний период его развитие можно проследить по ряду публикаций [10–12]. Одно из планируемых направлений дальнейшего развития — переход от сканов аннотаций и оглавлений изданий к их текстовому представлению в каталоге и обеспечение в них развитого поиска.

Литература

1. *Васильев А. В., Каленов Н. Е.* Автоматизация комплектования и обработки непериодических изданий в системе БЕН РАН // Эффективность использования интерактивных библиотечных систем: Сб. научных тр. — Новосибирск: ГПНТБ СО РАН, 1994. С. 57–62.
2. *Васильев А. В.* Автоматизированный комплекс SOLAR // Применение ЭВМ в информационно-библиотечной технологии: Сб. научных тр. — М.: БЕН РАН, 1995. С. 35–38.
3. *Васильев А. В.* Функциональные особенности АИБС «Библиобус» // Новые технологии в информационно-библиотечном обеспечении научных исследований: Сб. научных тр. — Екатеринбург: ЦНБ УрО РАН, 2010. С. 102–106.
4. *Бочарова Е. Н., Васильев А. В., Кочукова Е. В.* Автоматизация процессов комплектования и обработки литературы на основе информационно-библиотечной системы «Библиобус» // Научные и технические библиотеки, 2012. Т. 3. С. 30–33.
5. *Васильев А. В.* Развитие сервисов АИБС «Библиобус» // Информационное обеспечение науки: новые технологии: Сб. научных тр. — М.: БЕН РАН, 2015. С. 238–243.
6. ГОСТ 7.1-2003 Библиографическая запись. Библиографическое описание. http://diss.rsl.ru/datadocs/doc_291wu.pdf.
7. *Каленов Н. Е., Власова С. А., Кочукова Е. В.* Интерактивная система распространения изданий, опубликованных при поддержке РФФИ // Информационные ресурсы России, 2013. № 4. С. 25–27.
8. Универсальная десятичная классификация. <https://classinform.ru/udk.html>.
9. *Ивановский А. А.* Пользовательская надстройка над УДК в электронном систематическом каталоге БЕН РАН // Книга в информационном обществе: Мат-лы XIII Междунар. научн. конф. по проблемам книговедения. — М.: Наука, 2014. Ч. 1. С. 318–319.
10. *Власова С. А., Каленов Н. Е.* Каталог книг и продолжающихся изданий ЦБС БЕН РАН в ИНТЕРНЕТ // Современные технологии в информационно-библиотечном обеспечении научных исследований: Сб. научных тр. — М.: БЕН РАН, 1999. С. 100–102.
11. *Власова С. А., Каленов Н. Е., Каллистратова О. Д., Соловьева Т. Н.* Интернет-каталоги БЕН РАН // Информационные ресурсы России, 2003. № 2(72). С. 30–34.
12. *Власова С. А., Каленов Н. Е.* Развитие сводного электронного каталога книг и продолжающихся изданий БЕН РАН // Информационное обеспечение науки: новые технологии: Сб. научных тр. — М.: Научный мир, 2011. С. 281–292.

Поступила в редакцию 22.05.18

ELECTRONIC CATALOG OF THE LIBRARY FOR NATURAL SCIENCES OF THE RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES AS A SPECIALIZED INFORMATION RETRIEVAL SYSTEM FOCUSED ON A QUALIFIED USER

S. A. Vlasova and N. E. Kalenov

Library for Natural Sciences of the Russian Academy of Sciences, 11/11 Znamenka Str., Moscow 119991, Russian Federation

Abstract: The summary catalog of books and continuing editions of the Library for Natural Sciences of the Russian Academy of Sciences (LNS RAS) as an example of a fundamentally new approach to creating a library catalog like an information retrieval system is considered. This catalog reflects all the editions that are acquired for collections of more than 50 libraries included in the LNS RAS centralized library system (CLS). In contrast to the majority of Internet catalogs, the LNS RAS catalog allows one to handle almost an unlimited amount of requests that include any elements of bibliographic descriptions and subject classification headings connected by Boolean operators “AND,” “OR,” and “AND NOT.” A user is able to limit the search by the collection of any library, included in CBS of LNS RAS and also to search the books that are available in the full-text electronic version. The search results are presented in the form of advanced bibliographical descriptions and include publications’ scanned pages such as title, abstract, and table of contents.

Keywords: electronic catalogs; Internet; bibliographic descriptions; subject headings; network technologies; search requests; information retrieval

DOI: 10.14357/08696527190108

References

1. Vasiliev, A. V., and N. E. Kalenov. 1994. Avtomatizatsiya komplektovaniya i obrabotki neperiodicheskikh izdaniy v sisteme BEN RAN [Automation of acquiring and processing of nonperiodical publications in the LNS RAS system]. *Effektivnost' ispol'zovaniya interaktivnykh biblioteknykh sistem: Sb. nauchnykh tr.* [Efficiency of using interactive library systems: Collection of scientific papers]. — Novosibirsk: SPSTL SB RAS. 57–62.
2. Vasiliev, A. V. 1995. Avtomatizirovanny kompleks SOLAR [Automated complex SOLAR]. *Primenenie EVM v informatsionno-biblioteknoy tekhnologii: Sb. nauchnykh tr.* [Application of computers in information and library technology: Collection of scientific papers]. Moscow: BEN RAN. 35–38.
3. Vasiliev, A. V. 2010. Funktsional'nye osobennosti AIBS “Bibliobus” [Functional features of AIBS “Bibliobus”]. *Novye tekhnologii v informatsionno-biblioteknom obespechenii nauchnykh issledovaniy: Sb. nauchnykh tr.* [New technologies in information and library support of scientific research: Collection of scientific papers]. Ekaterinburg: CNB UrO RAN. 102–106.

4. Bocharova, E. N., A. V. Vasiliev, and E. V. Kochukova. 2012. Avtomatizatsiya protsessov komplektovaniya i obrabotki literatury na osnove informatsionno-bibliotечноy sistemy “Bibliobus” [The Bibliobus Library Information System as complex approach to acquisition and literature processing automation]. *Nauchnye i tekhnicheskie biblioteki* [Scientific and Technical Libraries] 3:30–33.
5. Vasiliev, A. V. 2015. Razvitie servisov ABIS “Bibliobus” [Development of ALIS “Bibliobus” services]. *Informatsionnoe obespechenie nauki: novye tekhnologii: Sb. nauchnykh tr.* [Information support of science: New technologies: Collection of scientific papers]. Moscow: BEN RAN. 238–243.
6. GOST 7.1-2003 Bibliograficheskaya zapis’. Bibliograficheskoe opisaniye [STANDARD 7.1-2003 Bibliographic record. Bibliographic description]. Available at: http://diss.rsl.ru/datadocs/doc_291wu.pdf (accessed April 9, 2018).
7. Kalenov, N. E., S. A. Vlasova, and E. V. Kochukova. 2013. Interaktivnaya sistema rasprostraneniya izdaniy, opublikovannykh pri podderzhke RFFI [Interactive system of distribution of the editions published with support of the Russian Foundation for Basic Research]. *Information Resources of Russia* 4:25–27.
8. Universal’naya desyatchnaya klassifikatsiya [Universal decimal classification]. Available at: <https://classinform.ru/udk.html> (accessed April 12, 2018).
9. Ivanovskiy, A. A. 2014. Pol’zovatel’skaya nadstroyka nad UDK v elektronnom sistematicheskom kataloge BEN RAN [Custom superstructure over UDC in the LNS RAS electronic systematic catalog]. *The book in the Information Society: 13th Scientific Conference (International) on Book Studies Proceedings*. Moscow: Nauka. 1:318–319.
10. Vlasova, S. A., and N. E. Kalenov. 1999. Katalog knig i prodolzhayushchikhsya izdaniy TsBS BEN RAN v INTERNET [Catalog of books and ongoing publications of the LNS RAS Centralized Library System on the INTERNET]. *Sovremennye tekhnologii v informatsionno-bibliotечnom obespechenii nauchnykh issledovaniy: Sb. nauchnykh tr.* [Modern technologies in information and library support of scientific research: Collection of scientific papers]. Moscow: BEN RAN. 100–102.
11. Vlasova, S. A., N. E. Kalenov, O. D. Kallistratova, and T. N. Solov’eva. 2003. Internet-katalogi BEN RAN [Internet catalogs of the LNS RAS]. *Information Resources of Russia* 2(72):30–34.
12. Vlasova, S. A., and N. E. Kalenov. 2011. Razvitie svodnogo elektronnoy kataloga knig i prodolzhayushchikhsya izdaniy BEN RAN [Development of the LNS RAS summary electronic catalog of books and ongoing publications]. *Informatsionnoe obespechenie nauki: novye tekhnologii: Sb. nauchnykh tr.* [Information support of science: New technologies: Collection of scientific papers]. Moscow: Nauchny mir. 281–292.

Received May 22, 2018

Contributors

Vlasova Svetlana A. (b. 1960) — Candidate of Science (PhD) in technology, leading scientist, Library for Natural Sciences of the Russian Academy of Sciences, 11/11 Znamenka Str., Moscow 119991, Russian Federation; svlasova@benran.ru

Kalenov Nikolay E. (b. 1945) — Doctor of Science in technology, professor, principal scientist, Library for Natural Sciences of the Russian Academy of Sciences, 11/11 Znamenka Str., Moscow 119991, Russian Federation; nek@benran.ru

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЗАДАЧИ ЗАЩИТЫ РАСТЕНИЙ В БИОСИСТЕМЕ ТИПА «ВРЕДНЫЕ НАСЕКОМЫЕ – ПОЛЕЗНЫЕ НАСЕКОМЫЕ» С ПРОИЗВОЛЬНЫМИ ТРОФИЧЕСКИМИ ФУНКЦИЯМИ

*Р. Н. Одинаев*¹

Аннотация: При изучении агроценоза хлопчатника возникает задача формального описания его структур, т. е. совокупности блоков, в которых сосредоточены запасы элементов и энергии, и связывающих их потоков внутри агроценоза, осуществляющих перенос вещества и энергии из блока в блок, а также исследования вопросов устойчивости агроценоза. Основу хлопкового агроценоза составляет сама культура хлопчатник как первичный продукт. За счет хлопчатника живут разнообразные организмы — фитофаги, вредители хлопчатника. К вредителям хлопчатника относятся: тли (черная люцерновая, бахчевая, большая хлопковая), совки (хлопковая, малая наземная, азимовая) и паутинный клещ. Вредители находят в хлопчатнике обильный источник питания и размножаются интенсивно. Рассматриваются математические задачи для точечных моделей, т. е. когда численность популяции зависит от времени и сформулирована так называемая подготовительная задача защиты растений. Найдены необходимые и достаточные условия разрешимости подготовительных задач защиты растений с произвольными трофическими функциями.

Ключевые слова: модель; агроценоз; задача защиты растений; численность насекомых; произвольная трофическая функция; полезные насекомые – вредные насекомые; модельная биосистема

DOI: 10.14357/08696527190109

1 Введение

Современный мировой и европейский опыт земледелия и защиты растений базируется на интенсивном применении информационных технологий. Активное проникновение информационных технологий и научных методов в практику современного промышленного и сельскохозяйственного производства стало характерной особенностью нашего времени [1–3]. Это особенно сильно проявляется при рассмотрении вопросов, решение которых связано с созданием строгих количественно обоснованных методов в проблеме защиты урожая и вопросов охраны окружающей среды. Решение этих животрепещущих вопросов невозможно без привлечения самых современных методов математической науки в этой области.

¹Таджикский национальный университет, Душанбе, raim_odinaev@mail.ru

Защита планируемого сельскохозяйственного урожая во всем мире является одной из важнейших государственных задач. Разработка методов защиты урожая от сельхозвредителей, естественно, требует прогноза динамики биологических популяций, сообществ и экосистем при тех или иных антропогенных воздействиях. При этом эксперименты на реальных системах весьма дороги, продолжительны и часто недопустимы, поэтому возникает необходимость разработки различного рода математических моделей. При помощи математических моделей стало возможным экспериментальное изучение последствий тех или иных планируемых мероприятий, затрагивающих функционирование природных систем, прямые эксперименты с которыми недопустимы.

Задача управления агроценозами, или задача защиты растений, формулируется следующим образом: задается некоторый планируемый уровень биомассы урожая растений (на корню), а для остальных видов биосистемы задаются вредители растений, хищники и паразиты вредителей, определяются пороги вредоносности вредителей и уровни эффективности полезных насекомых, так чтобы величина собираемого урожая была не менее величины планируемого урожая.

Одной из основных проблем сельского хозяйства является эффективная борьба с вредителями сельскохозяйственной культуры, которая включает две задачи.

Первая — на основе имеющейся информации об агроценозе определяются пороги вредоносности вредителей и уровни эффективности энтомофагов — полезных насекомых. Причем эти параметры определяются на местах энтомологами по проведенному учету определенного поля (обычно на растениях). Полученные результаты затем распространяются на остальные площади.

Вторая задача — использование ядохимикатов для подавления численности вредителей. Ясно, что такой способ определения параметров интегрированного метода борьбы (комбинация агротехнического, биологического и химического способов борьбы) из-за нехватки и неточности информации не будет отражать реальную картину в изучаемом агроценозе. Поэтому возникает задача формализовать процесс определения порогов вредоносности вредителей и уровней эффективности энтомофагов (на практике эту задачу обычно называют подготовительной задачей). Вопросам математического моделирования динамики численности биологических популяций посвящен ряд работ отечественных и зарубежных ученых. Здесь следует отметить замечательные работы Вито Вольтерры, А. Д. Лотки, Р. Мэй, Ю. Свирежева, М. К. Юнуса и ряда других ученых (см., например, [4–7] и приведенную там литературу).

Известно, что хлопковое поле заселено многочисленными организмами. Часть из них составляют вредители хлопчатника, т. е. те насекомые, которые непосредственно питаются соками и зеленой массой хлопчатника. Другую часть составляют хищники, а именно: насекомые энтомофаги и, возможно, птицы, которые питаются вредителями. Кроме того, существуют паразиты вредителей хлопкового поля, развивающиеся в организме своих хозяев-вредителей.

2 Задачи защиты растений для точечных моделей

В этом разделе рассмотрим некоторую модельную биосистему, имеющую три трофических уровня типа «растение» – «вредные насекомые» – «полезные насекомые», в которую поступает внешний ресурс N_0 (удобрение или вода, используемая для полива, или солнечная энергия) со скоростью Q . Биомассы (или численности) соответствующих уровней в момент времени t обозначим через

$N_0 = N_0(t)$ — массу внешнего ресурса;

$N_1 = N_1(t)$ — биомассу растений сельхозкультуры;

$N_i = N_i(t)$ — численность вредных ($i = 2$) и полезных ($i = 3$) насекомых.

Предположим, что состояние модели агроценоза описывается при помощи следующей системы уравнений [8–14]:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dN_0}{dt} &= Q + F_0(N_0, N_1); \\ \frac{dN_1}{dt} &= N_1 F_1(N_0, N_1, N_2); \\ \frac{dN_2}{dt} &= N_2 F_2(N_1, N_2, N_3); \\ \frac{dN_3}{dt} &= N_3 F_3(N_2, N_3), \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где $F_i = F_i(\cdot)$ ($i = \overline{0, 3}$) — соответствующие удельные скорости роста биологических видов агроценоза, причем

$$\begin{aligned} \frac{\partial F_i}{\partial N_j} &\leq 0, \quad i < j \quad (i, j = \overline{0, 3}); \\ \frac{\partial F_i}{\partial N_j} &< 0, \quad i > j \quad (i, j = \overline{0, 3}). \end{aligned}$$

Определение. Средними биомассами видов (или средними численностями) за время τ называются величины

$$N_i^\tau = \frac{1}{\tau} \int_0^\tau N_i(t) dt, \quad i = 1, 2, 3; \quad 0 < \tau < \infty.$$

Сформулируем задачу защиты в терминах модельного агроценоза (1). Пусть N_1^p означает планируемый уровень биомассы сельхозкультуры, не ниже которого должен быть сохраненный урожай, т. е.

$$N_1^\tau \geq N_1^p, \quad N_1^p \in [N_1^{\min}, N_1^{\max}], \quad (2)$$

где $[N_1^{\min}, N_1^{\max}] — const > 0$. Рассмотрим неравенства

$$N_2^T \leq N_2^P; \quad N_3^T \geq N_3^P, \quad (3)$$

где $N_2^P \geq 0$ и $N_3^P \geq 0$ — неизвестные числа, соответствующие порогу вредности вредителей и уровню эффективности полезных насекомых (энтомофагов).

Подготовительная задача защиты растений состоит в нахождении значений N_2^P и N_3^P из (3), гарантирующих (2) при вариации скорости поступления внешнего ресурса Q . Рассмотрим модельный агроценоз (1), в котором функции $F_i(\cdot)$ ($i = \overline{0, 3}$) определяются по следующим формулам:

$$\left. \begin{aligned} F_0 &= -\alpha_0 N_0 N_1; \\ F_1 &= k_0 \alpha_0 N_0 - \frac{V_1(N_1)}{N_1} N_2 - m_1; \\ F_2 &= k_1 V_1(N_1) - \frac{V_2(N_2)}{N_2} N_3 - m_2; \\ F_3 &= k_2 V_2(N_2) - \varepsilon N_3 - m_3, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где $V_i(\cdot)$ ($i = 1, 2$) — трофическая функция со свойствами

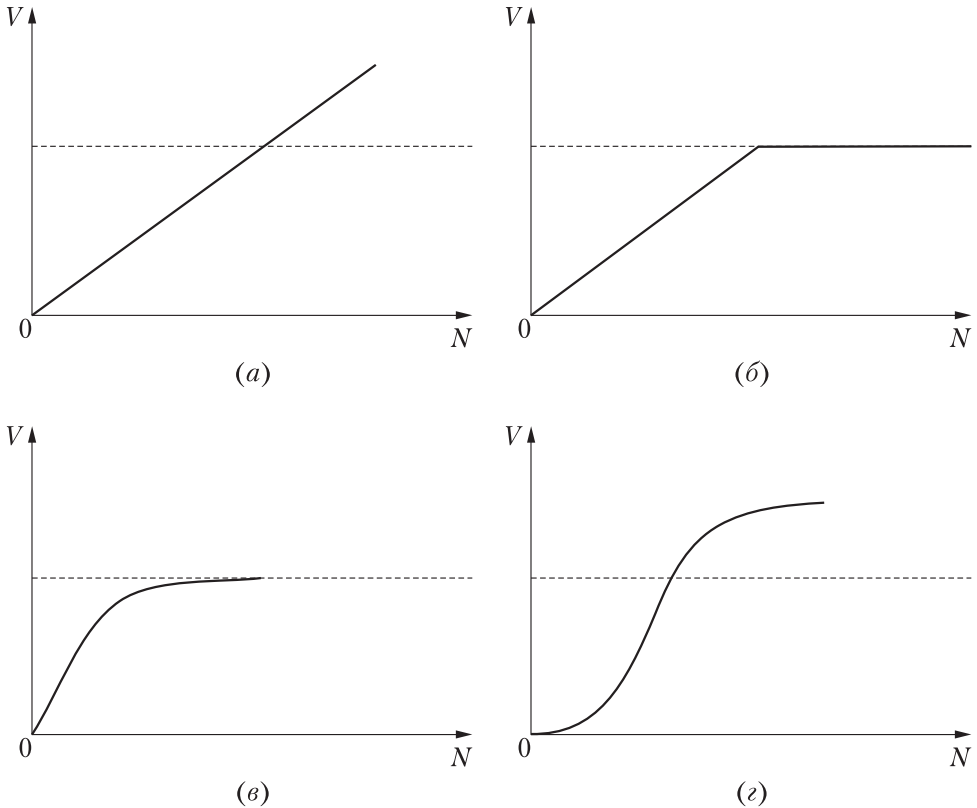
$$\frac{dV_i(N)}{dN} > 0; \quad \frac{dV_i^2(N)}{dN^2} \leq 0, \quad i = 1, 2.$$

Предположим, что единственным лимитирующим фактором, ограничивающим размножение жертв, является давление на них со стороны хищников, а размножение хищников ограничивается количеством добытой ими пищи (численностью жертв). Тогда в отсутствие хищников численность жертв должна расти экспоненциально с относительной скоростью α , а хищники в отсутствие жертв должны так же экспоненциально вымирать с относительной скоростью m . В удельной скорости роста обозначены: m_i ($i = 1, 2, 3$) — усредненные коэффициенты естественной смертности; k_i ($i = 0, 1, 2$) — доли потребленных биомасс, идущие на репродуктивный обмен и рост; α_i ($i = 0, 1, 2$) — коэффициенты трофических функций; ε — коэффициент самолимитирования популяции полезных насекомых.

Пусть $V = V_i(N_i)$, $i = 1, 2$, — численность (или биомасса) жертв, потребляемых одним хищником за единицу времени, причем k -я часть полученной с этой биомассой энергии расходуется хищником на воспроизводство, а остальное тратится на поддержание основного обмена и охотничьей активности. Легко видеть, что систему (1) в силу (4) можно записать в виде системы с отношением типа хищник–жертва:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dN_0}{dt} &= Q - \alpha_0 N_0 N_1; \\ \frac{dN_1}{dt} &= k_0 \alpha_0 N_0 N_1 - V_1(N_1) N_2 - m_1 N_1; \\ \frac{dN_2}{dt} &= k_1 V_1(N_1) N_2 - V_2(N_2) N_3 - m_2 N_2; \\ \frac{dN_3}{dt} &= k_2 V_2(N_2) N_3 - N_3^2 - m_3 N_3. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

В формулах (5) трофические функции $V_i(N_i)$ являются достаточно произвольными. Анализ экспериментальных исследований показывает [11, 13], что трофические функции для многих биологических популяций могут быть представлены в виде графиков, приведенных на рисунке.



Всевозможные виды трофических функций

Справедлива следующая теорема о существовании решения задачи защиты растений.

Теорема 1. Пусть взаимодействие между видами агроценоза происходит согласно формулам (4) и пусть

$$V_i(\cdot) \geq 0; \quad \frac{dV_i}{dN} > 0; \quad \frac{d^2V_i}{dN^2} \leq 0;$$

$$0 < \min_{0 \leq t \leq \tau} \frac{V_1(N_1(t))}{N_1(t)} = \bar{\alpha}_1 < \infty; \quad 0 < \max_{0 \leq t \leq \tau} \frac{V_2(N_2(t))}{N_2(t)} = \bar{\alpha}_2 < \infty;$$

$$\bar{\alpha}_1, \bar{\alpha}_2 = const.$$

Тогда для того, чтобы имело место условие

$$N_1^T \geq N_1^P, \quad N_1^P \in [N_1^{\min}, N_1^{\max}],$$

необходимо и достаточно, чтобы выполнялись следующие неравенства:

$$\left. \begin{aligned} N_0(t) &\leq \frac{Q}{\alpha_0 N_1^P}; \\ N_2^T &\leq N_2^P, \quad N_2^P = \frac{k_0 Q}{\bar{\alpha}_1 N_1^P} - \frac{m_1}{\bar{\alpha}_1} - \frac{1}{\bar{\alpha}_1 \tau} \ln \frac{N_1(\tau)}{N_1(0)}; \\ N_3^T &\geq N_3^P, \quad N_3^P = \frac{k_1 \bar{\alpha}_1}{\bar{\alpha}_2} N_1^P - \frac{m_2}{\bar{\alpha}_2} - \frac{1}{\bar{\alpha}_2 \tau} \ln \frac{N_2(\tau)}{N_2(0)}. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Доказательство. Необходимость. Предположим, что имеет место условие $N_1^T \geq N_1^P$, $N_1^P \in [N_1^{\min}, N_1^{\max}]$. Покажем справедливость (6). В силу первого уравнения системы (5) имеем:

$$\frac{dN_0}{dt} = Q - \alpha_0 N_0 N_1;$$

$$N_0(t) \leq N_0 \exp \left(-\alpha_0 \int_0^t N_1(\tau) d\tau \right) + Q \int_0^t \exp \left(-\alpha_0 \int_\tau^t N_1(\xi) d\xi \right) d\tau \leq$$

$$\leq \left[N_0 - \frac{Q}{\alpha_0 N_1^P} \right] \exp(-\alpha_0 N_1^P t) + \frac{Q}{\alpha_0 N_1^P}.$$

Следовательно, $N_0(t) \leq Q/(\alpha_0 N_1^P)$, $0 \leq t \leq t_k$, ($N_0 = Q/(\alpha_0 N_1^P)$). Из второго уравнения (5) получим:

$$\frac{dN_1}{dt} = k_0 \alpha_0 N_0 N_1 - V_1(N_1) N_2 - m_1 N_1,$$

откуда

$$\frac{d}{dt} \ln N_1 = k_0 \alpha_0 N_0 - \frac{V_1(N_1)}{N_1} N_2 - m_1,$$

так как

$$\frac{V_1(N_1)}{N_1} N_2 = k_0 \alpha_0 N_0 - m_1 - \frac{d}{dt} \ln N_1$$

и

$$\frac{V_1(N_1)}{N_1} N_2 = \frac{k_0 Q}{N_1^p} - m_1 - \frac{d}{dt} \ln N_1.$$

Интегрируя последнее равенство по t от 0 до τ , получим:

$$\frac{1}{\tau} \int_0^\tau \frac{V_1(N_1(t))}{N_1(t)} N_2(t) dt = \frac{k_0 Q}{N_1^p} - m_1 - \frac{1}{\tau} \ln \frac{N_1(\tau)}{N_1(0)},$$

т. е.

$$0 < \min_{0 \leq t \leq \tau} \frac{V_1(N_1(t))}{N_1(t)} N_2^\tau = \frac{k_0 Q}{N_1^p} - m_1 - \frac{1}{\tau} \ln \frac{N_1(\tau)}{N_1(0)},$$

так как $0 < \min_{0 \leq t \leq \tau} V_1(N_1(t))/N_1(t) = \bar{\alpha}_1 < \infty$, то

$$N_2^\tau \leq \frac{k_0 Q}{N_1^p} - \frac{m_1}{\bar{\alpha}_1} - \frac{1}{\bar{\alpha}_1 \tau} \ln \frac{N_1(\tau)}{N_1(0)} = N_2^p,$$

откуда

$$N_2^\tau \leq N_2^p.$$

Теперь рассмотрим третье уравнение системы (5):

$$\frac{dN_2}{dt} = k_1 V_1(N_1) N_2 - V_2(N_2) N_3 - m_2 N_2,$$

т. е.

$$\frac{d}{dt} \ln(N_2) = k_1 V_1(N_1) - m_2 - \frac{V_2(N_2) N_3}{N_2}.$$

Проинтегрировав это уравнение по t от 0 до τ , получаем:

$$\frac{1}{\tau} \int_0^\tau \frac{V_2(N_2(t))}{N_2(t)} N_3(t) dt \geq k_1 \bar{\alpha}_1 N_1^p - m_2 - \frac{1}{\tau} \ln \frac{N_2(\tau)}{N_2(0)}.$$

Отсюда

$$0 < \max_{0 \leq t \leq \tau} \frac{V_2(N_2(t))}{N_2(t)} N_3^\tau \geq k_1 \bar{\alpha}_1 N_1^p - m_2 - \frac{1}{\tau} \ln \frac{N_2(\tau)}{N_2(0)}.$$

Так как $0 < \max_{0 \leq t \leq \tau} (V_2(N_2(t))/N_2(t)) = \bar{\alpha}_2 < \infty$, то

$$N_3^T \geq \frac{k_1 \bar{\alpha}_1}{\alpha_2} N_1^p - \frac{m_2}{\alpha_2} - \frac{1}{\bar{\alpha}_2 \tau} \ln \frac{N_2(\tau)}{N_2(0)} = N_3^p,$$

откуда

$$N_3^T \geq N_3^p.$$

Оценим $\max N_3$. Из четвертого уравнения системы (5) получаем:

$$\frac{dN_3}{dt} = k_2 V_2(N_2) N_3 - N_3^2 - m_3 N_3.$$

Введя обозначение $A(t) = k_2 V_2(N_2) - m_3$, запишем

$$\max_t N_3 \leq \max_t \left[\frac{N_3(0) \exp \left(\int_0^t A(t) dt \right)}{1 + \varepsilon N_3(0) \int_0^t \left(\exp \left(\int_0^t A(t) dt \right) \right) dt} \right] \leq N_{\max},$$

где $N_{\max} = \text{const} < \infty$. Действительно,

$$\begin{aligned} \frac{dN_3}{dt} &= A(t)N_3(t) - \varepsilon N_3^2(t); \\ -\frac{1}{N_3^2} \frac{dN_3}{dt} &= -\frac{A(t)}{N_3} + \varepsilon, \quad -\frac{1}{N_3^2} = y; \\ y'(t) &= -A(t)y + \varepsilon; \end{aligned}$$

$$y(t) = y(0) \exp \left(-\int_0^t A(t) dt \right) + \varepsilon \int_0^t \left(\exp \left(-\int_{\tau}^t A(\xi) d\xi \right) \right) d\tau;$$

$$\frac{1}{N_3(t)} = \frac{1}{N_3(0)} \exp \left(-\int_0^t A(t) dt \right) + \varepsilon \int_0^t \left(\exp \left(-\int_{\tau}^t A(\xi) d\xi \right) \right) d\tau.$$

Достаточность. Пусть выполнены условия теоремы. Покажем, что имеет место неравенство $N_1^T \geq N_1^p$, $N_1^p \in [N_1^{\min}, N_1^{\max}]$. Так как

$$\frac{dN_0}{dt} = Q - \alpha_0 N_0 N_1 \geq Q - \alpha_0 N_1 \frac{Q}{\alpha_0 N_1^p},$$

то

$$\frac{Q}{N_1^p} N_1 \geq Q - \frac{dN_0}{dt}.$$

Интегрируя последнее неравенство по t от 0 до τ , получим:

$$\frac{QN_1^\tau}{N_1^p} \geq Q + \frac{1}{\tau} [N_0(0) - N_0(\tau)] \geq Q + \frac{1}{\tau} \left[N_0(0) - \frac{Q}{\alpha_0 N_1^p} \right] = Q,$$

откуда

$$\frac{QN_1^\tau}{N_1^p} \geq Q,$$

или, что то же самое,

$$N_1^\tau \geq N_1^p.$$

Замечание 1. Если $Q = Q(t) \in [0, \tau]$, то в качестве Q в решении задачи, т. е. в выражениях для N_1^p , N_2^p и N_3^p , следует брать $\bar{Q} = \max_t Q$. Действительно,

$$\begin{aligned} N_0(t) &\leq N_0(0) \exp \left(-\alpha_0 \int_0^t N_1(\xi) d\xi \right) + \int_0^t Q(\xi) \exp \left(-\alpha_0 \int_\xi^t N_1(\eta) d\eta \right) d\xi \leq \\ &\leq \left[N_0(0) - \frac{\bar{Q}}{\alpha_0 N_1^p} \right] \exp(-\alpha_0 N_1^p t) + \frac{\bar{Q}}{\alpha_0 N_1^p} = \frac{\bar{Q}}{\alpha_0 N_1^p}, \quad 0 \leq t \leq \tau, \end{aligned}$$

и решение задачи будет зависеть только от \bar{Q} .

Замечание 2. Пусть $\tau \rightarrow \infty$. Тогда

$$\begin{aligned} N_1^\tau &\geq N_1^p, \quad N_1^p \in \left[\frac{m_2}{k_1 \alpha_1}, \frac{k_0 Q}{m_1} \right]; \\ N_2^\tau &\leq \frac{k_0 Q}{\alpha_1 N_1^p} - \frac{m_1}{\alpha_1}; \quad N_3^\tau \geq \frac{k_1 \alpha_1}{\bar{\alpha}} N_1^p - \frac{m_2}{\bar{\alpha}}, \end{aligned}$$

т. е. решение непрерывной задачи защиты стремится к решению стационарной задачи.

Может оказаться, что при некоторых значениях параметров и функций рассмотренного модельного агроценоза подготовительная задача защиты растений не будет иметь решений, т. е. неравенства (2) и (3) не будут выполняться. Тогда придется решать задачу оптимального управления агроценозами. Это означает, что против вредителей должен применяться интегрированный метод борьбы (комплекс агротехнических, химических и биологических мероприятий) для защиты сельхозкультуры.

Математически это означает введение членов $\mu(D)N_2$, $\alpha_\mu(D)N_3 + PN_3$ соответственно в правые части 3-го и 4-го уравнений системы (1). Здесь функция

$\mu = \mu(D)$ — функция «доза–эффект» от применения дозы $D = D(t)$; $P = P(t)$ — биологическое управление, т. е. удельная скорость запуска полезных насекомых на поле. Агротехнические мероприятия учтены введением члена $Q = Q(t)$ в правой части 1-го уравнения системы (1). Предполагается, что параметры управления $(Q, P, D) = u \in U$, где U — допустимое множество (кусочно-непрерывные и ограниченные управления). Пусть вышесказанные изменения в модельный агроценоз произведены. Тогда задача оптимального управления (оптимизация процесса защиты) модельным агроценозом (1) и (2) состоит в нахождении такого управления, для которого функционал стоимости

$$I(u) = \int_0^{t_k} f^0(N_1, N_2, N_3, u) dt + \varphi(N_1, N_2, N_3, u) \Big|_{t_k} \quad (7)$$

на решениях задачи (1)–(3) принимал бы свое наименьшее значение. В функционале (7) $f^0(\cdot)$ и $\varphi(\cdot)$ характеризуют суммарный вред (или ущерб) со стороны насекомых-вредителей, затраты на производство биологического вида с целью управления и затраты на ядохимикаты и др., причем

$$f^0(\cdot) = \sum_{i=1}^3 f_i^0(N) + C_1 P + C_2 D \geq 0, \quad f_i^0(N) \geq 0;$$

$$\varphi(\cdot) = \sum_{i=1}^3 \varphi_i(N) + C_1 P + C_2 P \geq 0, \quad \varphi_i(N) \geq 0, \quad i = \overline{1, 3},$$

где $C_i = const > 0$, $i = 1, 2$, и функция «доза–эффект» $\mu = \mu(D)$ удовлетворяет следующим условиям:

$$\mu(D) \geq 0; \quad \frac{d\mu}{dD} > 0; \quad \frac{d^2\mu}{dD^2} \leq 0.$$

Заметим, что оптимизационная задача защиты растений решается только в том случае, когда условия (2) и (3) нарушаются.

3 Заключение

Результаты исследования могут быть использованы в качестве первичного звена информационных технологий, применяемых в области защиты растений.

Литература

1. Liu B., Zhang Y., Chen I. The dynamical behaviors of Lotka–Volterra predator–prey model concerning integrated pest management // Nonlinear Anal. Real, 2005. Vol. 6. Iss. 2. P. 227–243. doi: 10.1016/j.nonrwa.2004.08.001.

2. *Jambhulkar P. P., Murlidhar S.* Information technology in plant protection // Current concepts in plant protection / Ed. S. Banik. — New Dehli: Studium Press India Pvt. Ltd., 2013. P. 30.
3. *Robles-Fernandez A. L., Lira-Noriega A.* Combining phylogenetic and occurrence information for risk assessment of pest and pathogen interactions with host plants // Front. App. M. Stat., 2017. Vol. 3. P. 1–9. doi: 10.3389/fams.2017.00017.
4. *Lotka A. T.* Theoric analytique des associations biologiques. — Paris: Principes, 1939. 218 p.
5. *Lotka A. T.* Elements of physical biology. — New York, NY, USA: Dover Publ., 1956. 460 p.
6. *Вольтерра В.* Математическая теория борьбы за существование. — М.: Наука, 1976. 286 с.
7. *May R. M.* Simple mathematical model with very complicated dynamics // Nature, 1976. Vol. 261. Iss. 560. P. 459–467.
8. *Свирижев Ю. М., Елизаров Е. Я.* Математическое моделирование биологических систем. — М.: Наука, 1972. 159 с.
9. *Свирижев Ю. М., Логофет Д. О.* Устойчивость биологических сообществ. — М.: Наука, 1978. 352 с.
10. *Логофет Д. О., Юнусов М. К.* Вопросы качественной устойчивости и регуляризации в динамических моделях агросиноценоза хлопчатника // Вопросы кибернетики, 1979. Вып. 52. С. 60–72.
11. *Юнусов М. К.* Математические модели борьбы с вредителями агроценозов. — Душанбе: Дониш, 1991. 146 с.
12. *Одинаев Р. Н.* Необходимое и достаточное условие существования решения задачи защиты растений // ДАН РТ, 2015. Т. 58. Вып. 10. С. 879–886.
13. *Одинаев Р. Н.* Об одной нелинейной математической модели защиты растений с учетом возрастной структуры // Вестник Таджикского национального университета. Сер. естественных наук, 2016. Вып. 1/2(196). С. 13–17.
14. *Одинаев Р. Н.* Исследование оптимизационного процесса задачи защиты растений с учетом возрастной структуры насекомых // Вестник Таджикского национального университета, 2017. Вып. 1/3(131). С. 6–9.

Поступила в редакцию 04.04.18

A MATHEMATICAL MODEL OF THE PROBLEM OF PLANT PROTECTION IN A BIOSYSTEM OF THE TYPE “HARMFUL INSECTS – BENEFICIAL INSECTS” WITH ARBITRARY TROPHIC FUNCTIONS

R. N. Odinaev

Faculty of Mechanics and Mathematics, Tajik National University, 17 Rudaki Av.,
Dushanbe 734025, Republic of Tajikistan

Abstract: When studying the agrocenosis of cotton, the problem arises of a formal description of its structures, i. e., a set of blocks in which the stocks

of elements and energy are concentrated, and the flows connecting them within the agrocenosis, carrying out the transfer of matter and energy from the block to the block and, also, studies of stability issues — agrocenosis. The basis of cotton agrocenosis is the crop itself: cotton as a primary product. Due to cotton, a variety of organisms live — phytophages, cotton pests. Pests of cotton include aphids (black alfalfa, melon, and large cotton), scoops (cotton, small ground, and azimic), and spider mite. Pests find in cotton a copious source of food and multiply intensely. The author considers the mathematical problems of point models, i. e., when the population size depends on time. The so-called preparatory task of plant protection is formulated. Necessary and sufficient conditions for the solvability of preparatory problems of plant protection with arbitrary trophic functions are found.

Keywords: model; agrocenosis; plant protection problem; number of population; arbitrary trophic functions; useful insects – harmful insects; model biosystem

DOI: 10.14357/08696527190109

References

1. Liu, B., Y. Zhang, and I. Chen. 2005. The dynamical behaviors of Lotka–Volterra predator-prey model concerning integrated pest management. *Nonlinear Anal. Real* 6(2):227–243. doi: 10.1016/j.nonrwa.2004.08.001.
2. Jambhulkar, P. P., and S. Murlidhar. 2013. Information technology in plant protection. *Current concepts in plant protection*. Ed. S. Banik. New Dehli: Studium Press India Pvt. Ltd. 30.
3. Robles-Fernandez, A. L., and A. Lira-Noriega. 2017. Combining phylogenetic and occurrence information for risk assessment of pest and pathogen interactions with host plants. *Front. App. M. Stat.* 3:1-9. doi: 10.3389/fams.2017.00017.
4. Lotka, A. T. 1939. *Theoric analytique des associations biologiques*. Paris: Principles. 218 p.
5. Lotka, A. T. 1956. *Elements of physical biology*. New York, NY: Dover Publ. 460 p.
6. Volterra, V. 1976. *Matematicheskaya teoriya bor'by za sushchestvovanie* [Mathematical theory of the struggle for existence]. Moscow: Nauka. 286 p.
7. May, R. M. 1976. Simple mathematical model with very complicated dynamics. *Nature* 261(560):459–467.
8. Svirizhev, Yu. M., and E. Ya. Elizarov. 1972. *Matematicheskoe modelirovanie biologicheskikh system* [Mathematical modeling of biological systems]. Moscow: Nauka. 159 p.
9. Svirizhev, Yu. M., and D. O. Logofet. 1978. *Ustoychivost' biologicheskikh soobshchestv* [Stability of biological communities]. Moscow: Nauka. 352 p.
10. Logofet, D. O., and M. K. Yunusov. 1979. Voprosy kachestvennoy ustoychivosti i regulyarizatsii v dinamicheskikh modelyakh agrosinotsenozov khlopchatnika [Questions of qualitative stability and regularization in dynamic models of cotton agrophytocenosis]. *Voprosy kibernetiki* [Problems of Cybernetics] 52:60–72.
11. Yunusov, M. K. 1991. *Matematicheskie modeli bor'by s vreditelyami agrotsenozov* [Mathematical models of pest control of agrocenoses]. Dushanbe: Donish. 146 p.

12. Odinaev, R. N. 2015. Neobkhodimoe i dostatochnoe uslovie sushchestvovaniya resheniya zadachi zashchity rasteniy [Necessary and sufficient condition of subsistence of discussed problem on protection of the plant]. *Reports of the Academy of Sciences of the Republic of Tajikistan* 58(10):879–886.
13. Odinaev, R. N. 2016. Ob odnoy nelineynoy matematicheskoy modeli zashchity rasteniy s uchetom vozrastnoy struktury [A nonlinear mathematical model of plant protection taking into account the age structure]. *Bull. Tajik National University. Ser. Natural Sciences* 1/2(196):13–17.
14. Odinaev, R. N. 2017. Issledovanie optimizatsionnogo protsessa zadachi zashchity rasteniy s uchetom vozrastnoy struktury nasekomykh [Study of the optimization process of the problem of plant protection with taking into account the age structure of insects]. *Bull. Tajik National University. Ser. Natural Sciences* 1/3(131):6–9.

Received April 4, 2018

Contributor

Odinaev Raim N. (b. 1964) — Candidate of Science (PhD) in physics and mathematics, associate professor, dean of the Faculty of Mechanics and Mathematics, Tajik National University, 17 Rudaki Av., Dushanbe 734025, Republic of Tajikistan; raim.odinaev@mail.ru

АНАЛИТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В ВОЛЬТЕРРОВСКИХ СТОХАСТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ МЕТОДОМ КАНОНИЧЕСКИХ РАЗЛОЖЕНИЙ*

И. Н. Сеницын¹, В. И. Сеницын²

Аннотация: На основе методов канонических разложений (МКР) разработаны приближенные нелинейные корреляционные методы и алгоритмы аналитического моделирования гармонических, квазигармонических и широкополосных стохастических процессов (СтП) в обобщенных нелинейных вольтерровских системах в условиях аддитивных и параметрических гармонических, квазигармонических и широкополосных возмущений. Подробно рассмотрена стохастическая задача В. Вольтерры « R хищников – R жертв» с одним трофическим уровнем. В качестве тестовых примеров рассмотрены задачи аналитического нелинейного корреляционного моделирования одномерных и двумерных нелинейных вольтерровских систем в условиях аддитивных и параметрических гармонических, квазигармонических и широкополосных возмущений. Изучена устойчивость регулярных и стохастических режимов. Рассмотрены важные частные случаи.

DOI: 10.14357/08696527190110

Ключевые слова: аналитическое моделирование; вольтерровская стохастическая система (ВСтС); гармонические, квазигармонические и широкополосные шумы; метод канонических разложений (МКР); метод медленно меняющихся амплитуд (M^3A); метод нормальной аппроксимации (МНА); метод статистической линеаризации (МСЛ); стохастический процесс (СтП); стохастическая система (СтС)

1 Введение

В [1] разработаны два эффективных метода аналитического моделирования эквивалентных нормальных (гауссовских) стохастических процессов (СтП) в многоуровневых вольтерровских стохастических системах (ВСтС). Первый основан на методе нормальной аппроксимации (МНА) для многомерной ВСтС с аддитивными и параметрическими гауссовскими и негауссовскими белыми шумами для функций межвидового взаимодействия произвольного вида, в том числе разрывных. Второй основан на методе статистической линеаризации (МСЛ)

*Работа выполнена при финансовой поддержке РАН (проект 0063-2018-0008).

¹Институт проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук, sinitsin@dol.ru

²Институт проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук, vsinitsin@ipiran.ru

функций межвидового взаимодействия и сведения исходной ВСтС к эквивалентной ВСтС с аддитивными линейными и параметрическими шумами. Получена совместная система уравнений для вероятностных моментов первого и второго порядка. Рассмотрены вопросы аналитического моделирования стационарных регулярных и стохастических режимов. В качестве тестовых примеров получены уравнения нелинейного корреляционного аналитического моделирования одной и двух популяций в стохастической среде. Изучены стационарные режимы и их устойчивость. В [2] представлены точные и приближенные методы аналитического моделирования процессов в нелинейных ВСтС в условиях аддитивных и параметрических белых шумов. Изучена устойчивость стационарных регулярных и стохастических режимов по первым двум вероятностным моментам. Рассмотрены вопросы аналитического моделирования одномерных распределений с инвариантной мерой в двумерной дифференциальной ВСтС.

Рассмотрим вопросы аналитического моделирования гармонических, квазигармонических и широкополосных процессов в вольтерровских системах на основе линейных и нелинейных МКР [3]. Статья содержит введение, заключение и четыре раздела. В разд. 2 приведены сведения из теории МКР. Раздел 3 содержит описание методов и алгоритмов аналитического моделирования СтП на основе МКР и их применение к стохастической задаче В. Вольтерры «хищники – жертвы». В разд. 4 и 5 рассматриваются тестовые примеры одно- и двумерных гармонических, квазигармонических и широкополосных вольтерровских систем. Заключение содержит выводы и предложения по развитию полученных результатов.

2 Метод канонических разложений

В [3] показано, что в основе МКР для конечномерных векторных ВСтС лежат следующие прямая и обратная теоремы Пугачева.

1. Если векторный СтП $X = X(t)$ обладает конечными вероятностными моментами второго порядка, то из канонического разложения (КР) $X(t)$:

$$X(t) = [X_h(t)] = m^x(t) + \sum_{\nu} V_{\nu} x_{\nu}(t), \quad X_h(t) = m_h^x(t) + \sum_{\nu} V_{\nu} x_{\nu h}(t), \quad (1)$$

где $m^x(t) = \mathbf{M}X(t)$, $m_h^x(t) = \mathbf{M}X_h(t)$, \mathbf{M} — символ математического ожидания; V_{ν} — скалярные случайные величины (СВ) с нулевыми математическими ожиданиями ($\nu = 1, 2, \dots$), дисперсиями $D_{\nu} = \mathbf{M} |V_{\nu}|^2$ и координатными функциями

$$x_{\nu}(t) = [x_{\nu 1}(t), \dots, x_{\nu n}]^T ;$$

$$x_{\nu h}(t) = \frac{1}{D_{\nu}} \mathbf{M} [X_h^0(t) \bar{V}_{\nu}] \quad (h = \overline{1, n}),$$

а черта — символ сопряжения, вытекает КР ковариационной матрицы и ее ковариационных функций ($h, l = \overline{1, n}$):

$$K^x(t) = [K_{hl}^x(t)], \quad K_{hl}^x(t) = \sum_{\nu} D_{\nu} x_{\nu h}(t) \overline{x_{\nu h}(t)};$$

$$K^x(t_1, t_2) = [K_{hl}^x(t_1, t_2)], \quad K_{hl}^x(t_1, t_2) = \sum_{\nu} D_{\nu} x_{\nu h}(t_1) \overline{x_{\nu h}(t_2)}. \quad (2)$$

2. Если векторный СтП $X(t)$ обладает конечными вероятностными моментами второго порядка, то из КР матрицы ковариационных функций (2) вытекает КР СтП (1).

В [3] представлены точные и приближенные методы линейного и нелинейного стохастического анализа и моделирования. В их основе лежат методы рекуррентной параметризации (МНА, МСЛ, методы моментов, ортогональных разложений, эллипсоидальной аппроксимации и др. [4, 5]) посредством КР. Показано, что для конечномерных ВСтС порядка N число уравнений МНА равно $Q_{\text{МНА}} = N(N + 3)/2$. Для МНА на основе КР требуется проинтегрировать только N уравнений для математических ожиданий и NN_D (N_D — число членов в КР) уравнений для координатных функций, т. е. $Q_{\text{МНА}}^{\text{КР}} = N(1 + N_D)$. Вследствие фильтрующих свойств уравнений стационарных широкополосных ВСтС достаточно ограничиться небольшим числом членов N_D в полосе частот согласно условию $Q_{\text{МНА}} \gg Q_{\text{МНА}}^{\text{КР}}$. Для квазигармонических ВСтС на частоте ω в первом приближении в рамках метода медленно меняющихся амплитуд (М³А) [6] достаточно ограничиться одним членом на частоте ω .

3 Методы и алгоритмы аналитического моделирования процессов в обобщенных вольтерровских стохастических системах посредством канонического разложения

3.1. Основываясь на [3], рассмотрим МКР для следующего более общего типа ВСтС, чем изученные в [1, 2], векторные уравнения

$$\dot{Y} = F(t, Y, X(t, Y)) = [\varepsilon(t, X(t, Y)) - \gamma(t, Y, X(t, Y))] Y + \alpha(t, X(t, Y)),$$

$$Y(t_0) = Y_0 \quad (3)$$

в случае, когда допустима линеаризация векторной функции $F = F(t, Y, X(t, Y))$ посредством КР стохастических возмущений X , зависящих от t и Y , вида

$$\left. \begin{aligned} X &= X(t, Y) = m^x(t, Y) + \sum_{\nu} V_{\nu} x_{\nu}(t, Y); \\ X_s &= X_s(t, Y) = m_s^x(t, Y) + \sum_{\nu} V_{\nu} x_{\nu s}(t, Y) \quad (s = \overline{1, S}). \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Здесь $m_s^x = m_s^x(t, Y)$ и $x_{\nu s} = x_{\nu s}(t, Y)$ — математические ожидания и координатные функции, являющиеся определенными функциями t и вектора Y ; $\varepsilon = \varepsilon(t, X(t, Y))$, $\gamma = \gamma(t, Y, X(t, Y))$ и $\alpha = \alpha(t, Y, X(t, Y))$ — известные матричные и векторные функции t и Y . Если подставить (4) в (3), то правые части будут зависеть от скалярных СВ V_ν , причем будут вполне известными функциями t , Y и V_ν . После интегрирования этих уравнений, получим функциональные зависимости

$$Y = \varphi(t, V_\mu); Y_s = \varphi_s(t, V_\mu) \quad (\mu = 1, 2, \dots, s = \overline{1, S}). \quad (5)$$

Если функции φ (φ_s) достаточно близки к линейным в области изменения Y , а время t считать параметром, то можно применить обычные методы теории линейных функциональных зависимостей между СВ V_ν в области возможных значений СВ V_ν и заменить (5) на приближенное:

$$Y \approx [Y]_0 + \sum V_\nu y_\nu; Y_k \approx [Y_k]_0 + \sum_\nu V_\nu \left(\frac{\partial Y_k}{\partial V_\nu} \right)_0 \quad (k = \overline{1, N}). \quad (6)$$

В результате для вектора математических ожиданий $m^y(t) \approx [Y]_0$; $m_k^y(t) \approx [Y_k]_0$ ($k = \overline{1, N}$) придем к следующим уравнениям:

$$\dot{m}^y = F(t, m^y, m^x); \dot{m}_k^y = F_k(t, m_1^y, \dots, m_N^y, m_1^x, \dots, m_N^x) \quad (k = \overline{1, N}); \quad (7)$$

$$m_s^x = m_s^x(t, m_1^y, \dots, m_N^y) \quad (s = \overline{1, S}), \quad (8)$$

а для ковариационной матрицы и матрицы ковариационных функций:

$$K^y(t) = [K_{ij}^y(t)] \approx \sum_\nu D_\nu y_\nu(t) \overline{y_\nu(t)}; \quad (9)$$

$$K^y(t_1, t_2) = [K_{ij}^y(t_1, t_2)] \approx \sum_\nu D_\nu y_\nu(t_1) \overline{y_\nu(t_2)}. \quad (10)$$

Здесь координатные функции

$$\left. \begin{aligned} y_\nu(t) &= [y_{\nu 1}, \dots, y_{\nu N}]^T; \\ y_{\nu k} &= \left[\frac{\partial Y_k}{\partial V_\nu} \right]_0 = \sum_{p=1}^N \left(\frac{\partial F_k}{\partial m_p^y} + \sum_{q=1}^S \frac{\partial F_k}{\partial m_q^x} \frac{\partial m_q^x}{\partial m_p^y} \right) \left[\frac{\partial Y_p}{\partial V_\nu} \right]_0 + \sum_{q=1}^S \frac{\partial F_k}{\partial m_q^x} x_{\nu q} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

после вычисления m^y и $F_k(t, m^y, m^x)$ (согласно (7) и (8)) определяются путем интегрирования следующих обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$\dot{y}_\nu(t) = A(t)y_\nu(t) + B(t)c_\nu(t), \quad \dot{y}_{\nu k} = \sum_{p=1}^N A_{kp}(t)y_{\nu p} + \sum_{q=1}^S B_{kq}(t)c_{\nu q}(t) \quad (k = \overline{1, N}), \quad (12)$$

где

$$\begin{aligned}
 A = A(t) &= [A_{kp}(t)]; & A_{kp} &= \frac{\partial F_k}{\partial m_p^y} + \sum_{q=1}^S \frac{\partial F_k}{\partial m_q^x} \frac{\partial m_q^x}{\partial m_p^y} \quad (k, p = \overline{1, N}); \\
 B = B(t) &= [B_{kp}(t)]; & B_{kp}(t) &= \frac{\partial F_k}{\partial m_q^x} \quad (k = \overline{1, N}, q = \overline{1, S}); \\
 c_\nu &= c_\nu(t) = [x_{\nu 1} \dots x_{\nu S}]^T; & c_{\nu q} &= x_{\nu q}(t, m_1^y, \dots, m_N^y).
 \end{aligned}$$

Давая ν все возможные значения, получим системы уравнений, определяющие значения производных Y_k по всем СВ V_ν при нулевых значениях этих параметров.

Если начальные условия для (7) и (12) не случайны, то следует принять

$$t = t_0; \quad m_k^y = y_{k0}; \quad y_{\nu k} = 0 \quad (k = \overline{1, N}). \quad (13)$$

Если начальные условия $t = t_0$ и $Y_k = Y_{k0}$ ($k = \overline{1, N}$) случайны, то можно рассматривать СтП X_1, \dots, X_S и СВ Y_{10}, \dots, Y_{N0} как одну $(N + S)$ -мерную векторную СВ. Тогда начальными условиями будут следующие величины:

$$t = t_0; \quad m_k^y = m_{k0}^y; \quad y_{\nu k} = y_{\nu k0} \quad (k = \overline{1, N}). \quad (14)$$

Замечание 3.1. Для некоррелированных начальных условий и стационарных возмущений асимптотической устойчивости (12) вместо интегрирования уравнений потребуется решение конечных соотношений для стационарных решений.

Таким образом, в основе алгоритмов аналитического моделирования посредством МКР для ВСтС (3) лежат соотношения (6)–(12) при начальных условиях (13) или (14).

Замечание 3.2. В случае, когда непосредственная линеаризация функций $F(t, Y, X(t, Y))$ посредством КР невозможна, целесообразно пользоваться МНА на основе МКР [3–5]. Тогда, решая детерминированные уравнения МНА посредством КР, получим искомые выражения для вектора математических ожиданий, ковариационной матрицы и матрицы ковариационных функций:

$$\begin{aligned}
 m_t^y &= m_t^y(t, m_t^x, D_\mu^v, x_{\mu t}); & K_t^y &= K_t^y(t, m_t^x, D_\mu^v, x_{\mu t}); \\
 K^y(t_1, t_2) &= K^y(t_1, t_2, m_{t_1}^x, m_{t_2}^x, D_\mu^v, x_{\mu t_1}, x_{\mu t_2}).
 \end{aligned}$$

Замечание 3.3. Аналогично, следуя [3–5], составляются уравнения для одно- и многомерных распределений, если в качестве их параметров выбраны вероятностные моменты и квазимоменты высших порядков, семиинварианты, коэффициенты ортогональных разложений, в частности методы эллипсоидальной аппроксимации и линеаризации.

3.2. Оценку точности и выбор числа N_D членов КР согласно [3] проводят для каждого источника шумов $V^{(l)}$ из следующего дисперсионного соотношения:

$$\sum_{s=1}^{N_D} D_s^{(l)} \text{tr} \left[y_s^{(l)}(t) \overline{y_s^{(l)}(t)} \right] < \delta_T^{(l)}, \quad t \in (t_0, t_0 + T),$$

где $y_s^{(l)}(t) = [y_{s1}(t) \cdots y_{sN}(t)]$ — вектор координатных функций; $D_s^{(l)}$ — дисперсии СВ $V_s^{(l)}$.

3.3. Следуя [2], рассмотрим стохастический аналог задачи Вольтерры « R хищников – R жертв» с одним трофическим уровнем [7, 8] на основе следующих уравнений:

$$\dot{Y}_i = \left(\varepsilon_{0i} + \sigma_i^\varepsilon V^{(2)} \right) Y_i - \sum_{j=1}^N \left(p_{0ij} + \sigma_{ij}^p V^{(3)} \right) Y_i Y_j + \alpha_{0i} + \sigma_i^\alpha V^{(1)};$$

$$Y_i(t_0) = Y_{i0} \quad (i = \overline{1, N}).$$

Здесь $V^{(l)}$ ($l = 1, 2, 3$) — некоррелированные гауссовские белые шумы с диагональными матрицами интенсивностей $\nu^{(l)} = \text{diag} \left(\nu_1^{(l)}, \dots, \nu_N^{(l)} \right)$. Положим

$$a(Y, t) = \left[\alpha_{0i} + \varepsilon_{0i} Y_i - \sum_{j=1}^N p_{0ij} Y_i Y_j \right]_i; \quad b(Y, t) = \begin{bmatrix} b^{(1)}(Y, t) & 0 & 0 \\ 0 & b^{(2)}(Y, t) & 0 \\ 0 & 0 & b^{(3)}(Y, t) \end{bmatrix},$$

где

$$\left. \begin{aligned} b^{(1)}(Y, t) &= \left[\sigma_\alpha^{(1)} \ 0 \ 0 \right], \\ b^{(2)}(Y, t) &= \left[0 \ \sigma_\varepsilon^{(2)} \ 0 \right]; \\ b^{(3)}(Y, t) &= \left[0 \ 0 \ - \sum_{j=1}^N \sigma_{ij}^p Y_i Y_j \right], \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

$$V^{(l)} = \sum_{h_l} V_{h_l}^{(l)} x_{h_l}^{(l)}; \quad D V_{h_l}^{(l)} = D_{h_l}^{(l)} \quad (l = \overline{1, 3}, \quad h_l = 1, N_l);$$

$$M Y_i = m_i; \quad Y_i^0 = Y_i - m_i = \sum_{l=1}^3 \sum_{h_l=1}^{N_l} V_{h_l} y_{h_l i}^{(l)}.$$

Тогда придем к искомым обыкновенным дифференциальным уравнениям для математических ожиданий m_i и координатных функций $y_{h_l i}^{(l)}$:

$$\dot{m}_i = \varepsilon_{0i} m_i - \sum_{j=1}^N p_{0ij} m_i m_j + \alpha_{0i};$$

$$\left. \begin{aligned} \dot{y}_{h_1 i}^{(1)} &= \varepsilon_{01} y_{h_1 i}^{(1)} - \sum_{j=1}^N p_{0ij} \left[m_i y_{h_{1j}}^{(1)} + m_j y_{h_{1i}}^{(1)} \right] + \sigma_{h_1 i}^{\alpha} x_{h_1 i}^{(1)} ; \\ \dot{y}_{h_2 i}^{(2)} &= \varepsilon_{0i} y_{h_2 i}^{(2)} - \sum_{j=1}^N p_{0ij} \left[m_i y_{h_{2i}}^{(2)} + m_j y_{h_{2i}}^{(2)} \right] + \sigma_{h_2 i}^{\varepsilon} x_{h_2 i}^{(2)} ; \\ \dot{y}_{h_3 i}^{(3)} &= \varepsilon_{0i} y_{h_3 i}^{(3)} - \sum_{j=1}^N p_{0ij} \left(m_i y_{h_{3i}}^{(3)} + m_j y_{h_{3i}}^{(3)} \right) - \sum_{j=1}^N \sigma_{ij}^p m_i m_j x_{h_3 i}^{(3)} , \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

где $y_{h_i i}^{(l)}(t_0) = y_{h_i i_0}^{(l)}$.

Замечание 3.4. Точность МКР и число членов N_D можно оценить на основе уравнения линейной корреляционной теории [4]:

$$\dot{K}^y = \hat{A}K^y + K^y\hat{A}^T + \hat{B}\nu\hat{B}^T,$$

где \hat{A} — линеаризованная матрица (16), а \hat{B} — линеаризованная матрица (15).

4 Пример: аналитическое моделирование одномерных гармонических вольтеровских систем

4.1. Положим в ВСтС (3), что Y — скалярный действительный СтП, а коэффициенты ε и $\gamma_1 = \gamma Y^{-1}$ допускают представления:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon &= \varepsilon_0 + \varepsilon' \sin \omega t + \varepsilon'' \cos \omega t ; \\ \alpha &= \alpha_0 + \alpha' \sin \omega t + \alpha'' \cos \omega t ; \\ \gamma_1 &= \gamma_{10} + \gamma_1' \sin \omega t + \gamma_1'' \cos \omega t . \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

Тогда придем к следующему уравнению:

$$\dot{Y} = (\varepsilon_0 + \varepsilon' \sin \omega t + \gamma'' \cos \omega t) F(Y)Y + \alpha_0 + \alpha' \sin \omega t + \alpha'' \cos \omega t, \quad Y(t_0) = Y_0. \quad (18)$$

Рассмотрим сначала случай линейной функции $F(Y) = Y$. Пользуясь M^3A , будем искать решение (17), (18) в виде:

$$\left. \begin{aligned} Y &= a + b \sin \omega t + c \cos \omega t ; \\ \dot{Y} &= \dot{a} + \dot{b} \sin \omega t + b\omega \cos \omega t + \dot{c} \cos \omega t - c\omega \sin \omega t . \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

Согласно M^3A ограничимся учетом только первых гармоник, положив

$$\begin{aligned} \sin^2 \omega t &\approx \frac{1}{2}; & \cos^2 \omega t &= \frac{1}{2}; \\ \sin^3 \omega t &\approx \frac{3}{4} \sin \omega t; & \cos^3 \omega t &\approx \frac{3}{4} \cos \omega t; \\ \sin^2 \omega t \cos \omega t &\approx \frac{1}{4} \cos \omega t; & \sin \omega t \cos^2 \omega t &\approx \frac{1}{4} \sin \omega t. \end{aligned}$$

После подстановки (19) в (18) и разрешения относительно производных \dot{a} , \dot{b} и \dot{c} , приходим к искомым уравнениям аналитического моделирования гармонических процессов в одномерной вольтерровской системе:

$$\begin{aligned} \dot{a} = A(t, a, b, c, \tilde{\varepsilon}, \tilde{\gamma}_1, \tilde{\alpha}) &= \varepsilon_0 a + \alpha_0 + \frac{1}{2} (b\varepsilon' + c\varepsilon'') - \\ &- \frac{\gamma_0}{2} (2a^2 + b^2 + c^2) - \gamma_1' ab - \gamma_1'' ac, \quad a(t_0) = a_0; \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} \dot{b} = B(t, a, b, c, \tilde{\varepsilon}, \tilde{\gamma}_1, \tilde{\alpha}) &= c\omega + (\varepsilon_0 b + \varepsilon' a) + \alpha' - \\ &- 2\gamma_{10} ab - \frac{1}{4} \gamma_1' (4a^2 + 3b^2 + c^2) - \frac{1}{2} \gamma_1'' bc, \quad b(t_0) = b_0; \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} \dot{c} = C(t, a, b, c, \tilde{\varepsilon}, \tilde{\gamma}_1, \tilde{\alpha}) &= -b\omega + \alpha'' + (\varepsilon_0 c + \varepsilon'' a) - \\ &- 2\gamma_{10} ca - \frac{1}{2} \gamma_1' bc - \frac{1}{4} \gamma_1'' (4a^2 + b^2 + 3c^2), \quad c(t_0) = c_0, \end{aligned} \quad (22)$$

где $\tilde{\varepsilon} = (\varepsilon_0, \varepsilon', \varepsilon'')$, $\tilde{\gamma}_1 = (\gamma_{10}, \gamma_1', \gamma_1'')$ и $\tilde{\alpha} = (\alpha_0, \alpha', \alpha'')$ — параметры гармонических возмущений; a_0 , b_0 и c_0 — начальные условия.

4.2. Для определения стационарных режимов, когда $a = a^*$, $b = b^*$ и $c = c^*$, из (20)–(22) имеем конечные нелинейные уравнения:

$$\left. \begin{aligned} A(a^*, b^*, c^*, \tilde{\varepsilon}, \tilde{\gamma}_1, \tilde{\alpha}) &= 0; \\ B(a^*, b^*, c^*, \tilde{\varepsilon}, \tilde{\gamma}_1, \tilde{\alpha}) &= 0; \\ C(a^*, b^*, c^*, \tilde{\varepsilon}, \tilde{\gamma}_1, \tilde{\alpha}) &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

Асимптотическая устойчивость стационарных режимов a^* , b^* и c^* устанавливается на основе следующих уравнений в вариациях в силу (20)–(22):

$$\begin{aligned} \delta \dot{a} &= A_{\delta a}^* \delta a + A_{\delta b}^* \delta b + A_{\delta c}^* \delta c; \\ \delta \dot{b} &= B_{\delta a}^* \delta a + B_{\delta b}^* \delta b + B_{\delta c}^* \delta c; \\ \delta \dot{c} &= C_{\delta a}^* \delta a + C_{\delta b}^* \delta b + C_{\delta c}^* \delta c. \end{aligned}$$

Здесь соответствующие производные вычисляются при $a = a^*$, $b = b^*$ и $c = c^*$. Для получения условий устойчивости следует составить характеристическое уравнение

$$\Delta(\rho) = \det \begin{bmatrix} A_{\delta a}^* - \rho & A_{\delta b}^* & A_{\delta c}^* \\ B_{\delta a}^* & B_{\delta b}^* - \rho & B_{\delta c}^* \\ C_{\delta a}^* & C_{\delta b}^* & C_{\delta c}^* - \rho \end{bmatrix} = a_0 \rho^3 + a_1 \rho^2 + a_2 \rho + a_3 = 0 \quad (24)$$

и потребовать выполнения условий:

$$a_0 > 0; \quad a_1 > 0; \quad a_1 a_2 - a_0 a_3 > 0; \quad a_3 > 0.$$

В (24) приняты следующие обозначения:

$$\begin{aligned} a_0 &= 1; \quad a_1 = -(A_{\delta a}^* + B_{\delta b}^* + C_{\delta c}^*) > 0; \\ a_2 &= C_{\delta c}^* (A_{\delta a}^* + B_{\delta b}^*) + A_{\delta a}^* B_{\delta b}^* - A_{\delta b}^* B_{\delta a}^* - A_{\delta c}^* C_{\delta a}^* - B_{\delta c}^* C_{\delta b}^* > 0; \\ a_3 &= -A_{\delta a}^* B_{\delta b}^* C_{\delta c}^* + A_{\delta b}^* (B_{\delta a}^* C_{\delta c}^* - C_{\delta a}^* B_{\delta c}^*) - \\ &\quad - A_{\delta c}^* (B_{\delta a}^* C_{\delta b}^* - C_{\delta a}^* B_{\delta b}^*) + A_{\delta a}^* B_{\delta c}^* C_{\delta b}^* > 0. \end{aligned}$$

Рассмотрим важные частные случаи.

1. Гармонические возмущения отсутствуют. Тогда имеем:

$$\begin{aligned} A^* &= \varepsilon_0 a^* - \gamma_{01} \left(a^{*2} + \frac{b^{*2} + c^{*2}}{2} \right) + \alpha_0 = 0; \\ B^* &= \varepsilon_0 b^* - 2\gamma_{01} a^* b^* = 0; \\ C^* &= \varepsilon_0 c^* - 2\gamma_{01} a^* c^* = 0. \end{aligned}$$

Отсюда видно, что a^* является положительным корнем квадратного уравнения

$$\gamma_{01} a^{*2} - \varepsilon_0 a^* - \alpha_0 = 0$$

при $\varepsilon_0 - \gamma_{01} a^* \neq 0$, $a^* \neq 0$ и $b^* = c^* = 0$ и определяется формулой:

$$a^* = \frac{\varepsilon_0 \pm \sqrt{\varepsilon_0^2 + 4\alpha_0 \gamma_{01}}}{2\gamma_{01}}.$$

2. Аддитивное гармоническое возмущение: $(\alpha_0, \alpha', \alpha'') \neq 0$; $\varepsilon_0 \neq 0$; $\gamma_0 \neq 0$; $(\varepsilon', \varepsilon'') = 0$; $(\gamma'_1, \gamma''_1) = 0$. В этом случае a^* , b^* и c^* определяются из уравнений:

$$\begin{aligned} A^* &= \varepsilon_0 a^* - \gamma_{01} \left(a^{*2} + \frac{b^{*2} + c^{*2}}{2} \right) + \alpha_0 = 0; \\ B^* &= c^* \omega + \varepsilon_0 b^* + \alpha' - 2\gamma_{01} a^* b^* = 0; \\ C^* &= -b^* \omega + \varepsilon_0 c^* - 2\gamma_{01} a^* c^* + \alpha'' = 0. \end{aligned}$$

3. Параметрическое гармоническое возмущение коэффициента ε : $(\alpha_0, \alpha', \alpha'') = 0$; $(\varepsilon_0, \varepsilon', \varepsilon'') = 0$; $\gamma_1 = \gamma_{10}$; $\gamma'_1 = \gamma''_1 = 0$. В этом случае имеем:

$$A^* = \varepsilon_0 a^* + \frac{\varepsilon' b^* + \varepsilon'' c^*}{2} - \left[\gamma_{01} \left(a^{*2} + \frac{b^{*2} + c^{*2}}{2} \right) \right] = 0;$$

$$B^* = c^* \omega + \varepsilon_0 b^* + \varepsilon' a^* - 2\gamma_{01} a^* b^* = 0;$$

$$C^* = -b^* \omega + \varepsilon_0 c^* + \varepsilon'' a^* - 2\gamma_{01} a^* c^* + \alpha'' = 0.$$

4. Параметрическое гармоническое возмущение коэффициента γ_1 : $(\alpha_0, \alpha', \alpha'') = 0$; $\varepsilon_0 \neq 0$; $(\varepsilon', \varepsilon'') = 0$; $(\gamma_{10}, \gamma'_1, \gamma''_1) \neq 0$. В этом случае имеем:

$$A^* = \varepsilon_0 a^* - \left[\gamma_{01} \left(a^{*2} + \frac{b^{*2} + c^{*2}}{2} \right) + \gamma'_1 a^* b^* + \gamma''_1 a^* c^* \right] = 0;$$

$$B^* = c^* \omega + \varepsilon_0 b^* - \left[2\gamma_{01} a^* b^* + \gamma'_1 \left(a^{*2} + \frac{3b^{*2} + c^{*2}}{4} \right) + \gamma''_1 \frac{c^* b^*}{2} \right] = 0;$$

$$C^* = -b^* \omega + \varepsilon_0 c^* - \left[2\gamma_{01} a^* c^* + \gamma'_1 \frac{c^* b^*}{2} + \gamma''_1 \left(a^{*2} + \frac{b^{*2} + 3c^{*2}}{4} \right) \right] = 0.$$

Замечание 4.1. Аналогично пп. 4.2 и 4.3 рассматривается уравнение (18) в случае нелинейной функции $F = F(Y, t)$. Тогда в соответствии с М³А проводится гармоническая линеаризация функции $\tilde{F} = F(y, t)Y$.

4.4. Для квазигармонических возмущений, когда вектор $\pi = (\varepsilon', \varepsilon'', \gamma', \gamma'', \alpha', \alpha'')$ в (18) является СВ с известной совместной плотностью $f_\pi(\pi)$, плотности вероятности СВ $a = a(\pi)$, $b = b(\pi)$ и $c = c(\pi)$ вычисляются по формулам определения плотности функции случайного аргумента [4]. При этом в нестационарном режиме используются дифференциальные уравнения (20)–(22), а в стационарном режиме — конечные уравнения (23). В рамках нелинейной корреляционной теории в силу (19) имеем следующие выражения для математического ожидания, дисперсии и ковариационной функции:

$$m^Y = M_\pi [a(\pi)];$$

$$D^Y(t) = M_\pi \left\{ [b(\pi) \sin \omega t + c(\pi) \cos \omega t]^2 \right\};$$

$$K^Y(t_1, t_2) = M_\pi \left\{ [b(\pi) \sin \omega t_1 + c(\pi) \cos \omega t_1] [b(\pi) \sin \omega t_2 + c(\pi) \cos \omega t_2] \right\},$$

где M_π — символ математического ожидания для СВ π .

4.5. В случае широкополосных возмущений параметров $\tilde{\varepsilon}$, $\tilde{\gamma}$ и $\tilde{\alpha}$ уравнение (18) при $F(Y) = Y$ имеет вид:

$$\dot{Y} = \left\{ \varepsilon_0 + \sum_{j=1}^{N_D} (\varepsilon'_j \sin \omega_j t + \varepsilon''_j \cos \omega_j t) - \left[\gamma_0 + \sum_{j=1}^{N_D} (\gamma'_j \sin \omega_j t + \gamma''_j \cos \omega_j t) \right] Y \right\} Y + \alpha_0 + \sum_{j=1}^{N_D} (\alpha'_j \sin \omega_j t + \alpha''_j \cos \omega_j t), \quad Y(t_0) = Y_0. \quad (25)$$

Здесь $V'_{\varepsilon j} = \varepsilon'_j$, $V''_{\varepsilon j} = \varepsilon''_j$, $V'_{\gamma j} = \gamma'_j$, $V''_{\gamma j} = \gamma''_j$, $V'_{\alpha j} = \alpha'_j$ и $V''_{\alpha j} = \alpha''_j$ — некоррелированные СВ с нулевыми математическими ожиданиями и дисперсиями $D'_{\varepsilon j}$, $D''_{\varepsilon j}$, $D'_{\gamma j}$, $D''_{\gamma j}$, $D'_{\alpha j}$ и $D''_{\alpha j}$. Тогда согласно МКР (см. п. 3.1) будем иметь:

$$Y(t) = m(t) + \sum_{j=1}^{N_D} (V'_{\varepsilon j} y'_{\varepsilon j} + V''_{\varepsilon j} y''_{\varepsilon j} + V'_{\gamma j} y'_{\gamma j} + V''_{\gamma j} y''_{\gamma j} + V'_{\alpha j} y'_{\alpha j} + V''_{\alpha j} y''_{\alpha j}); \quad (26)$$

$$\dot{m} = \alpha_0 + \varepsilon_0 m - \gamma_0 m^2; \quad (27)$$

$$\left. \begin{aligned} \dot{y}'_{\varepsilon j} &= \varepsilon_0 y'_{\varepsilon j} + m \sin \omega t - 2m y'_{\varepsilon j}, & y'_{\varepsilon j}(t_0) &= y'_{\varepsilon j 0}; \\ \dot{y}''_{\varepsilon j} &= \varepsilon_0 y''_{\varepsilon j} + m \cos \omega t - 2m y''_{\varepsilon j}, & y''_{\varepsilon j}(t_0) &= y''_{\varepsilon j 0}; \end{aligned} \right\} \quad (28)$$

$$\left. \begin{aligned} \dot{y}'_{\gamma j} &= \varepsilon_0 y'_{\gamma j} - 2m y'_{\gamma j} - m^2 \sin \omega t, & y'_{\gamma j}(t_0) &= y'_{\gamma j 0}; \\ \dot{y}''_{\gamma j} &= \varepsilon_0 y''_{\gamma j} - 2m y''_{\gamma j} - m^2 \cos \omega t, & y''_{\gamma j}(t_0) &= y''_{\gamma j 0}; \end{aligned} \right\} \quad (29)$$

$$\left. \begin{aligned} \dot{y}'_{\alpha j} &= \varepsilon_0 y'_{\alpha j} + m \sin \omega t - 2\gamma_0 m y'_{\alpha j} + \sin \omega t, & y'_{\alpha j}(t_0) &= y'_{\alpha j 0}; \\ \dot{y}''_{\alpha j} &= \varepsilon_0 y''_{\alpha j} + m \cos \omega t - 2\gamma_0 m y''_{\alpha j} + \cos \omega t, & y''_{\alpha j}(t_0) &= y''_{\alpha j 0}. \end{aligned} \right\} \quad (30)$$

Дисперсия и ковариационная функция СтП (26) находятся согласно (7)–(9).

Замечание 4.2. В том случае, когда используется МНА (МСЛ), согласно п. 3.2 необходимо в (25) провести статистическую линеаризацию Y^2 , приняв $Y^2 \approx \approx (m^2 + D) + 2m(Y - m)$, а затем решить уравнения МНА (МСЛ) и МКР. В этом случае уравнение (27) примет вид:

$$\dot{m} = \alpha_0 + \varepsilon_0 m - \gamma_0 (m^2 + D),$$

а уравнения (28)–(30) сохраняют прежний вид.

5 Пример: аналитическое моделирование двумерных гармонических, квазигармонических и широкополосных вольтерровских систем

5.1. Положим в (3)

$$\left. \begin{aligned} F_1(Y_1, Y_2) = Y_2; \quad F_2(Y_1, Y_2) = Y_1; \quad \varepsilon_i = \varepsilon_{0i} + \varepsilon'_i \sin \omega t + \varepsilon''_i \cos \omega t; \\ \alpha_i = \alpha_{0i} + \alpha'_i \sin \omega t + \alpha''_i \cos \omega t; \quad \gamma_i = \gamma_{0i} + \gamma'_i \cos \omega t + \gamma''_i \sin \omega t; \\ Y_i = a_i + b_i \sin \omega t + c_i \cos \omega t; \\ \dot{Y}_i = \dot{a}_i + \dot{b}_i \sin \omega t + b_i \omega \cos \omega t + \dot{c}_i \cos \omega t - c_i \omega \sin \omega t \quad (i = 1, 2). \end{aligned} \right\} \quad (31)$$

Тогда приходим к следующим исходным дифференциальным уравнениям задачи:

$$\begin{aligned} \dot{Y}_1 &= [\varepsilon_{01} + \varepsilon'_1 \sin \omega t + \varepsilon''_1 \cos \omega t - (\gamma_{01} + \gamma'_1 \sin \omega t + \gamma''_1 \cos \omega t) Y_2] Y_1 + \\ &\quad + \alpha_{01} + \alpha'_1 \sin \omega t + \alpha''_1 \cos \omega t, \quad Y_1(t_0) = Y_{10}; \\ \dot{Y}_2 &= [\varepsilon_{02} + \varepsilon'_2 \sin \omega t + \varepsilon''_2 \cos \omega t - (\gamma_{02} + \gamma'_2 \sin \omega t + \gamma''_2 \cos \omega t) Y_1] Y_2 + \\ &\quad + \alpha_{02} + \alpha'_2 \sin \omega t + \alpha''_2 \cos \omega t, \quad Y_2(t_0) = Y_{20}. \end{aligned}$$

Отсюда согласно М³А имеем ($i = 1, 2$):

$$\left. \begin{aligned} \dot{a}_i &= A_i; \quad a_i(t_0) = a_{i0}; \\ \dot{b}_i &= B_i, \quad b_i(t_0) = b_{i0}; \\ \dot{c}_i &= C_i; \quad c_i(t_0) = c_{i0}. \end{aligned} \right\} \quad (32)$$

Здесь приняты следующие обозначения:

$$\begin{aligned} A_1 &= A_1(t, a_j, b_j, c_j, \tilde{\varepsilon}, \tilde{\gamma}, \tilde{\alpha}) = \alpha_{01} + \varepsilon_{01} a_1 + \frac{1}{2} (\varepsilon'_1 b_1 + \varepsilon''_1 c_1) - \\ &\quad - \gamma_{01} \left[a_1 a_2 + \frac{1}{2} (b_1 b_2 + c_1 c_2) \right] - \frac{1}{2} \gamma'_1 (a_1 b_2 + b_1 a_2) - \frac{1}{2} \gamma''_1 (a_1 c_2 + c_1 a_2); \\ A_2 &= A_2(t, a_j, b_j, c_j, \tilde{\varepsilon}, \tilde{\gamma}, \tilde{\alpha}) = \alpha_{02} + \varepsilon_{02} a_2 + \frac{1}{2} (\varepsilon'_2 b_2 + \varepsilon''_2 c_2) - \\ &\quad - \gamma_{02} \left[a_1 a_2 + \frac{1}{2} (b_1 b_2 + c_1 c_2) \right] - \frac{1}{2} \gamma'_2 (a_1 b_2 + b_1 a_2) - \frac{1}{2} \gamma''_2 (a_1 c_2 + c_1 a_2); \\ B_1 &= B_1(t, a_j, b_j, c_j, \tilde{\varepsilon}, \tilde{\gamma}, \tilde{\alpha}) = c_1 \omega + \alpha'_1 + (\varepsilon_{01} b_1 + \varepsilon'_1 a_1) - \\ &\quad - \gamma_{01} (a_1 b_2 + b_1 a_2) - \gamma'_1 \left[a_1 a_2 + \frac{1}{4} (3b_1 b_2 + c_1 c_2) \right] - \frac{1}{4} \gamma''_1 (b_1 c_2 + c_1 b_2); \end{aligned}$$

$$B_2 = B_2(t, a_j, b_j, c_j, \tilde{\varepsilon}, \tilde{\gamma}, \tilde{\alpha}) = c_2\omega + \alpha'_2 + (\varepsilon_{02}b_2 + \varepsilon'_2a_2) - \\ - \gamma_{02}(a_1b_2 + b_1a_2) - \gamma'_2 \left(a_1a_2 + \frac{3b_1b_2 + c_1c_2}{4} \right) - \frac{1}{4}\gamma''_2(b_1c_2 + c_1b_2);$$

$$C_1 = C_1(t, a_j, b_j, c_j, \tilde{\varepsilon}, \tilde{\gamma}, \tilde{\alpha}) = -b_1\omega + \alpha''_1 + (\varepsilon_{01}c_1 + \varepsilon''_1a_1) - \\ - \gamma_{01}(a_1c_2 + c_1a_2) - \frac{1}{4}\gamma'_1(b_1c_2 + c_1b_2) - \gamma''_1 \left[a_1a_2 + \frac{1}{4}(b_1b_2 + 3c_1c_2) \right];$$

$$C_2 = C_2(t, a_j, b_j, c_j, \tilde{\varepsilon}, \tilde{\gamma}, \tilde{\alpha}) = -b_2\omega + \alpha''_2 + (\varepsilon_{02}c_2 + \varepsilon''_2a_2) - \\ - \gamma_{02}(a_1c_2 + c_1a_2) - \frac{1}{4}\gamma'_2(b_1c_2 + c_1b_2) - \gamma''_2 \left(a_1a_2 + \frac{b_1b_2 + 3c_1c_2}{4} \right).$$

Здесь $\tilde{\varepsilon} = (\varepsilon_0, \varepsilon', \varepsilon'')$; $\tilde{\gamma} = (\gamma_0, \gamma', \gamma'')$; $\tilde{\alpha} = (\alpha_0, \alpha', \alpha'')$.

Для определения стационарных процессов a_i^* , b_i^* и c_i^* ($i = 1, 2$) из (32) имеем конечные нелинейные уравнения:

$$A_i^* = A_i^*(a_j^*, b_j^*, c_j^*, \tilde{\varepsilon}, \tilde{\gamma}, \tilde{\alpha}) = 0; \\ B_i^* = B_i^*(a_j^*, b_j^*, c_j^*, \tilde{\varepsilon}, \tilde{\gamma}, \tilde{\alpha}) = 0; \\ C_i^* = C_i^*(a_j^*, b_j^*, c_j^*, \tilde{\varepsilon}, \tilde{\gamma}, \tilde{\alpha}) = 0.$$

Асимптотическая устойчивость стационарных процессов устанавливается на основе соответствующих уравнений в вариациях для (32).

5.2. Рассмотрим ряд важных частных случаев.

1. Гармонические возмущения отсутствуют. В этом случае, полагая $c_1 = 0$, получим следующие уравнения для частоты ω и переменных a_1^* , b_1^* , a_2^* , b_2^* и c_2^* нелинейных собственных колебаний на частоте ω^* :

$$A_1^* = \varepsilon_{01}a_1^* - \gamma_{01} \left(a_1^*a_2^* + \frac{b_1^*b_2^*}{2} \right) = 0; \quad A_2^* = \varepsilon_{02}a_2^* - \gamma_{02} \left(a_1^*a_2^* + \frac{b_1^*b_2^*}{2} \right) = 0;$$

$$B_1^* = \varepsilon_{01}b_1^* - \gamma_{01}(a_1^*b_2^* + b_1^*a_2^*) = 0; \quad B_2^* = c_2^*\omega^* + \varepsilon_{02}b_2^* - \gamma_{02}(a_1^*b_2^* + b_1^*a_2^*) = 0;$$

$$C_1^* = -b_1^*\omega^* - \gamma_{01}a_1^*c_2^* = 0; \quad C_2^* = -b_2^*\omega^* + \varepsilon_{02}c_2^* - \gamma_{02}a_1^*c_2^* = 0.$$

Отсюда находим выражение для собственной частоты $\omega^* = \sqrt{-\varepsilon_{01}\varepsilon_{02}}$, при этом

$$\frac{\varepsilon_{01}a_1^*}{\varepsilon_{02}a_2^*} = \frac{\varepsilon_{01}b_1^*}{\varepsilon_{02}b_2^* + c_2^*\omega^*} = \frac{-b_1^*\omega^* + \varepsilon_{02}c_2^*}{b_2^*\omega^*} = \frac{\gamma_{01}}{\gamma_{02}}.$$

2. Аддитивные гармонические возмущения: $\tilde{\alpha}_i = (0, \alpha'_i, \alpha''_i) \neq 0$; $\varepsilon_i \equiv \varepsilon_{0i}$; $\gamma_i \equiv \gamma_{0i}$ ($i = 1, 2$). Имеем:

$$\begin{aligned}
 A_1^* &= \varepsilon_{01} a_1^* - \gamma_{01} \left(a_1^* a_2^* + \frac{b_1^* b_2^* + c_1^* c_2^*}{2} \right) = 0; \\
 A_2^* &= \varepsilon_{02} a_2^* - \gamma_{02} \left(a_1^* a_2^* + \frac{b_1^* b_2^* + c_1^* c_2^*}{2} \right) = 0; \\
 B_1^* &= c_1^* \omega^* + \alpha_1' + \varepsilon_{01} b_1^* - \gamma_{01} (a_1^* b_2^* + b_1^* a_2^*) = 0; \\
 B_2^* &= c_2^* \omega^* + \alpha_2' + \varepsilon_{02} b_2^* - \gamma_{02} (a_1^* b_2^* + b_1^* a_2^*) = 0; \\
 C_1^* &= -b_1^* \omega^* + \alpha_1'' + \varepsilon_{01} c_1^* - \gamma_{01} (a_1^* c_2^* + c_1^* a_2^*) = 0; \\
 C_2^* &= -b_2^* \omega^* + \alpha_2'' + \varepsilon_{02} c_2^* - \gamma_{02} (a_1^* c_2^* + c_1^* a_2^*) = 0.
 \end{aligned}$$

Отсюда следуют линейные зависимости:

$$\frac{\varepsilon_{01} a_1^*}{\varepsilon_{02} a_2^*} = \frac{\alpha_1' + c_1^* \omega^* + \varepsilon_{01} b_1^*}{\alpha_2' + c_2^* \omega^* + \varepsilon_{02} b_2^*} = \frac{\alpha_1'' - b_1^* \omega^* + \varepsilon_{01} c_1^*}{\alpha_2'' - b_2^* \omega^* + \varepsilon_{02} c_2^*} = \frac{\gamma_{01}}{\gamma_{02}}.$$

При $\omega^* = \sqrt{-\varepsilon_{01} \varepsilon_{02}}$ имеют место резонансные явления.

3. Параметрические гармонические возмущения коэффициентов ε_i ($i = 1, 2$), $\tilde{\gamma}_i = (\gamma_{0i}, \gamma_i', \gamma_i'') = 0$ и $\tilde{\alpha}_i = (\alpha_{0i}, \alpha_i', \alpha_i'') = 0$. Находим:

$$\begin{aligned}
 A_1^* &= \varepsilon_{01} a_1^* + \frac{1}{2} (\varepsilon_1' b_1^* + \varepsilon_1'' c_1^*) - \gamma_{01} \left(a_1^* a_2^* + \frac{b_1^* b_2^* + c_1^* c_2^*}{2} \right) = 0; \\
 A_2^* &= \varepsilon_{02} a_2^* + \frac{1}{2} (\varepsilon_2' b_2^* + \varepsilon_2'' c_2^*) - \gamma_{02} \left(a_1^* a_2^* + \frac{b_1^* b_2^* + c_1^* c_2^*}{2} \right) = 0; \\
 B_1^* &= c_1^* \omega^* + (\varepsilon_{01} b_1^* + \varepsilon_1' a_1^*) - \gamma_{01} (a_1^* b_2^* + b_1^* a_2^*) = 0; \\
 B_2^* &= c_2^* \omega^* + (\varepsilon_{02} b_2^* + \varepsilon_2' a_2^*) - \gamma_{02} (a_1^* b_2^* + b_1^* a_2^*) = 0; \\
 C_1^* &= -b_1^* \omega^* + (\varepsilon_{01} c_1^* + \varepsilon_1'' a_1^*) - \gamma_{01} (a_1^* c_2^* + c_1^* a_2^*) = 0; \\
 C_2^* &= -b_2^* \omega^* + (\varepsilon_{02} c_2^* + \varepsilon_2'' a_2^*) - \gamma_{02} (a_1^* c_2^* + c_1^* a_2^*) = 0.
 \end{aligned}$$

Отсюда имеем линейные соотношения:

$$\begin{aligned}
 \frac{\varepsilon_{01} a_1^* + 0,5 (\varepsilon_1' b_1^* + \varepsilon_1'' c_1^*)}{\varepsilon_{02} a_2^* + 0,5 (\varepsilon_2' b_2^* + \varepsilon_2'' c_2^*)} &= \frac{c_1^* \omega^* + (\varepsilon_{01} b_1^* + \varepsilon_1' a_1^*)}{c_2^* \omega^* + (\varepsilon_{02} b_2^* + \varepsilon_2' a_2^*)} = \\
 &= \frac{-b_1^* \omega^* + (\varepsilon_{01} c_1^* + \varepsilon_1'' a_1^*)}{-b_2^* \omega^* + (\varepsilon_{02} c_2^* + \varepsilon_2'' a_2^*)} = \frac{\gamma_{01}}{\gamma_{02}}.
 \end{aligned}$$

4. Параметрическое гармоническое возмущение коэффициентов $\tilde{\gamma}_i$ ($i = 1, 2$).
Получаем:

$$A_1^* = \varepsilon_{01} a_1^* - \gamma_{01} \left\{ \left[a_1^* a_2^* + \frac{1}{2} (b_1^* b_2^* + c_1^* c_2^*) \right] - \frac{1}{2} \gamma_1' (a_1^* b_2^* + b_1^* a_2^*) - \right. \\ \left. - \frac{1}{2} \gamma_1'' (a_1^* c_2^* + c_1^* a_2^*) \right\} = 0;$$

$$A_2^* = \varepsilon_{02} a_2^* - \gamma_{02} \left[a_1^* a_2^* + \frac{1}{2} (b_1^* b_2^* + c_1^* c_2^*) \right] - \frac{1}{2} \gamma_2' (a_1^* b_2^* + b_1^* a_2^*) - \\ - \frac{1}{2} \gamma_2'' (a_1^* c_2^* + c_1^* a_2^*) = 0;$$

$$B_1^* = c_1^* \omega^* - \gamma_{01} (a_1^* b_2^* + b_1^* a_2^*) - \gamma_1' \left[a_1^* a_2^* + \left(\frac{3b_1^* b_2^* + c_1^* c_2^*}{4} \right) \right] - \\ - \frac{1}{4} \gamma_1'' (b_1^* c_2^* + c_1^* b_2^*) = 0;$$

$$B_2^* = c_2^* \omega^* - \gamma_{02} (a_1^* b_2^* + b_1^* a_2^*) - \gamma_2' \left(a_1^* a_2^* + \frac{3b_1^* b_2^* + c_1^* c_2^*}{4} \right) - \\ - \frac{1}{4} \gamma_2'' (b_1^* c_2^* + c_1^* b_2^*) = 0;$$

$$C_1^* = -b_1^* \omega^* - \gamma_{01} (a_1^* c_2^* + c_1^* a_2^*) - \frac{1}{4} \gamma_1' (b_1^* c_2^* + c_1^* b_2^*) - \\ - \gamma_1'' \left(a_1^* a_2^* + \frac{b_1^* b_2^* + 3c_1^* c_2^*}{4} \right) = 0;$$

$$C_2^* = -b_2^* \omega^* - \gamma_{02} (a_1^* c_2^* + c_1^* a_2^*) - \frac{1}{4} \gamma_2' (b_1^* c_2^* + c_1^* b_2^*) - \\ - \gamma_2'' \left(a_1^* a_2^* + \frac{b_1^* b_2^* + 3c_1^* c_2^*}{4} \right) = 0.$$

Отсюда видно, что между a_i , b_i и c_i отсутствуют линейные соотношения.

Замечание 5.1. В случае, когда аддитивные и параметрические гармонические возмущения происходят на кратных частотах, возможны эффекты параметрических резонансов.

Замечание 5.2. В случае, когда функции F_1 и F_2 в (3) нелинейные, проводится гармоническая линеаризация функций $F_1 Y_1$ и $F_2 Y_2$.

5.3. Для квазигармонических возмущений, когда 12-мерный вектор параметров $\pi = (\varepsilon_i', \varepsilon_i'', \gamma_i', \gamma_i'', \alpha_i', \alpha_i'')$ ($i = 1, 2$) случаен и известна его плотность вероятности $f_\pi(\pi)$, плотности вероятности СВ $a_i = a_i(\pi)$, $b_i = b_i(\pi)$ и $c_i = c_i(\pi)$ вычисляются по формулам определения плотности функции случайного

аргумента [4]. При этом в нестационарном режиме используются дифференциальные уравнения (32).

В рамках нелинейной корреляционной теории [4] в силу (31) имеем

$$\begin{aligned} m_i^Y &= M_\pi [a(\pi)] ; \\ D_i^Y(t) &= M_\pi [b_i(\pi) \sin \omega t + c_i(\pi) \cos \omega t]^2 ; \\ K_{12}^Y(t_1, t_2) &= \\ &= M_\pi \{ [b_1(\pi) \sin \omega t_1 + c_1(\pi) \cos \omega t_1] \cdot [b_2(\pi) \sin \omega t_2 + c_2(\pi) \cos \omega t_2] \} . \end{aligned}$$

5.4. Аналогично п. 4.5 изучается случай широкополосных возмущений на основе уравнений:

$$\begin{aligned} \dot{Y}_1 &= \left\{ m_1^\varepsilon + \sum_{j=1}^{N_D} (\varepsilon'_{1j} \sin \omega_j t + \varepsilon''_{1j} \cos \omega_j t) - \right. \\ &\quad \left. - \left[m_1^\gamma + \sum_{j=1}^{N_D} (\gamma_{1j} \sin \omega_j t + \gamma''_{1j} \cos \omega_j t) \right] F_1(Y_1, Y_2) Y_1 \right\} Y_1 + \\ &\quad + m_{01}^\alpha + \sum_{j=1}^{N_D} (\alpha'_{1j} \sin \omega_j t + \alpha''_{1j} \cos \omega_j t) , \quad Y_1(t_0) = Y_{10}, \\ \dot{Y}_2 &= \left\{ m_2^\varepsilon + \sum_{j=1}^{N_D} (\varepsilon'_{2j} \sin \omega_j t + \varepsilon''_{2j} \cos \omega_j t) - \right. \\ &\quad \left. - \left[m_2^\gamma + \sum_{j=1}^{N_D} (\gamma_{2j} \sin \omega_j t + \gamma''_{2j} \cos \omega_j t) \right] F_2(Y_1, Y_2) Y_2 \right\} Y_2 + \\ &\quad + m_{02}^\alpha + \sum_{j=1}^{N_D} (\alpha'_{2j} \sin \omega_j t + \alpha''_{2j} \cos \omega_j t) , \quad Y_2(t_0) = Y_{0}. \end{aligned}$$

Замечание 5.3. Кроме того, возможно применение подходов [1, 2] с последующим решением корреляционных уравнений посредством МКР [3]. Суждение о приемлемости можно сделать путем рассмотрения отношения сигнал/шум.

6 Заключение

На основе МКР разработаны приближенные нелинейные корреляционные методы и алгоритмы аналитического моделирования гармонических, квазигармонических и широкополосных СтП в обобщенных нелинейных вольтерровских

системах в условиях аддитивных и параметрических гармонических, квазигармонических и широкополосных возмущений.

Подробно рассмотрена стохастическая задача В. Вольтерры « R хищников – R жертв» с одним трофическим уровнем. В качестве тестовых примеров рассмотрены задачи аналитического нелинейного корреляционного моделирования одномерных и двумерных нелинейных вольтерровских систем в условиях аддитивных и параметрических гармонических, квазигармонических и широкополосных возмущений.

Изучена устойчивость регулярных и стохастических режимов. Рассмотрены важные частные случаи.

Результаты допускают обобщение на случай дискретных и непрерывно-дискретных конечномерных, а также эрдитарных вольтерровских систем.

Разработанные методы аналитического моделирования могут быть положены в основу соответствующих стохастических информационных технологий анализа и моделирования ВСтС на основе априорных данных о моделях. В случае, если доступна в реальном масштабе соответствующая информация, целесообразно развитие фильтрационных подходов [3–5].

Литература

1. Синицын И. Н., Синицын В. И. Аналитическое моделирование нормальных процессов в вольтерровских стохастических системах // Системы и средства информатики, 2018. Т. 28. № 2. С. 4–19.
2. Синицын И. Н., Синицын В. И. Аналитическое моделирование распределений с инвариантной мерой в вольтерровских стохастических системах // Системы и средства информатики, 2018. Т. 28. № 3. С. 4–25.
3. Синицын И. Н. Канонические представления случайных функций и их применение в задачах компьютерной поддержки научных исследований. — М.: ТОРУС ПРЕСС, 2009. 768 с.
4. Пугачёв В. С., Синицын И. Н. Теория стохастических систем. — М.: Логос, 2000; 2004. 1000 с.
5. Синицын И. Н., Синицын В. И. Лекции по нормальной и эллипсоидальной аппроксимации в стохастических системах. — М.: ТОРУС ПРЕСС, 2013. 488 с.
6. Воронов А. А. Основы автоматического управления. Часть II. Специальные линейные и нелинейные системы автоматического регулирования одной величины. — М.–Л.: Энергия, 1966. 364 с.
7. Вольтерра В. Математическая теория борьбы за существование. — М.: Наука, 1976. 286 с.
8. Свирижев Ю. М. Нелинейные волны, диссипативные структуры и катастрофы в экологии. — М.: Наука, 1987. 368 с.

Поступила в редакцию 11.07.18

**ANALYTICAL MODELING OF PROCESSES
IN VOLTERRA STOCHASTIC SYSTEMS
BY THE CANONICAL EXPANSIONS METHOD**

I. N. Sinitsyn and V. I. Sinitsyn

Institute of Informatics Problems, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119133, Russian Federation

Abstract: On the basis of the stochastic canonical expansions (StCE) theory, approximate nonlinear correlational methods and algorithms for analytical modeling of additive and parametric harmonic, quasi-harmonic, and wideband noises in generalized Volterra stochastic systems (VStS) are developed. The elements of StCE are given. The stochastic Volterra problem “Preys and Victims” with one trophical level is investigated in detail. Special attention is paid to test examples for one- and two-dimensional VStS with additive and parametric harmonic, quasi-harmonic, and wideband noises.

Keywords: analytical modeling; harmonic, quasi-harmonic, and wideband noises; method of stochastic canonical expansions (StCE); method of normal approximation (MNA); method of slow-changing amplitudes (MSCA); method of statistical linearization (MSL); Volterra stochastic systems (VStS)

DOI: 10.14357/08696527190110

Acknowledgments

The work was supported by the Russian Academy of Sciences (project 0063-2018-0008).

References

1. Sinitsyn, I. N., and V. I. Sinitsyn. 2018. Analiticheskoe modelirovanie normal'nykh protsessov v vol'terrovskikh stokhasticheskikh sistemakh [Analytical modeling of normal processes in Volterra stochastic systems]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 28(2):4–19.
2. Sinitsyn, I. N., and V. I. Sinitsyn. 2018. Analiticheskoe modelirovanie raspredeleniy s invariantnoy meroy v vol'terrovskikh stokhasticheskikh sistemakh [Analytical modeling of distributions with invariant measure in Volterra stochastic systems]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 28(3):4–25.
3. Sinitsyn, I. N. 2009. *Kanonicheskie predstavleniya sluchaynykh funktsiy i ikh primeneniye v zadachakh komp'yuternoy podderzhki nauchnykh issledovaniy* [Canonical expansions of random functions and their applications in computer aided support]. Moscow: TORUS PRESS. 768 p.

4. Pugachev, V. S., and I. N. Sinitsyn. 2001. *Stochastic systems. Theory and applications*. Singapore: World Scientific. 908 p.
5. Sinitsyn, I. N., and V. I. Sinitsyn. 2013. *Lektsii po normal'noy i ellipsoidal'noy approksimatsii v stokhasticheskikh sistemakh* [Lectures on normal and ellipsoidal approximations for stochastic systems]. Moscow: TORUS PRESS. 488 p.
6. Voronov, A. A. 1966. *Osnovy avtomaticheskogo upravleniya. Chast' II. Spetsial'nye lineynye i nelineynye sistemy avtomaticheskogo regulirovaniya odnoy velichiny* [Foundations of automatic control. Part II. Special linear and nonlinear automatic control systems]. Moscow–Leningrad: Energiya. 364 p.
7. Vol'terra, V. 1976. *Matematicheskaya teoriya bor'by za sushchestvovanie* [Mathematical theory of survival]. Moscow: Nauka. 286 p.
8. Svirezhev, Yu. M. 1987. *Nelineynye volny, dissipativnye struktury i katastrofy v ekologii* [Nonlinear waves, dissipative structures, and catastrophes in ecology]. Moscow: Nauka. 368 p.

Received July 11, 2018

Contributors

Sinitsyn Igor N. (b. 1940) — Doctor of Science in technology, professor, Honored scientist of RF, principal scientist, Institute of Informatics Problems, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation; sinitsin@dol.ru

Sinitsyn Vladimir I. (b. 1968) — Doctor of Science in physics and mathematics, associate professor, principal scientist, Institute of Informatics Problems, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation; VSinitsyn@ipiran.ru

АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ ПРОБЛЕМЫ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ В ДИНАМИЧЕСКОЙ ОДНОСЕКТОРНОЙ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ С ДИСКРЕТНЫМ ВРЕМЕНЕМ НА ОСНОВЕ МЕТОДА ДИНАМИЧЕСКОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ

П. В. Шнурков¹, А. О. Рудак²

Аннотация: Исследуется новая постановка задачи оптимального управления в динамической односекторной экономической модели с дискретным временем. В поставленной задаче состояниями выступают значения удельного капитала. Роль управления играет параметр, представляющий собой долю удельного произведенного продукта, направляемую на инвестирование. Исследование проводится на основе метода динамического программирования. Получены уравнения Беллмана для поставленной задачи. Доказана оптимальность управлений, удовлетворяющих уравнениям Беллмана. Создан и подробно описан алгоритм, позволяющий численно решить функциональные уравнения Беллмана и найти последовательность оптимальных решений для поставленной задачи.

Ключевые слова: динамическое программирование; задача оптимального управления; дискретное время; уравнения Беллмана; односекторная модель экономической системы

DOI: 10.14357/08696527190111

1 Введение

Метод динамического программирования, разработанный Р. Беллманом [1], является одним из наиболее известных и универсальных методов решения задач оптимального управления. Этот метод неоднократно применялся и для исследования динамических моделей экономики. В частности, самим Р. Беллманом были предложены решения таких классических проблем математической экономики, как задача об оптимальном распределении ресурсов [2, с. 67] и транспортная задача [2, с. 105–106]. С точки зрения теории управления эти проблемы могут рассматриваться как задачи с дискретным временем. Таким образом, применение метода динамического программирования к решению задач управления в экономических моделях с дискретным временем имеет длительную историю.

¹Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», pshnurkov@hse.ru

²Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», rudakanya@gmail.com

Настоящая работа посвящена исследованию динамической односекторной модели экономической системы с дискретным временем. Общее описание такой системы приведено в нескольких классических изданиях по математической экономике [3, 4]. В книге [4], которая будет использоваться в качестве основного источника, главное место отведено описанию и исследованию соответствующей модели с непрерывным временем. Модель с дискретным временем упоминается лишь в подстрочных примечаниях. В частности, в примечании на с. 422 приведено динамическое соотношение (аналог дифференциального уравнения), описывающее изменение удельного капитала. В примечании на с. 429 приведен общий вид целевого показателя, характеризующего накопленное удельное потребление. Формальной постановки задачи и ее исследования в этой работе не приводится.

Отметим также, что и в других фундаментальных изданиях по теории управления в экономике [5, 6] задача управления в односекторной модели динамической модели с дискретным временем не рассматривается.

В настоящей работе рассматривается новая постановка задачи управления в указанной динамической экономической модели. Целевой функционал (показатель эффективности управления) содержит две составляющих, первая из которых характеризует накопленное удельное потребление, а вторая зависит от значения удельного капитала в конечный момент времени и характеризует достигнутый уровень технологического уклада. Получено уравнение Беллмана для поставленной задачи управления. Разработан алгоритм исследования этого уравнения и численного определения оптимальной стратегии управления, т. е. последовательности оптимальных решений в каждый момент времени.

2 Описание модели и задание основных характеристик

Будем рассматривать односекторную экономическую систему, в которой произведенный продукт делится на две части: инвестиции и потребление. Приведем краткое описание соответствующей математической модели, следуя уже упомянутым изданиям [3, 4].

Предположим, что параметр времени в рассматриваемой системе дискретен и принимает конечное число значений. Будем обозначать этот параметр через i , $i \in \{0, 1, \dots, N\}$, где $N < \infty$.

Введем основные характеристики модели. Обозначим через $k_i = K_i/L_i$ удельный капитал, или фондовооруженность, в момент времени i , где K_i — объем основных фондов (капитал) в момент i ; L_i — объем трудовых ресурсов в момент i . Обозначим через $c_i = C_i/L_i$ удельное потребление в момент времени i , где C_i — общий объем потребления в момент i , т. е. объем произведенного продукта, используемого для непосредственного удовлетворения потребностей всех участвующих в производстве. В классической односекторной модели предполагается, что удельный объем произведенного продукта y_i , или производительность труда, задается формулой $y_i = f(k_i)$, где $f(\cdot)$ — заданная

функция. В дальнейшем предполагается, что удельный капитал k_i играет роль состояния рассматриваемой системы в момент времени i , $i = 0, 1, \dots, N$.

Известно [4], что динамическое соотношение, описывающее изменение состояния системы с дискретным временем, имеет следующий вид:

$$k_{i+1} = \varphi_i(k_i, c_i) = (1 - \lambda_i) k_i + f(k_i) - c_i, \quad i = 0, 1, \dots, N - 1, \quad (1)$$

где λ_i — коэффициент выбывания удельных фондов (заданная величина для всех i). Величина λ_i характеризует физический износ или моральное устаревание основных фондов, т. е. средств производства. Смысл соотношения (1) можно пояснить следующим образом: состояние системы (удельный капитал) в момент $i + 1$ определяется как сумма удельного капитала в момент i с учетом выбывания фондов и удельных инвестиций в производство в тот же момент времени, которые составляют величину $y_i - c_i = f(k_i) - c_i$, $i = 0, 1, \dots, N - 1$.

В работе [4] предполагается, что показатель эффективности системы или целевой функционал в рассматриваемой задаче управления с дискретным временем имеет вид:

$$I = \sum_{i=0}^{N-1} \left(\frac{1}{1 + \gamma} \right)^i V(c_i).$$

Поясним экономическое содержание целевого функционала I . Этот показатель выражает накопленный объем потребления в данной системе. В свою очередь, в выражении для накопленного показателя потребления величина $V(c_i)$ определяет некоторую характеристику качества потребления, которое в любой момент i зависит от удельного потребления c_i . При этом функция $V(\cdot)$ называется функцией полезности и предполагается заданной. Обычно предполагается, что $V(c_i)$ — монотонно возрастающая выпуклая вверх функция. Множитель $1/(1 + \gamma)$ отражает влияние инфляции за единицу времени (падение содержания потребительских благ в денежной единице).

3 Математическая постановка задачи

Сформулируем новую постановку задачи оптимального управления в рассматриваемой односекторной экономической модели.

Обозначим через $\rho_i = (f(k_i) - c_i)/f(k_i)$ долю удельного произведенного продукта, направляемую на инвестирование, в общем объеме удельного произведенного продукта. При этом $1 - \rho_i = c_i/f(k_i)$ есть доля произведенного продукта, направляемая на потребление.

Из определения ρ_i следует, что данный параметр может принимать значения в области $U = [0, 1]$. Таким образом, соотношение $\rho_i \in U = [0, 1]$ представляет собой ограничения на значения параметра ρ_i , $i = 0, 1, \dots, N - 1$.

Будем предполагать, что в рассматриваемой задаче состояниями являются значения удельного капитала $\bar{k} = (k_0, k_1, \dots, k_{N-1}, k_N)$, а управлениями —

значения $\bar{\rho} = (\rho_0, \rho_1, \dots, \rho_{N-1})$. Рассмотрим в качестве основной задачи оптимального управления следующую экстремальную задачу с ограничениями:

$$I(\bar{k}, \bar{\rho}) = \sum_{i=0}^{N-1} \left(\frac{1}{1+\gamma} \right)^i V((1-\rho_i)f(k_i)) + \psi(k_N) \rightarrow \max; \quad (2)$$

$$k_{i+1} = \varphi_i(k_i, \rho_i) = (1-\lambda_i)k_i + \rho_i f(k_i), \quad i = 0, 1, \dots, N-1; \quad (3)$$

$$k_0 = a_0; \quad (4)$$

$$\rho_i \in U = [0, 1], \quad i = 0, 1, \dots, N-1. \quad (5)$$

Дадим некоторые пояснения к поставленной задаче. В выражении для целевого функционала (2) первое слагаемое, как уже отмечалось, выражает накопленное удельное потребление. Второе слагаемое представляет собой вклад в целевой показатель значения удельного капитала в конечный момент времени. Функция $\psi(k_N)$ предполагается заданной. В теории управления такие функции, зависящие от состояния системы в конечный момент времени N , называются терминальными. Соотношение (3) описывает изменение состояния под воздействием управления. Такое соотношение аналогично дифференциальному уравнению в задаче с непрерывным временем. Условие (4) означает, что начальное состояние в момент $i = 0$ фиксировано, а a_0 — заданная величина (закрепленный левый конец траектории). Соотношение (5) определяет ограничение на управления (принимаемые решения).

Введем функции Беллмана для поставленной задачи оптимального управления. Для любого фиксированного $j = 1, 2, \dots, N-1$ функция Беллмана $F_j(x)$ определяется соотношением:

$$F_j(x) = \max \left[\sum_{i=j}^{N-1} \left(\frac{1}{1+\gamma} \right)^i V((1-\rho_i)f(k_i)) + \psi(k_N) \left| k_{i+1} = \varphi_i(k_i, \rho_i), \right. \right. \\ \left. \left. i = j, j+1, \dots, N-1; \quad k_j = x; \quad \rho_i \in U = [0, 1], \quad i = j, j+1, \dots, N-1 \right. \right]. \quad (6)$$

Заметим, что функция Беллмана $F_j(x)$ определяется для некоторой вспомогательной задачи управления с номером j , которая по структуре аналогична основной задаче управления (2)–(5). Вспомогательная задача с номером j определяется на интервале времени $[j, j+1, \dots, N-1, N]$. Целевой функционал в этой задаче имеет вид:

$$I_j((k_j, k_{j+1}, \dots, k_{N-1}, k_N), (\rho_j, \rho_{j+1}, \dots, \rho_{N-1})) = \\ = \sum_{i=j}^{N-1} \left(\frac{1}{1+\gamma} \right)^i V((1-\rho_i)f(k_i)) + \psi(k_N).$$

Ограничения во вспомогательной задаче с номером j определяются соотношениями, аналогичными (3)–(5), на соответствующем интервале времени. Начальное условие задается равенством $k_j = x$, где x — произвольное допустимое значение состояния.

Максимум в соотношении (6) определяется как максимум целевого функционала $I_j((k_j, k_{j+1}, \dots, k_{N-1}, k_N), (\rho_j, \rho_{j+1}, \dots, \rho_{N-1}))$ во вспомогательной задаче с номером j на множестве допустимых значений наборов $(k_j = x, k_{j+1}, \dots, k_{N-1}, k_N), (\rho_j, \rho_{j+1}, \dots, \rho_{N-1})$, удовлетворяющих ограничениям этой задачи. Таким образом, по своему теоретическому содержанию функция Беллмана $F_j(x)$ представляет собой значение целевого функционала на оптимальном наборе состояний и управлений. Заметим дополнительно, что при $j = 0$ вспомогательная задача совпадает с основной задачей управления (2)–(5), где $x = a_0$, а функция Беллмана $F_j(a_0)$ совпадает со значением целевого функционала $I(\bar{k}, \bar{\rho})$, соответствующим управляемому процессу $\bar{k}^* = \{k_0^*, k_1^*, \dots, k_{N-1}^*, k_N^*\}$, $\bar{\rho}^* = \{\rho_0^*, \rho_1^*, \dots, \rho_{N-1}^*\}$, который является оптимальным в исходной задаче (2)–(5).

В теории динамического программирования центральное место занимают функциональные уравнения, называемые уравнениями Беллмана. Такие уравнения известны для общей задачи управления с дискретным временем и закрепленным левым концом траектории, которая была исследована в классической монографии [7, § 6.4]. Поставленная задача (2)–(5) представляет собой специальный вариант задачи управления с дискретным временем. Таким образом, уравнения Беллмана для рассматриваемой задачи непосредственно выводятся из общих уравнений, полученных в [7, § 6.4]. Сформулируем этот результат в виде отдельного утверждения.

Утверждение 1. *Функции Беллмана в рассматриваемой задаче (2)–(5) удовлетворяют следующей системе функциональных соотношений (уравнениям Беллмана):*

$$\left. \begin{aligned} F_j(k_j) &= \\ &= \max_{\rho_j \in U} \left[\left(\frac{1}{1 + \gamma} \right)^i V((1 - \rho_j) f(k_j)) + F_{j+1}((1 - \lambda_j) k_j + \rho_j f(k_j)) \right], \\ & \qquad \qquad \qquad j = 0, 1, \dots, N - 1; \\ F_N(k_N) &= \psi(k_N). \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

4 Численный алгоритм решения уравнения Беллмана

Нахождение оптимальной стратегии управления в поставленной задаче (2)–(5) связано с необходимостью решения уравнений Беллмана (7) и может быть осуществлено только численным методом. Численные алгоритмы решения уравнений

Беллмана для различных задач управления разрабатывались самим автором метода, начиная с его первых оригинальных работ [1, 2]. Построим численный алгоритм для решения уравнений (7), следуя идеям Беллмана, реализованным им при решении задач управления в экономических системах [2].

Алгоритм включает два основных этапа:

- (1) анализ дискретных аналогов уравнений Беллмана, подготовка вспомогательных массивов данных;
- (2) формирование оптимальной стратегии решений $\bar{\rho}^* = \{\rho_0^*, \rho_1^*, \dots, \rho_{N-1}^*\}$ с использованием вспомогательных массивов.

Для описания численного алгоритма решения уравнений Беллмана проведем дискретизацию модели. При этом состояния и решения будут принимать значения в заданных конечных множествах.

Пусть U — множество возможных значений параметра управления ρ ; A — множество возможных значений параметра состояния k .

Дискретные аналоги указанных множеств имеют вид:

$$A = [0, a, 2a, \dots, la, \dots, ma], \quad a > 0 \text{ — заданное число;}$$

$$U = [0, \Delta, 2\Delta, \dots, s\Delta, \dots, r\Delta = 1], \quad \Delta > 0 \text{ — заданное число.}$$

Множество A определяется в каждой конкретной задаче исходя из того, какие значения может принимать состояние системы k_i при всех допустимых значениях параметра управления $\rho_i, i = 0, 1, \dots, N - 1$.

Параметры a и Δ выбираются в каждой конкретной задаче исходя из требований к точности решения.

Выпишем дискретный аналог уравнения Беллмана с произвольным номером i . Состояния и управления в этих уравнениях принимают только конечное число значений:

$$F_i(l_i a) = \left. \begin{aligned} &= \max_{0 \leq s_i \leq r} \left[\left(\frac{1}{1 + \gamma} \right)^i V \left((1 - s_i \Delta) f(l_i a) + F_{i+1} \left((1 - \lambda_i) l_i a + s_i \Delta f(l_i a) \right) \right) \right], \\ & \quad l_i = 0, 1, \dots, m, \quad i = N - 1, N - 2, \dots, 0; \end{aligned} \right\} (8)$$

$$F_N(l_N a) = \psi(l_N a), \quad l_N = 0, 1, \dots, m.$$

Первый этап алгоритма. Предварительный анализ, подготовка необходимых массивов данных.

1. Вычисляем функцию $F_N(l_N a)$ в каждой точке $l_N a, l_N = 0, 1, \dots, m$:

$$F_N(l_N a) = \psi(l_N a). \quad (9)$$

Получаем значения функции $F_N(l_N a)$ во всех точках множества A .

2. Рассматриваем произвольное i , где $0 \leq i \leq N - 1$. Заметим, что непосредственно после вычисления $F_N(l_N a)$ рассматривается значение $i = N - 1$. Однако все последующие действия будем описывать для произвольного фиксированного i .
 - 2.1. Фиксируем аргумент соответствующей функции Беллмана $k_i = l_i a$.
 - 2.2. Для заданного $k_i = l_i a$ находим максимум правой части первого равенства (8) по параметру s_i . Иными словами, необходимо найти следующую величину:

$$\max_{0 \leq s_i \leq r} \left[\left(\frac{1}{1 + \gamma} \right)^i V((1 - s_i \Delta) f(l_i a)) + F_{i+1}((1 - \lambda_i) l_i a + s_i \Delta f(l_i a)) \right]. \quad (10)$$

Функции $V(\cdot)$ и $f(\cdot)$ предполагаются заданными аналитически, их значения могут быть вычислены при любых значениях аргументов. Функция Беллмана $F_{i+1}(\cdot)$ должна быть вычислена при всех возможных значениях аргумента в предшествующем цикле по параметру i . В частности, при $i = N - 1$ будут использоваться значения функции $F_N(l_N a)$, $l_N = 0, 1, \dots, m$, определяемые равенством (9). Таким образом, выражение под знаком максимума (10) численно определимо. Обозначим через $s_i^* = s_i^*(l_i)$ значение, при котором достигается максимум в соотношении (10).

- 2.3. Полагаем, что функция Беллмана $F_i(k_i)$ в точке $k_i = l_i a$ определяется равенством

$$F_i(l_i a) = \left[\left(\frac{1}{1 + \gamma} \right)^i V((1 - s_i^* \Delta) f(l_i a)) + F_{i+1}((1 - \lambda_i) l_i a + s_i^* \Delta f(l_i a)) \right]. \quad (11)$$

- 2.4. Переходим к следующему значению аргумента $(l_i + 1)a$ для того же номера i и повторяем действия, описанные в пп. 2.2–2.3.

В результате описанных действий получаем для каждого фиксированного i следующие числовые параметры: $l_i a$ — текущее значение состояния; $s_i^* \Delta = s_i^*(l_i) \Delta$ — возможное значение управления, соответствующее состоянию $l_i a$; $F_i(l_i a)$ — значение функции Беллмана в точке $l_i a$. При своем изменении параметр l_i может принимать значения $l_i = 0, 1, \dots, m$. Следовательно, фактически для фиксированного i определяются три числовых массива:

$$l_i a, \quad l_i = 0, 1, \dots, m;$$

$$s_i^*(l_i) \Delta, \quad l_i = 0, 1, \dots, m;$$

$$F_i(l_i a), \quad l_i = 0, 1, \dots, m.$$

Заметим, что массив $l_i a$, $l_i = 0, 1, \dots, m$, не зависит от номера i и совпадает с множеством возможных значений параметра состояния A . Таким образом, для каждого i перебираются все возможные значения параметра состояний.

3. Переходим к следующему значению параметра i . Если действия, описанные в п. 2 первого этапа (2.1–2.4), осуществлялись для некоторого фиксированного i , то на следующем шаге будет рассматриваться значение $i - 1$. Для этого значения проводятся действия, аналогичные тем, которые были описаны в пп. 2.1–2.4. При вычислениях по формулам, аналогичным (10) и (11), используются значения функции Беллмана $F_i(l_i a)$, $l_i = 0, 1, \dots, m$. В результате вычисляются массивы данных:

$$s_{i-1}^*(l_{i-1}) \Delta, \quad l_{i-1} = 0, 1, \dots, m;$$

$$F_{i-1}(l_{i-1} a), \quad l_{i-1} = 0, 1, \dots, m.$$

Характеризуя первый этап в целом, можно описать его структуру в виде трех вложенных циклов.

Первый цикл (внешний). Осуществляется перебором параметра i от N до 0 с шагом 1.

Второй цикл, вложенный в первый. Для каждого фиксированного i осуществляется перебор множества $l_i a$, $l_i = 0, 1, \dots, m$, т. е. множества всех возможных значений параметра состояний.

Третий цикл, вложенный во второй. Для каждого фиксированного i и соответствующего состояния $l_i a$ осуществляется перебор всех возможных значений параметра управления $s_i(l_i) \Delta$, $s_i(l_i) = 0, 1, \dots, r$. Вычисление необходимых параметров $s_i^*(l_i) \Delta$, $F_i(l_i a)$ проводится с использованием соотношений (10) и (11).

В итоге соответствующие массивы возможных значений управлений и значений функции Беллмана для всех возможных состояний определяются при всех $i = N, N - 1, \dots, 1, 0$. Полученные данные используются в ходе реализации второго этапа численного алгоритма.

Второй этап алгоритма. Формирование последовательности оптимальных решений с использованием вспомогательных массивов.

1. Фиксируем начальное состояние $k_0^* = a_0 = l_0^* a$. Параметр a_0 задается в постановке исходной задачи.

2. Из табличных значений массива $s_0^*(l_0)\Delta$, $l_0 = 0, 1, \dots, m$, выбираем значение, соответствующее конкретному состоянию $k_0^* = l_0^*a$. Получаем

$$s_0^* = s_0^*(l_0^*), \quad \rho_0^* = s_0^*\Delta.$$

3. Вычисляем состояние в момент $i = 1$, используя динамическое соотношение (3) исходной задачи. В соответствии с этим соотношением при $i = 0$ получаем

$$k_1^* = (1 - \lambda_0)k_0^* + \rho_0^*f(k_0^*). \quad (12)$$

С учетом дискретизаций состояний и управлений $k_1^* = l_1^*a$, $k_0^* = l_0^*a$, $\rho_0^* = s_0^*\Delta$ соотношение (12) принимает вид:

$$l_1^*a = (1 - \lambda_0)l_0^*a + s_0^*\Delta f(l_0^*a).$$

Таким образом, определяется значение состояния $k_1^* = l_1^*a$.

4. Используя таблицу значений массива $s_1^*(l_1)\Delta$, $l_1 = 0, 1, \dots, m$, определяем управление в момент времени $i = 1$, т.е. элемент указанного массива, соответствующий состоянию $k_1^* = l_1^*a$, $s_1^* = s_1^*(l_1^*)$, $\rho_1^* = s_1^*\Delta$.
5. Рассмотрим произвольное значение i . Значения состояний k_i^* , k_{i+1}^* и управления ρ_i^* связаны динамическим соотношением (3):

$$k_{i+1}^* = (1 - \lambda_i)k_i^* + \rho_i^*f(k_i^*), \quad (13)$$

которое в дискретном варианте $k_i^* = l_i^*a$, $k_{i+1}^* = l_{i+1}^*a$, $\rho_i^* = s_i^*\Delta$ принимает вид:

$$l_{i+1}^*a = (1 - \lambda_i)l_i^*a + s_i^*\Delta f(l_i^*a).$$

Таким образом, исходя из значений k_i^* и ρ_i^* получаем k_{i+1}^* . Далее определяется элемент массива $s_{i+1}^*(l_{i+1}^*)\Delta$, соответствующий состоянию $k_{i+1}^* = l_{i+1}^*a$. Для этого выбирается $l_{i+1}^* = l_{i+1}^*$. Тогда $s_{i+1}^* = s_{i+1}^*(l_{i+1}^*)$, $\rho_{i+1}^* = s_{i+1}^*\Delta$. Продолжая аналогичные действия, получаем последовательность пар состояний и управлений $(k_0^*, \rho_0^*), (k_1^*, \rho_1^*), \dots, (k_{N-1}^*, \rho_{N-1}^*)$. На заключительном шаге определяем k_N^* из соотношения

$$k_N^* = (1 - \lambda_{N-1})k_{N-1}^* + \rho_{N-1}^*f(k_{N-1}^*), \quad (14)$$

которое в дискретном варианте принимает вид:

$$l_N^*a = (1 - \lambda_{N-1})l_{N-1}^*a + s_{N-1}^*\Delta f(l_{N-1}^*a).$$

В результате второго этапа действия алгоритма получаем последовательность состояний $\bar{k}^* = \{k_0^*, k_1^*, \dots, k_{N-1}^*, k_N^*\}$ и последовательность управлений $\bar{\rho}^* = \{\rho_0^*, \rho_1^*, \dots, \rho_{N-1}^*\}$. Установим теоретическое содержание этих объектов по отношению к поставленной задаче.

Утверждение 2. *Последовательности состояний $\bar{k}^* = \{k_0^*, k_1^*, \dots, k_{N-1}^*, k_N^*\}$ и управлений $\bar{\rho}^* = \{\rho_0^*, \rho_1^*, \dots, \rho_{N-1}^*\}$ в совокупности образуют оптимальный управляемый процесс в поставленной задаче (2)–(5).*

Доказательство. Отметим, прежде всего, что полученные последовательности $\bar{k}^* = \{k_0^*, k_1^*, \dots, k_{N-1}^*, k_N^*\}$ и $\bar{\rho}^* = \{\rho_0^*, \rho_1^*, \dots, \rho_{N-1}^*\}$ образуют управляемый процесс, допустимый в исходной задаче оптимального управления (2)–(5). Действительно, из (12)–(14) следует, что процесс $(\bar{k}^*, \bar{\rho}^*)$ удовлетворяет динамическому соотношению (3). Граничное условие $k_0 = a_0$ было зафиксировано в начале второго этапа. Выполнение ограничений на управления $\rho_i^* \in U = [0, 1]$, $i = 0, 1, \dots, N - 1$, следует из способа выбора параметра s_i : $s_i \Delta \in U = \{0, \Delta, \dots, r\Delta = 1\}$, $i = 0, 1, \dots, N - 1$.

Заметим также, что построенный управляемый процесс $(\bar{k}^*, \bar{\rho}^*)$ удовлетворяет системе соотношений (8), т. е. уравнениям Беллмана в дискретной форме. В то же время уравнения Беллмана в дискретной форме (8) являются реализацией общего уравнения Беллмана (7) для дискретных множеств значений состояний и управлений. Известно [7, с. 297–298], что если в задаче с дискретным временем управляемый процесс допустим, т. е. удовлетворяет всем ограничениям, а также удовлетворяет уравнениям Беллмана, то он является оптимальным. Следовательно, управляемый процесс $(\bar{k}^*, \bar{\rho}^*)$ оптимален в поставленной задаче управления (2)–(5). Утверждение 2 доказано. Из доказанного утверждения следует, что набор решений $\bar{\rho}^* = \{\rho_0^*, \rho_1^*, \dots, \rho_{N-1}^*\}$ представляет собой оптимальные решения при выборе инвестиций в рассматриваемой экономической модели.

5 Заключение

Задача оптимального управления с дискретным временем (2)–(5), исследованная в данной работе, является новой постановкой задачи управления в классической динамической односекторной модели экономической системы. Для этой задачи получено решение на основе метода динамического программирования. Итогом исследования стал численный алгоритм, позволяющий определять последовательность оптимальных решений.

Литература

1. Беллман Р. Динамическое программирование / Пер. с англ. — М.: Иностранная литература, 1960. 400 с. (Bellman R. Dynamic programming. — Princeton, NJ, USA: Princeton University Press, 1957. 339 p.)

2. Беллман Р., Дрейфус С. Прикладные задачи динамического программирования / Пер. с англ. — М.: Наука, 1965. 459 с. (*Bellman R., Dreyfus S. Applied dynamic programming.* — London: Oxford University Press, 1962. 363 p.)
3. Ашманов С. А. Математические модели и методы в экономике. — М.: Изд-во Московского ун-та, 1980. 199 с.
4. Интрилигатор М. Математические методы оптимизации и экономическая теория / Пер. с англ. — М.: Айрис-Пресс, 2002. 553 с. (*Intriligator M. Mathematical methods of optimization and economic theory.* — Philadelphia, PA, USA: SIAM, 2002. 508 p.)
5. Kamien M., Schwartz N. Dynamic optimization. — New York, NY, USA: Elsevier North Holland, 1981. 331 p.
6. Barro R., Sala-i-Martin X. Economic growth. — 2nd ed. — London: The MIT Press, 2004. 654 p.
7. Иоффе А. Д., Тухомиров В. М. Теория экстремальных задач. — М.: Наука, 1974. 480 с.

Поступила в редакцию 15.02.19

ALGORITHMIC SOLUTION OF THE PROBLEM OF OPTIMAL CONTROL IN A DYNAMIC ONE-SECTOR ECONOMIC MODEL WITH DISCRETE TIME BASED ON THE DYNAMIC PROGRAMMING METHOD

P. V. Shnurkov and A. O. Rudak

National Research University Higher School of Economics, 34 Tallinskaya Str., Moscow 123458, Russian Federation

Abstract: The paper studies a new formulation of the optimal control problem in a dynamic one-sector economic model with discrete time. In the task, the states are the values of the specific capital. The control parameter is the proportion of the specific product produced, directed for investment. The study is based on the dynamic programming method. The Bellman equations for the problem are obtained. The optimality of controls satisfying the Bellman equations is proved. An algorithm was created and described in detail that allows one to solve the Bellman functional equations numerically and to find the optimal control strategy for the problem posed.

Keywords: dynamic programming; optimal control problem; discrete time; Bellman equations; one-sector model of an economic system

DOI: 10.14357/08696527190111

References

1. Bellman, R. 1972. *Dynamic programming*. 6th ed. Princeton, NJ: Princeton University Press. 402 p.

2. Bellman, R., and S. Dreyfus. 1962. *Applied dynamic programming*. London: Oxford University Press. 363 p.
3. Ashmanov, S. A. 1980. *Matematicheskie modeli i metody v ekonomike* [Mathematical models and methods in economics]. Moscow: Moscow University Press. 199 p.
4. Intriligator, M. 2002. *Mathematical methods of optimization and economic theory*. Philadelphia, PA: SIAM. 508 p.
5. Kamien, M., and N. Schwartz. 1981. *Dynamic optimization*. New York, NY: Elsevier North Holland. 331 p.
6. Barro, R., and X. Sala-i-Martin. 2004. *Economic growth*. 2nd ed. London: The MIT Press. 654 p.
7. Ioffe, A. D., and V. M. Tikhomirov. 1974. *Teoriya ekstremal'nykh zadach* [Extremal problems theory]. Moscow: Nauka. 480 p.

Received February 15, 2019

Contributors

Shnurkov Peter V. (b. 1953) — Candidate of Science (PhD) in physics and mathematics, associate professor, National Research University Higher School of Economics, 34 Tallinskaya Str., Moscow 123458, Russian Federation; pshnurkov@hse.ru

Rudak Anna O. (b. 1996) — Master student, National Research University Higher School of Economics, 34 Tallinskaya Str., Moscow 123458, Russian Federation; rudakanya@gmail.com

УСЛОВНЫЕ ГРАНИЦЫ СРЕДНИХ МАКСИМУМОВ СЛУЧАЙНЫХ ВЕЛИЧИН И ИХ ДОСТИЖИМОСТЬ

*Д. В. Иванов*¹

Аннотация: Предметом интереса настоящей статьи являются средние максимумы из некоторого числа n случайных величин. Рассматривается ситуация, когда величины стандартизованы (имеют нулевое математическое ожидание и единичную дисперсию), независимы и одинаково распределены, а также известно значение среднего максимума из m независимых случайных величин с тем же распределением. Исследуется вопрос достижимости при указанных условиях границ средних максимумов, полученных в работах других авторов. В случаях, когда этот вопрос остается открытым, проведено уточнение границ. Задача может иметь приложения в теории массового обслуживания, страховании, финансах и других областях.

Ключевые слова: средний максимум; достижимость

DOI: 10.14357/08696527190112

1 Введение

В теории вероятностей и ее приложениях используются различные числовые характеристики случайных величин. К ним можно отнести и средние максимумы. Для случайной величины X положим

$$\mu_n(X) = \mathbf{E} \max \{X_1, \dots, X_n\},$$

где X_1, \dots, X_n — независимые случайные копии X (например, статистическая выборка из генеральной совокупности с соответствующим распределением).

Замечание 1. В дальнейшем будем использовать более компактное обозначение μ_n , в котором не отражена зависимость от X_1, \dots, X_n , до тех пор пока такое сокращение допустимо в рамках текущего контекста и не вызывает путаницы.

Словосочетание «средний максимум» не является широко употребительным в российской вероятностно-статистической литературе, однако является вполне традиционным, например, в климатологии [1] при описании изменчивости метеорологических величин. В частности, берут максимумы и минимумы температуры (за день, месяц, год) и затем усредняют (по дням за месяц, по годам за весь период наблюдений). Таким образом получают средние максимумы и минимумы температур. Хотя, конечно, в этих случаях нельзя сказать, что случайные величины независимы и одинаково распределены, ситуация более сложная. Средние

¹Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, механико-математический факультет, кафедра теории вероятностей, ashtynbamba@gmail.com

максимумы и минимумы наряду с другими показателями характеризуют климат в данной местности, что может быть важно для сельского хозяйства и др.

В англоязычной вероятностной литературе употребляются как словосочетания «expected maximum» [2–4] или «expected maximum value», так и другие синонимы.

Важной областью приложения введенной величины является финансовая математика. Для оценки финансовых рисков существует целый ряд различных мер (VaR (value of risk), CVaR (conditional VaR), WVaR (worst-case VaR) и др.). Особый интерес представляют меры, обладающие свойствами монотонности, субаддитивности, положительной однородности и инвариантности относительно сдвига — *когерентные* меры риска. Пример когерентной меры риска — мера

$$\text{MINVaR}_n(X) = -\mathbf{E} \min \{X_1, \dots, X_n\},$$

которая изучалась в [5–7]. Понятно, что $\text{MINVaR}_n(X) = \mu_n(-X)$. На практике можно исследовать колебания цен акций подобно температуре, беря, например, максимумы ежедневных падений цен (отрицательных логарифмических приращений) за неделю и усредняя по неделям и т. п.

Средние максимумы можно встретить не только в финансовой, но и в актуарной математике. В последние десятилетия особый интерес вызывает принцип Ванга [8, 9] подсчета страховых премий:

$$H_g(X) = \int_{-\infty}^0 (g(S_X(t)) - 1) dt + \int_0^{+\infty} g(S_X(t)) dt,$$

где $g(u)$ — так называемая функция искажения; $S_X(t) = \mathbf{P}(X > t)$ — функция выживания для страхового риска X . В случае дуально-степенной функции искажения $g(u) = 1 - (1 - u)^n$ получаем $H_g(X) = \mu_n(X)$. Практически это означает, что компания ориентируется на худший из n возможных случаев в смысле объема страховых выплат.

Отметим также приложения в задачах надежности [10]. Пусть имеется основной элемент и один или несколько резервных, работающих в одном режиме с основным (нагруженный, или «горячий», резерв). Если система выходит из строя, только когда все элементы выходят из строя, то время ее безотказной работы равно максимальному из времен безотказной работы элементов.

Интересные приложения средних максимумов встречаются и в теории массового обслуживания. Рассмотрим систему из n приборов, в которую поступают заявки. Очередная поступившая на обработку заявка делится на n подзаявок, каждая из которых обслуживается одним из приборов. Существуют две стандартные модели обработки подзаявок: модель fork-join [11] и модель split-merge [12].

В модели fork-join каждая подзаявка Z_i заявки Z отправляется в соответствующую очередь ровно в тот момент, когда Z поступила в систему. При этом

некоторые приборы могут все еще обрабатывать подзаявки предыдущих заявок, поэтому отрезок времени, который каждая подзаявка проводит в системе, делится на две части: время ожидания (нахождение в очереди, пока обслуживаются подзаявки от предыдущих заявок) и непосредственно время обслуживания. Этот суммарный отрезок называется *временем пребывания* подзаявки в системе или *временем отклика*. Значит, время пребывания целой заявки в системе — это максимум из времен отклика по каждой из подзаявок. Вообще говоря, времена пребывания T_i подзаявок Z_i в системе не являются независимыми. Однако они являются положительно зависимыми (или ассоциированными), а потому математическое ожидание их максимума оценивается сверху средним максимумом независимых случайных величин с тем же распределением. Поэтому важной характеристикой модели является средний максимум из независимых случайных величин с распределениями времен отклика по каждой из подзаявок.

В модели split-merge обслуживание очередной заявки Z не начнется, пока не будут обработаны все подзаявки предыдущей заявки. Таким образом, время обслуживания целой заявки в системе — это максимум из времен T'_i обслуживания каждой ее подзаявки, причем T'_i независимы между собой. Значит, среднее время обслуживания заявки — это просто средний максимум времен обслуживания ее подзаявок.

Один из ярких примеров применения моделей fork-join и split-merge — облачные технологии. Пусть обработка данных производится на удаленном сервере, причем применяется параллельное программирование и алгоритм работает в нескольких параллельных потоках. Ясно, что в данном случае система может описываться одной из этих моделей. Отметим недавние работы отечественных ученых на эту тему [13–16].

Упомянем здесь технологию виртуализации данных RAID (Redundant Array of Inexpensive Disks, Redundant Array of Independent Disks) [17], которая объединяет несколько жестких дисков в один логический элемент для повышения надежности и производительности. На базовом уровне RAID 1 имеется массив из двух или более дисков, являющихся полными копиями (зеркалами) друг друга. Запись на диски происходит параллельно, однотипным образом. При чтении информацию можно брать по частям с разных дисков параллельно, что ускоряет процесс. Система имеет высокую надежность и работает до тех пор, пока функционирует хотя бы один диск в массиве. Таким образом, здесь имеет место сочетание надежной схемы с резервированием и системы массового обслуживания с разделением заявок. Аналогичные технологии можно применять и при хранении информации на нескольких серверах, в интернете (зеркальные сайты и базы данных) и др.

Таким образом, становится ясно, что введенный объект (средние максимумы) представляет высокий научный интерес.

При решении задачи установления границ для μ_n с конечными средним и дисперсией без ограничения общности можно рассматривать случай нулевого

среднего и единичной дисперсии. Действительно, пусть $\mathbf{E}X = a$, $\mathbf{D}X = \sigma^2$. Определим $X^* = (X - a)/\sigma$. Тогда для любого $n \geq 1$ верно

$$\mu_n(X) = a + \sigma\mu_n(X^*)$$

и по границам $\mu_n(X^*)$ можно однозначно определить границы $\mu_n(X)$.

Изучение границ средних максимумов имеет давнюю историю. Еще в работах [18, 19] для стандартизованных случайных величин было получено неравенство

$$0 < \mu_n(X) \leq \frac{n-1}{\sqrt{2n-1}}. \quad (1)$$

Отметим, что для вычисления и оценок μ_n при больших n можно использовать асимптотический подход, который обсуждается, например, в [11, 20]. Однако при небольших n он не работает.

В [21] были найдены границы при условиях $\mathbf{E}X = 0$, $\mathbf{E}|X|^p = 1$, $p > 1$. В обоих случаях верхние границы оказались достижимыми. Дальнейшие результаты были представлены тем же автором в [2].

Можно упомянуть и другие, более современные работы на близкую тематику. В частности, результат [22] о точной верхней границе среднего максимума набора, вообще говоря, разнораспределенных и зависимых случайных величин X_1, \dots, X_n с известными математическими ожиданиями $\mathbf{E}X_i$ и дисперсиями $\mathbf{D}X_i$, работу [3] о границах средних максимумов коррелированных нормальных случайных величин, а также работы [23, 24] о границах средних порядковых статистик при стареющих распределениях.

В работе [25] приведена верхняя граница для μ_n при более сильных ограничениях: кроме условий $\mathbf{E}X = 0$ и $\mathbf{D}X = 1$ предполагается, что известны μ_m и μ_p , где $m, p > 1$. В этом случае справедливо:

$$\mu_n \leq (n-1) \sqrt{\frac{1}{2n-1} - \tau},$$

где

$$\tau = \left(\frac{m-1}{m+n-1} \mu_p - \frac{p-1}{p+n-1} \mu_m \right)^2 \Big/ \left(\frac{(m-1)^2}{2m-1} \mu_p^2 + \frac{(p-1)^2}{2p-1} \mu_m^2 - 2 \frac{(m-1)(p-1)}{m+p-1} \mu_p \mu_m \right).$$

Заметим, что при $p = 1$ и $\mu_1 = 0$ задача сводится к случаю известного среднего максимума по одной выборке, а не по двум, но приведенная формула в этом случае, к сожалению, неприменима. Границы μ_n при таких ограничениях

независимо от [25] были получены в [26]. Примечательно, что в этом случае найдена не только верхняя граница, но и нижняя.

Итак, согласно [26], при $n > m$ имеем:

$$\mu_n \leq \frac{n-1}{(m-1)(n+m-1)} \left((2m-1)\mu_m + \frac{n-m}{2n-1} \sqrt{(2n-1)(2m-1) \left(\frac{(m-1)^2}{2m-1} - \mu_m^2 \right)} \right);$$

$$\mu_n \geq \max \left\{ \mu_m, \frac{n-1}{(m-1)(n+m-1)} \left((2m-1)\mu_m - \frac{n-m}{2n-1} \sqrt{(2n-1)(2m-1) \left(\frac{(m-1)^2}{2m-1} - \mu_m^2 \right)} \right) \right\}.$$

При $n < m$ имеем:

$$\mu_n \leq \min \left\{ \mu_m, \frac{n-1}{(m-1)(n+m-1)} \left((2m-1)\mu_m + \frac{m-n}{2n-1} \sqrt{(2n-1)(2m-1) \left(\frac{(m-1)^2}{2m-1} - \mu_m^2 \right)} \right) \right\};$$

$$\mu_n \geq \max \left\{ 0, \frac{n-1}{(m-1)(n+m-1)} \left((2m-1)\mu_m - \frac{m-n}{2n-1} \sqrt{(2n-1)(2m-1) \left(\frac{(m-1)^2}{2m-1} - \mu_m^2 \right)} \right) \right\}.$$

Более того, в [26] показано, что при $m = 2$ криволинейную границу из верхней оценки μ_n можно частично заменить прямой линией:

$$\mu_n \leq \min \left\{ (n-1)\mu_2, \frac{n-1}{n+1} \left(3\mu_2 + \frac{n-2}{2n-1} \sqrt{3(2n-1) \left(\frac{1}{3} - \mu_2^2 \right)} \right) \right\}.$$

Потребность в оценке одних средних максимумов по другим может возникать в различных указанных выше приложениях.

Если речь идет о страховых или финансовых рисках (случайных величинах потерь), которые ранее оценивались по одной системе (средних максимумов с m), а планируется перейти на новую (средних максимумов с n), то возникает вопрос, как сильно от этого изменятся страховые премии или финансовые решения. Можно ли утверждать, что какие-то риски, считавшиеся ранее более высокими, чем какие-то другие, по-прежнему будут считаться большими или их порядок может измениться? Оказывается, может быть по-разному в зависимости от соотношения средних максимумов.

Применительно к надежностным схемам с резервированием оценки средних максимумов могут быть полезны в случае, если имеется статистика по среднему времени работы систем с известным числом резервных элементов, это число собираются изменить и нужно оценить возможный эффект.

Аналогично в моделях с разделением заявок речь может идти об изменении числа подзаявок, на которые разделяется заявка, при сохранении распределения времени обслуживания. Такое возможно, если речь идет о дублировании однотипных операций (например, в технологии RAID).

С одной стороны, оценки средних максимумов могут показаться грубыми, но, с другой стороны, они не требуют знания точного распределения случайных величин или даже класса распределения, а опираются лишь на моментные характеристики. В этом смысле их можно сравнить с неравенством Чебышева и его разнообразными аналогами, известными в теории вероятностей.

Стоит, однако, отметить, что авторы работ [25, 26] не касались вопроса достижимости границ и их точности. Настоящая работа призвана по возможности восполнить этот пробел.

Далее будем рассматривать случайные величины X с $\mathbf{E}X = 0$, $\mathbf{D}X = 1$ и известным средним максимумом μ_m . Попробуем определить, в каких пределах может изменяться μ_n при различных μ_m . Обозначим точную верхнюю границу μ_n при заданных условиях через $\bar{\mu}_n$, а точную нижнюю — через $\underline{\mu}_n$. Будем также обозначать через $x(F)$ функцию, обратную к функции распределения F случайной величины. Более точно,

$$x(u) = \inf \{t : F(t) \geq u\}.$$

Тогда

$$\left. \begin{aligned} \mu_k(X) &= \int_0^1 x(F) dF^k = \int_0^1 kF^{k-1} x(F) dF; \\ \int_0^1 x(F) dF &= 0; \quad \int_0^1 x^2(F) dF = 1. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Настоящая статья продолжает исследование границ средних максимумов при заданных условиях. В частности, приведены и доказаны условия достижимости

границ, полученных в [26]. В случае, когда эти условия не выполняются, предложен подход к уточнению границ, а именно: оценка снизу для верхней границы и оценка сверху для нижней границы.

2 Достижимость границ

В силу (2) задача на экстремумы μ_n при известном μ_m , нулевом среднем и единичной дисперсии может рассматриваться как задача вариационного исчисления относительно функции $x(F)$ и решаться методом множителей Лагранжа.

Согласно результату [26] экстремали для μ_n имеют вид:

$$x(F) = a(1 - nF^{n-1}) + b(1 - mF^{m-1}), \quad (3)$$

где либо

$$a = -\frac{n+m-1}{(n-1)(m-1)} \sqrt{\frac{(2n-1)(2m-1)}{(n-m)^2} \left(\frac{(m-1)^2}{2m-1} - \mu_m^2 \right)}; \quad (4)$$

$$b = \frac{2m-1}{(m-1)^2} \left(-\mu_m + \sqrt{\frac{(2n-1)(2m-1)}{(n-m)^2} \left(\frac{(m-1)^2}{2m-1} - \mu_m^2 \right)} \right), \quad (5)$$

либо

$$a = \frac{n+m-1}{(n-1)(m-1)} \sqrt{\frac{(2n-1)(2m-1)}{(n-m)^2} \left(\frac{(m-1)^2}{2m-1} - \mu_m^2 \right)}; \quad (6)$$

$$b = \frac{2m-1}{(m-1)^2} \left(-\mu_m - \sqrt{\frac{(2n-1)(2m-1)}{(n-m)^2} \left(\frac{(m-1)^2}{2m-1} - \mu_m^2 \right)} \right). \quad (7)$$

Соответствующие верхнее и нижнее значения μ_n записываются следующим образом:

$$\mu_n = -a \frac{(n-1)^2}{2n-1} - b \frac{(n-1)(m-1)}{n+m-1} = \frac{n-1}{(m-1)(n+m-1)} \left((2m-1)\mu_m \pm \right. \\ \left. \pm |n-m| \sqrt{\frac{2m-1}{2n-1} \left(\frac{(m-1)^2}{2m-1} - \mu_m^2 \right)} \right). \quad (8)$$

Важно отметить, что полученное выражение (8) — действительно верхняя (нижняя) грань для среднего максимума из n величин, т. е. глобальный экстремум. Это также было показано в [26] с помощью неравенства Коши–Буняковского. Однако метод Лагранжа применяется без учета вероятностного смысла, так

что выражение (3) необязательно задает вероятностное распределение: для этого необходимо, чтобы функция $x(F)$ не убывала по F . Выясним, когда это так.

Если подставить выражения для a и b в (8), то станет понятно, что верхняя грань получается, когда a и b задаются формулами (4) и (5), а нижняя — когда они задаются формулами (6) и (7). Справедливы следующие теоремы.

Теорема 1. Пусть $m < n$. Тогда если

$$\mu_m \in \left[\frac{(m-1)\sqrt{2n-1}}{(n+m-1)}, \frac{m-1}{\sqrt{2m-1}} \right],$$

то

$$\begin{aligned} \bar{\mu}_n = \frac{n-1}{(m-1)(n+m-1)} & \left((2m-1)\mu_m + \right. \\ & \left. + \frac{n-m}{2n-1} \sqrt{(2n-1)(2m-1) \left(\frac{(m-1)^2}{2m-1} - \mu_m^2 \right)} \right). \end{aligned}$$

Если же

$$\mu_m \in \left[\frac{(m-1)(n+2m-1)\sqrt{2n-1}}{\sqrt{(2m-1)(n+m-1)(1+2m^2-3m-3n+6mn+2n^2)}}, \frac{m-1}{\sqrt{2m-1}} \right],$$

то

$$\begin{aligned} \underline{\mu}_n = \frac{n-1}{(m-1)(n+m-1)} & \left((2m-1)\mu_m - \right. \\ & \left. - \frac{n-m}{2n-1} \sqrt{(2n-1)(2m-1) \left(\frac{(m-1)^2}{2m-1} - \mu_m^2 \right)} \right). \end{aligned}$$

Доказательство. Коль скоро $x(F)$ — многочлен, эта функция является всюду дифференцируемой. Выпишем условие неотрицательности ее производной:

$$\begin{aligned} x'(F) = -an(n-1)F^{n-2} - bm(m-1)F^{m-2} = \\ = -F^{m-2} (an(n-1)F^{n-m} + bm(m-1)) \geq 0. \end{aligned}$$

Функция $an(n-1)F^{n-m} + bm(m-1)$ монотонна по F при $F \in [0, 1]$. Поэтому для того, чтобы $x'(F) \geq 0$ на $[0, 1]$, необходимо и достаточно, чтобы

$$\begin{aligned} an(n-1) + bm(m-1) &\leq 0; \\ bm(m-1) &\leq 0. \end{aligned}$$

Как уже было отмечено, величине $\bar{\mu}_n$ соответствуют a и b , задаваемые формулами (4) и (5). Подставив выражения (4) и (5), получим систему неравенств на μ_m :

$$\begin{aligned} \frac{m\mu_m(1-2m) - (n+2m-1)\sqrt{(2n-1)(1+m^2+\mu_m^2-2m(1+\mu_m^2))}}{m-1} &\leq 0; \\ \frac{m(2m-1)}{m-1} \left(-\mu_m + \sqrt{\frac{(2n-1)(2m-1)}{(n-m)^2} \left(\frac{(m-1)^2}{2m-1} - \mu_m^2 \right)} \right) &\leq 0. \end{aligned}$$

Заметим, что в силу того, что $n > m > 1$ и $\mu_m \geq 0$, первое неравенство верно всегда. Второе же неравенство эквивалентно

$$\mu_m \geq \sqrt{\frac{(2n-1)(2m-1)}{(n-m)^2} \left(\frac{(m-1)^2}{2m-1} - \mu_m^2 \right)}.$$

Разрешив его, получим искомый диапазон для μ_m , соответствующий верхней границе.

Что касается нижней границы $\underline{\mu}_n$, то ей соответствуют a и b , задаваемые формулами (6) и (7). Подставим выражения (6) и (7) в систему и получим новую систему неравенств на μ_m :

$$\begin{aligned} \frac{m\mu_m(1-2m) + (n+2m-1)\sqrt{(2n-1)(1+m^2+\mu_m^2-2m(1+\mu_m^2))}}{m-1} &\leq 0; \\ \frac{m(2m-1)}{m-1} \left(-\mu_m - \sqrt{\frac{(2n-1)(2m-1)}{(n-m)^2} \left(\frac{(m-1)^2}{2m-1} - \mu_m^2 \right)} \right) &\leq 0. \end{aligned}$$

Заметим, что в силу того, что $n > m > 1$ и $\mu_m \geq 0$, второе неравенство верно всегда. Первое же неравенство эквивалентно

$$\frac{m(2m-1)}{n+2m-1} \mu_m \geq \sqrt{(2n-1)(1+m^2+\mu_m^2-2m(1+\mu_m^2))}.$$

Разрешив его, получим искомый диапазон для μ_m , соответствующий нижней границе. Теорема доказана. \square

Теорема 2. Если $m > n$ и

$$\mu_m \in \left[\frac{(m-1)(n+2m-1)\sqrt{2n-1}}{\sqrt{(2m-1)(n+m-1)(1+2m^2-3m-3n+6mn+2n^2)}}, \frac{m-1}{\sqrt{2m-1}} \right],$$

то

$$\bar{\mu}_n = \frac{n-1}{(m-1)(n+m-1)} \left((2m-1)\mu_m + \frac{m-n}{2n-1} \sqrt{(2n-1)(2m-1) \left(\frac{(m-1)^2}{2m-1} - \mu_m^2 \right)} \right).$$

Нижняя же граница

$$\underline{\mu}_n = \frac{n-1}{(m-1)(n+m-1)} \left((2m-1)\mu_m - \frac{m-n}{2n-1} \sqrt{(2n-1)(2m-1) \left(\frac{(m-1)^2}{2m-1} - \mu_m^2 \right)} \right)$$

достигается лишь для максимального значения

$$\mu_m = \frac{m-1}{\sqrt{2m-1}}.$$

Доказательство. Коль скоро $x(F)$ — многочлен, эта функция является всюду дифференцируемой. Выпишем условие неотрицательности ее производной:

$$\begin{aligned} x'(F) &= -an(n-1)F^{n-2} - bm(m-1)F^{m-2} = \\ &= -F^{n-2} (an(n-1) + bm(m-1)F^{m-n}). \end{aligned}$$

Функция $an(n-1) + bm(m-1)F^{m-n}$ монотонна по F при $F \in [0, 1]$. Поэтому для того, чтобы $x'(F) \geq 0$ на $[0, 1]$, необходимо и достаточно, чтобы

$$\begin{aligned} an(n-1) + bm(m-1) &\leq 0; \\ an(n-1) &\leq 0. \end{aligned}$$

Таблица 1 Пороговые значения для верхних границ ($\bar{\mu}_n$)

m	n		
	3	4	5
2	$\frac{\sqrt{5}}{4} \approx 0,559$	$\frac{\sqrt{7}}{5} \approx 0,529$	0,5
3	—	$\frac{\sqrt{7}}{3} \approx 0,882$	$\frac{6}{7} \approx 0,857$

Таблица 2 Пороговые значения для нижних границ ($\underline{\mu}_n$)

m	n		
	3	4	5
2	$\frac{\sqrt{5}}{4} \approx 0,559$	$7\sqrt{\frac{7}{1065}} \approx 0,568$	$\frac{4}{7} \approx 0,571$
3	—	$3\sqrt{\frac{7}{85}} \approx 0,861$	$\frac{4}{\sqrt{21}} \approx 0,873$

Дальнейшее доказательство повторяет шаги доказательства теоремы 1, а именно: для получения диапазона μ_m для достижимости верхней границы разрешим систему, подставив выражения (4) и (5) для a и b . Для получения диапазона μ_m для достижимости нижней границы разрешим систему, подставив выражения (6) и (7) для a и b . Теорема доказана. \square

Отметим, что правые концы промежутков μ_m , на которых достигаются границы, совпадают с верхней оценкой μ_m , полученной в [18, 19]. Таким образом, при всяком m существуют пороговые значения $\hat{\mu}_m$ (для верхней границы) и $\check{\mu}_m$ (для нижней границы) такие, что для всех μ_m , превосходящих или равных $\hat{\mu}_m$ ($\check{\mu}_m$), можно говорить о достижимости верхней (нижней) границы, полученной в [26].

В табл. 1 и 2 представлены пороговые значения для достижимости верхней и нижней границ при $m \in \{2, 3\}$, $n \in \{3, 4, 5\}$. В частности, при $m = 2$ и $n = 3$ пороговые значения для верхней и нижней границ совпадают и равны $\sqrt{5}/4$, однако в общем случае это не так.

3 Уточнение границ

Открытым остается вопрос о том, что происходит, если условия теорем не выполняются. Оптимальное решение $x(F)$, полученное методом вариационного исчисления, имеет вид многочлена (3) на отрезке $[0, 1]$, который, к сожалению,

может как возрастать, так и убывать, тогда как вероятностный смысл имеет только возрастающая ветвь. В связи с этим для получения дальнейших оценок предлагается заменить убывающую часть константой.

Назовем базовой случайную величину X^0 , принимающую значения от 0 до 1. Тогда для ее обратной функции распределения справедливо

$$x^0(0) = 0; \quad x^0(1) = 1.$$

Определим

$$X = \frac{X^0 - \mathbf{E}X^0}{\sqrt{\mathbf{D}X^0}}, \quad (9)$$

тогда случайная величина X принимает значения на некотором конечном отрезке и $\mathbf{E}X = 0$, $\mathbf{D}X = 1$. Но верно и обратное: любая случайная величина X , принимающая значения на некотором конечном отрезке и такая, что $\mathbf{E}X = 0$, $\mathbf{D}X = 1$, представима в виде (9) с некоторой базовой случайной величиной X^0 , при этом

$$\mu_n(X) = \frac{\mu_n(X^0) - \mathbf{E}X^0}{\sqrt{\mathbf{D}X^0}}. \quad (10)$$

Поэтому удобно исследовать базовые случайные величины, а потом пересчитывать для них средние максимумы по формуле (10).

Далее будем рассматривать случай $m < n$. Докажем следующее утверждение.

Теорема 3. I. Пусть

$$\begin{aligned} \alpha(a, m, n) = & -a^{2(m+n)}(m-1)(n-1)(n-m)^2 - 2a^{m+2n}n(n-1)(n-m) + \\ & + 2a^{2m+n}m(m-1)(n-m) - \frac{2a^{m+n}mn(m-1)(n-1)}{m+n-1} + \\ & + \frac{a^{2n}n^2(m-1)(n-1)}{2m-1} + \frac{a^{2m}m^2(m-1)(n-1)}{2n-1} + \\ & + \frac{2a^{2(m+n)-1}m^2n^2(n-m)^2(2m+2n-3)}{(2m-1)(2n-1)(m+n-1)}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \beta(a, m, n) = \\ = \sqrt{\frac{(m-1)(n-1)}{\alpha(a, m, n)}} \operatorname{sgn} \{ a^{m+1}(m-1) - a^{n+1}(n-1) + a^{m+n}(n-m) \}, \end{aligned}$$

где функция $\operatorname{sgn}(\cdot)$ обозначает знак. Кроме того, пусть

$$\hat{\mu}(a, m, n, k) = \frac{\beta(a, m, n)}{(k+m-1)(k+n-1)} (a^m m(k-1)(k+m-1) - a^n n(k-1)(k+n-1) + a^{m+n}(n-m)(k+m-1)(k+n-1) - a^{k+m+n-1} mn(n-m)).$$

Тогда при $\mu_m = \hat{\mu}(a, m, n, m)$ справедливо

$$\bar{\mu}_n \geq \hat{\mu}(a, m, n, n).$$

II. Пусть

$$\begin{aligned} \delta(a, m, n) &= 1 - a - \left(\frac{a(m-1)(n-1)}{mn} - 1 \right)^2 + \\ &\quad + \frac{a(5 + m(2m-7) - 7n + 6mn + 2n^2)}{(2m-1)(2n-1)(m+n-1)}; \\ \check{\mu}(a, m, n, k) &= \frac{(m-1)(n-1)}{\sqrt{\delta(a, m, n)}} \left(\frac{a}{mn} - \frac{a^k}{(k+m-1)(k+n-1)} \right). \end{aligned}$$

Тогда при $\mu_m = \check{\mu}(a, m, n, m)$ справедливо

$$\underline{\mu}_n \leq \check{\mu}(a, m, n, n).$$

Доказательство. Согласно (3) экстремали задачи Лагранжа имеют вид многочленов:

$$\varphi(F) = c_0 + c_1 F^{m-1} + c_2 F^{n-1},$$

которые, вообще говоря, необязательно не убывают на отрезке $[0, 1]$. Посмотрим на эти многочлены поближе. Будем считать, что $c_2 \neq 0$.

Имеем:

$$\begin{aligned} \varphi'(F) &= c_1(m-1)F^{m-2} + c_2(n-1)F^{n-2} = \\ &= F^{m-2} (c_1(m-1) + c_2(n-1)F^{n-m}); \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \varphi''(F) &= c_1(m-1)(m-2)F^{m-3} + c_2(n-1)(n-2)F^{n-3} = \\ &= F^{m-3} (c_1(m-1)(m-2) + c_2(n-1)(n-2)F^{n-m}). \end{aligned} \quad (12)$$

Из (11) следует, что у функции $\varphi(F)$ может быть лишь одна точка локального экстремума $F_0 > 0$: либо максимум, либо минимум. Равенство (12), в свою очередь, означает, что у функции $\varphi(F)$ на положительной полуоси есть лишь одна точка перегиба, причем она не совпадает с локальным экстремумом.

Рассмотрим два класса вспомогательных базовых функций.

Первый класс охватывает те ситуации, когда у базовой функции $\varphi(F)$ локальный минимум в точке $F = a \in (0, 1)$:

$$(A) : \begin{cases} \varphi_1(a) = 0; \\ \varphi_1'(a) = 0; \\ \varphi_1(1) = 1. \end{cases}$$

Второй класс соответствует базовым функциям $\varphi(F)$ с локальным максимумом в точке $F = a \in (0, 1)$:

$$(B) : \begin{cases} \varphi_2(0) = 0; \\ \varphi_2(a) = 1; \\ \varphi_2'(a) = 0. \end{cases}$$

В обеих ситуациях из системы условий можно вывести формулы для коэффициентов c_0 , c_1 и c_{n-1} . Так, в случае (A) получаем, что

$$\varphi_1(a, m, n, F) = \frac{a^{m+n}(n-m) - (n-1)a^{n+1}F^{m-1} + (m-1)a^{m+1}F^{n-1}}{(m-1)a^{m+1} - (n-1)a^{n+1} + a^{m+n}(n-m)},$$

а в случае (B) —

$$\varphi_2(a, m, n, F) = \frac{(n-1)F^{m-1}}{(n-m)a^{m-1}} - \frac{(m-1)F^{n-1}}{(n-m)a^{n-1}}.$$

Изложенные рассуждения побуждают рассмотреть два класса вероятностных распределений, задаваемых обратными функциями распределения.

Верхняя граница. Для первого класса случайных величин, уточняющего верхнюю границу μ_n , имеем

$$(A) : x_1^0(a, m, n, F) = \begin{cases} 0, & 0 \leq F \leq a; \\ \varphi_1(a, m, n, F), & a \leq F \leq 1. \end{cases}$$

Для наглядности представим графики (рис. 1) обратной функции распределения случайной величины X_1 для $(m, n, a) = (2, 3, 0,5)$ и $(m, n, a) = (2, 4, 0,5)$. Пунктиром отмечено продолжение функции $\varphi_1(a, m, n, F)$ там, где она заменена нулем.

Для случайной величины с этим вероятностным распределением справедливо

$$\begin{aligned} \mathbf{E}X_1^0(a, m, n) &= \int_0^1 x_1^0(a, m, n, F) dF = \int_a^1 \varphi_1(a, m, n, F) dF = \\ &= \frac{mn(n-m)(1-a)a^{m+n} - n(n-1)a^{n+1}(1-a^m) + m(m-1)a^{m+1}(1-a^n)}{mn((m-1)a^{m+1} - (n-1)a^{n+1} + a^{m+n}(n-m))}; \end{aligned}$$

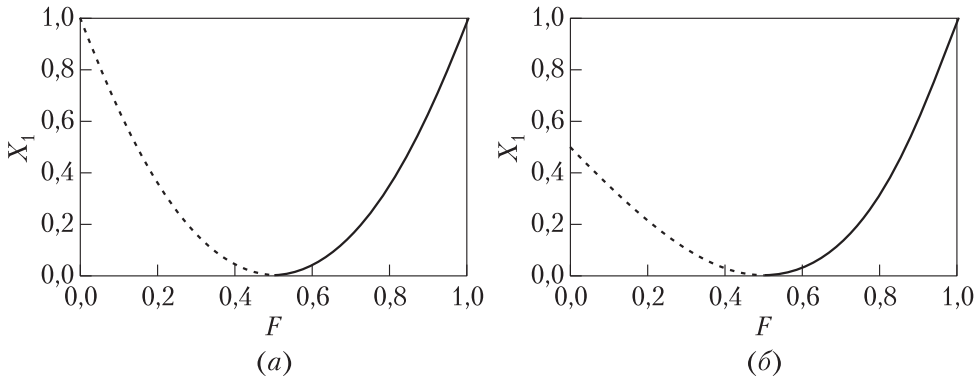


Рис. 1 Графики обратной функции распределения случайной величины X_1 для $(m, n, a) = (2, 3, 0,5)$ (а) и $(m, n, a) = (2, 4, 0,5)$ (б)

$$\begin{aligned}
 \mathbf{D}X_1^0(a, m, n) &= \int_0^1 (x_1^0(a, m, n, F))^2 dF - (\mathbf{E}X_1^0(a, m, n))^2 = \\
 &= \int_a^1 (\varphi_1(a, m, n, F))^2 dF - (\mathbf{E}X_1^0(a, m, n))^2 = \\
 &= \frac{(m-1)(n-1)\alpha(a, m, n)}{(mn(a^m(m-1) + a^n(1-n + a^{m-1}(n-m))))^2}; \\
 \mu_k(X_1^0(a, m, n)) &= \int_0^1 kF^{k-1}x_1^0(a, m, n, F) dF = \int_a^1 kF^{k-1}\varphi_1(a, m, n, F) dF = \\
 &= k \left(-\frac{a^{n+1}(n-1)}{k+m-1} + \frac{a^{m+1}(m-1)}{k+n-1} - \frac{a^{k+m+n}(m-1)(n-1)(n-m)}{k(k+m-1)(k+n-1)} + \right. \\
 &\quad \left. + \frac{a^{m+n}(n-m)}{k} \right) / ((m-1)a^{m+1} - (n-1)a^{n+1} + a^{m+n}(n-m)).
 \end{aligned}$$

Но пока рассмотрена лишь базовая случайная величина X_1^0 . Никаких ограничений на математическое ожидание и дисперсию не накладывается, в то время как исходная задача сформулирована для стандартизованных величин. Рассмотрим случайную величину $X_1 = (X_1^0 - \mathbf{E}X_1^0) / \sqrt{\mathbf{D}X_1^0}$. Она стандартизована,

а средние максимумы для нее получаются из средних максимумов для X_1^0 тем же линейным преобразованием, что и сама X_1 получается из X_1^0 :

$$\mu_k(X_1(a, m, n)) = \frac{\mu_k(X_1^0(a, m, n)) - \mathbf{E}X_1^0(a, m, n)}{\sqrt{\mathbf{D}X_1^0(a, m, n)}}.$$

Вычислив значение этого выражения, получим в точности оценку для верхней границы из условия теоремы, а именно:

$$\begin{aligned} \mu_m(X_1(a, m, n)) &= \hat{\mu}(a, m, n, m); \\ \mu_n(X_1(a, m, n)) &= \hat{\mu}(a, m, n, n). \end{aligned}$$

Таким образом, предъявлена случайная величина X_1 с $\mu_m(X_1)$ из условия теоремы, для которой значение $\mu_n(X_1)$ совпадает с оценкой для верхней границы $\mu_n(X_1)$. Последнее доказывает часть I теоремы.

Нижняя граница. Для случайных величин из второго класса в свою очередь справедливо

$$(B) : \quad x_2^0(a, m, n, F) = \begin{cases} \varphi_2(a, m, n, F), & 0 \leq F \leq a; \\ 1, & a \leq F \leq 1. \end{cases}$$

Для наглядности представим графики (рис. 2) обратной функции распределения случайной величины X_2 для $(m, n, a) = (2, 3, 0,5)$ и $(m, n, a) = (2, 4, 0,5)$. Пунктиром отмечено продолжение функции $\varphi_2(a, m, n, F)$ там, где она заменена единицей.

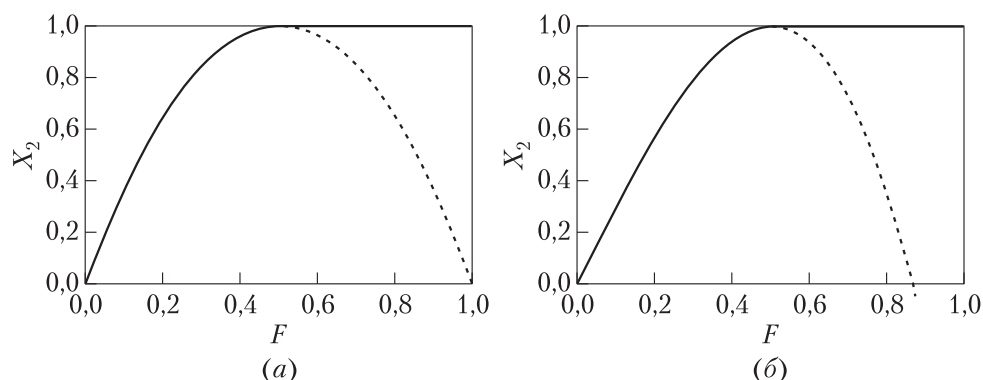


Рис. 2 Графики обратной функции распределения случайной величины X_2 для $(m, n, a) = (2, 3, 0,5)$ (а) и $(m, n, a) = (2, 4, 0,5)$ (б)

Для случайной величины с этим вероятностным распределением справедливо:

$$\begin{aligned} \mathbf{E}X_2^0(a, m, n) &= \int_0^1 x_2^0(a, m, n, F) dF = \\ &= \int_0^a \varphi_2(a, m, n, F) dF + 1 - a = 1 + \frac{a(m + n - mn - 1)}{mn}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{D}X_2^0(a, m, n) &= \int_0^1 (x_2^0(a, m, n, F))^2 dF - (\mathbf{E}X_2^0(a, m, n))^2 = \\ &= 1 - a + \int_0^a (\varphi_2^0(a, m, n, F))^2 dF - (\mathbf{E}X_2^0(a, m, n))^2 = \delta(a, m, n); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mu_k(X_2^0(a, m, n)) &= \int_0^1 kF^{k-1}x_2^0(a, m, n) dF = \\ &= \int_0^a kF^{k-1}\varphi_2(a, m, n) + 1 - a^k = 1 - \frac{a^k(m-1)(n-1)}{(k+m-1)(k+n-1)}. \end{aligned}$$

Рассмотрим теперь случайную величину $X_2 = (X_2^0 - \mathbf{E}X_2^0)/\sqrt{\mathbf{D}X_2^0}$. Она стандартизована, а средние максимумы для нее получаются из средних максимумов для X_2^0 тем же линейным преобразованием, что и сама X_2 получается из X_2^0 :

$$\begin{aligned} \mu_k(X_2(a, m, n)) &= \frac{\mu_k(X_2^0(a, m, n)) - \mathbf{E}X_2^0(a, m, n)}{\sqrt{\mathbf{D}X_2^0(a, m, n)}} = \\ &= \frac{(m-1)(n-1)}{\sqrt{\delta(a, m, n)}} \left(\frac{a}{mn} - \frac{a^k}{(k+m-1)(k+n-1)} \right) = \check{\mu}(a, m, n, k). \end{aligned}$$

Таким образом, как и в случае верхней границы, предьявлена случайная величина X_2 с $\mu_m(X_2)$ из условия теоремы, для которой значение $\mu_n(X_2)$ совпадает с оценкой для нижней границы $\mu_n(X_2)$. Теорема доказана. \square

В [26] было помимо всего прочего приведено уточнение границ μ_n для случая $m = 2$. Так, в дополнение к ограничению сверху оказывается, что

$$\mu_n \leq (n-1)\mu_2.$$

Таблица 3 Значения средних максимумов

Распределения	n			
	2	3	4	5
Равномерное	$\frac{1}{\sqrt{3}} \approx 0,577$	$\frac{\sqrt{3}}{2} \approx 0,866$	$\frac{3\sqrt{3}}{5} \approx 1,039$	$\frac{2}{\sqrt{3}} \approx 1,155$
Показательное	0,5	$\frac{5}{6} \approx 0,833$	$\frac{13}{12} \approx 1,083$	$\frac{77}{60} \approx 1,283$
Гауссовское	0,564	0,846	1,029	1,163
Граница (1)	$\frac{1}{\sqrt{3}} \approx 0,577$	$\frac{2}{\sqrt{5}} \approx 0,894$	$\frac{3}{\sqrt{7}} \approx 1,134$	$\frac{4}{3} \approx 1,333$

Кроме того, очевидно, что при $n \geq m$ справедливо

$$\mu_n \geq \mu_m. \quad (13)$$

Обобщение линейных оценок μ_n через μ_m для любых $2 \leq m < n$ следует из неравенства (11), полученного в [27]:

$$\mu_n \leq \frac{n-1}{m-1} \mu_m. \quad (14)$$

В табл. 3 представлены значения средних максимумов для стандартизованных случайных величин, имеющих классические распределения вероятности: равномерное, показательное и нормальное. Автором были получены общие формулы (для стандартизованных случайных величин) для равномерного распределения:

$$\mu_n(\xi) = \sqrt{3} \frac{n-1}{n+1}$$

и для показательного распределения:

$$\mu_n(\eta) = \sum_{k=2}^n \frac{1}{k}.$$

Для стандартного нормального распределения значения средних максимумов были взяты из существующей таблицы [28, с. 169].

Построим совместные графики границ μ_n из [26] и кривых, уточняющих эти границы, полученных в настоящей статье. На рис. 3–5 пунктирной линией отмечены границы (8), (14), (13), а жирной — множество пар (μ_m, μ_n) для распределений X_1 и X_2 (т. е. верхняя кривая ограничивает $\bar{\mu}_n$ снизу, а нижняя ограничивает $\underline{\mu}_n$ сверху).

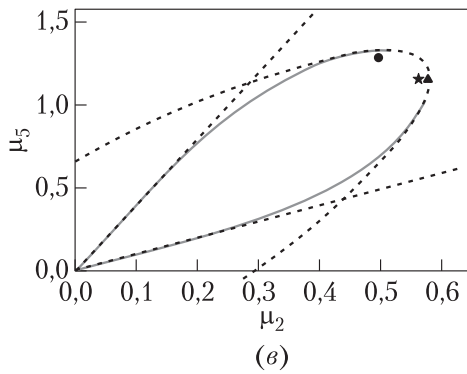
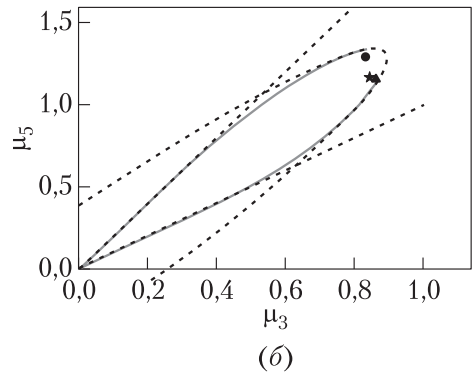
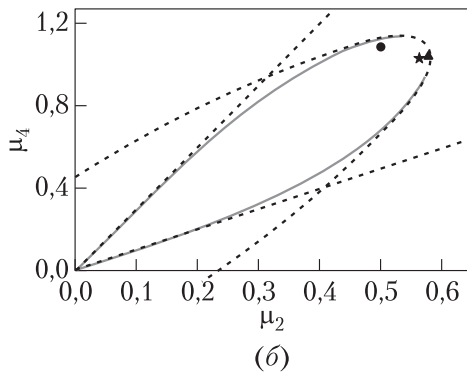
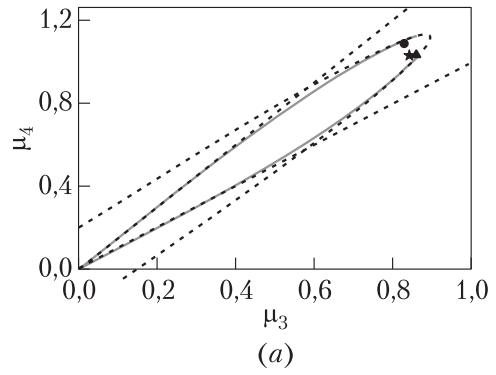
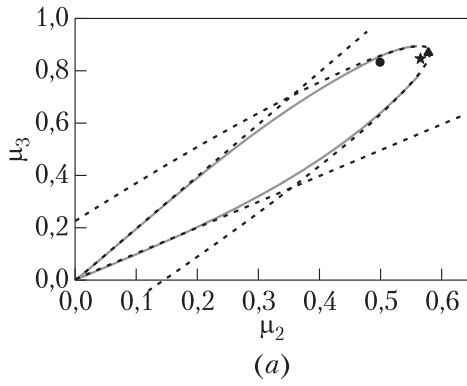


Рис. 4 Зависимости μ_4 (а) и μ_5 (б) от μ_3

Рис. 3 Зависимости μ_3 (а), μ_4 (б) и μ_5 (в) от μ_2

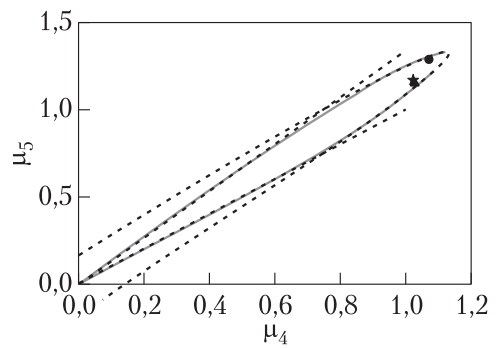


Рис. 5 Зависимость μ_5 от μ_4

Так, если на рисунке отражена зависимость $\mu_n = \mu_n(\mu_m)$, то верхняя жирная линия строится как параметрический график $(\hat{\mu}(a, m, n, m), \hat{\mu}(a, m, n, n))$, а нижняя — как параметрический график $(\check{\mu}(a, m, n, m), \check{\mu}(a, m, n, m))$.

Кроме того, внутри области на каждом рисунке отмечены три точки. Точка, обозначенная треугольником, соответствует равномерному распределению, кругом — показательному, а звездой — стандартному нормальному. Помимо всего прочего графики показывают, что рассмотренные классические распределения либо располагаются достаточно глубоко в области, в пределах которой меняются средние максимумы, и не дают новой информации о границах, либо имеют большое μ_m , как, например, равномерное распределение, и лежат в области достижимости границы, полученной в [26].

4 Заключение

Данная статья продолжает исследование границ средних максимумов из n стандартизованных независимых одинаково распределенных случайных величин при известном среднем максимуме из некоторого числа независимых случайных величин m того же распределения. Автором было показано, что при больших μ_m известные верхняя и нижняя границы, полученные методом вариационного исчисления [26], точны. Кроме того, предложена эвристика для эффективного расширения области достижимых значений среднего максимума μ_n . Для любых $m < n$ получены параметрические формулы, оценивающие верхнюю границу μ_n снизу, а нижнюю — сверху.

Автор выражает огромную благодарность А. В. Лебедеву за идеи, замечания и предложения.

Литература

1. Волкова М. А., Кужевская И. В. Климатология. Теоретические и прикладные аспекты. — Томск: ТГУ, 2011. Электронное издание.
2. Arnold B. C. Bounds on the expected maximum // Commun. Stat. Theor. M., 1988. Vol. 17. Iss. 7. P. 2135–2150.
3. Ross A. M. Computing bounds on the expected maximum of correlated normal variables // Methodol. Comput. Appl., 2010. Vol. 12. Iss. 1. P. 111–138.
4. Borovkov K., Mishura Yu., Novikov A., Zhitlukhin M. Bounds for expected maxima of Gaussian processes and their discrete approximations // Stochastics, 2017. Vol. 89. Iss. 1. P. 21–37.
5. Cherny A. S., Madan D. B. Coherent measurement of factor risks // arXiv.org, 2006. arXiv:math/0605062v1 [math.PR].
6. Орлов Д. В. О двух оценках одной меры риска // Теория вероятн. и ее примен., 2008. Т. 53. № 1. С. 168–172.
7. Cherny A., Orlov D. On two approaches to coherent risk contribution // Math. Financ., 2011. Vol. 21. Iss. 3. P. 557–571.

8. Wang S. S. Premium calculation by transforming the layer premium density // *Astin Bull.*, 1996. Vol. 26. Iss. 1. P. 71–92.
9. Ирхина Н. А. Принцип Ванга в математической теории страхования: Дис. . . . канд. физ.-мат. наук. — М.: МГУ, 2010. 137 с.
10. Гнеденко Б. В., Беляев Ю. К., Соловьев А. Д. Математические методы в теории надежности. — М.: Наука, 1965. 524 с.
11. *Thomasian A.* Analysis of fork/join and related queueing systems // *ACM Comput. Surv.*, 2014. Vol. 47. 17 p.
12. Fiorini P. M., Lipsky L. Exact analysis of some split-merge queues // *Perf. E. R.*, 2015. Vol. 43. Iss. 2. P. 51–53.
13. Горбунова А. В., Зарядов И. С., Матюшенко С. И., Самуйлов К. Е., Шоргин С. Я. Аппроксимация времени отклика системы облачных вычислений // *Информатика и её применения*, 2015. Т. 9. Вып. 3. С. 32–38.
14. Zaryadov I., Kradenyh A., Gorbunova A. The analysis of cloud computing system as a queueing system with several servers and a single buffer // *Analytical and computational methods in probability theory* / Eds. D. V. Gnedenko, S. S. Demidov, A. M. Zubkov, V. A. Kashtanov. — Lecture notes in computer science ser. — Springer, 2017. Vol. 10684. P. 11–22.
15. Meykhanadzhyan L., Matyushenko S., Pyatkina D., Razumchik R. Revisiting joint stationary distribution in two finite capacity queues operating in parallel // *Информатика и её применения*, 2017. Т. 11. Вып. 3. С. 106–112.
16. Осипов О. А., Тананко И. Е. Сети массового обслуживания произвольной топологии с делением и слиянием требований: случай бесконечноприборных систем обслуживания // *Вестник ТвГУ. Серия: Прикладная математика*, 2017. Вып. 4. С. 43–58.
17. Patterson D. A., Gibson G., Katz R. H. A case of redundant arrays of inexpensive disks. — Berkley, CA, USA: University of California, 1987. Technical Report CSD-87-391. 26 p.
18. Gumbel E. J. The maxima of the mean largest value and of the range // *Ann. Math. Stat.*, 1954. Vol. 25. Iss. 1. P. 76–84.
19. Hartley H. O., David H. A. Universal bounds for mean range and extreme observation // *Ann. Math. Stat.*, 1954. Vol. 25. Iss. 1. P. 85–99.
20. Crow C. S., Goldberg D., Whitt W. Two-moment approximations for maxima // *Oper. Res.*, 2007. Vol. 55. Iss. 3. P. 532–548.
21. Arnold B. C. p -Norm bounds on the expectation of the maximum of possibly dependent sample // *J. Multivariate Anal.*, 1985. Vol. 17. Iss. 3. P. 316–332.
22. Bertsimas D. Tight bounds on expected order statistics // *Probab. Eng. Inform. Sc.*, 2006. Vol. 20. Iss. 4. P. 667–686.
23. Rychlik T. Maximal expectations of extreme order statistics from increasing density and failure rate populations // *Commun. Stat. Theor. M.*, 2014. Vol. 43. Iss. 10–12. P. 2199–2213.
24. Goroncy A., Rychlik T. Evaluations of expectations of order statistics and spacings based on IFR distributions // *Metrika*, 2016. Vol. 79. Iss. 6. P. 635–657.
25. Balakrishnan N. Improving the Hartley–David–Gumbel bound for the mean of extreme order statistics // *Stat. Probabil. Lett.*, 1990. Vol. 9. Iss. 4. P. 291–294.

26. Григорьева М. А. Условные границы мер риска в финансовой математике // Современные проблемы математики и механики. — М.: МГУ, 2015. Т. 10. № 3. С. 63–81.
27. Huang J. S. Sequence of expectations of maximum-order statistics // Stat. Probabil. Lett., 1998. Vol. 38. Iss. 2. P. 117–123.
28. Рубин Г. Моменты порядковых статистик и размаха в выборках из совокупности с нормальным распределением // Введение в теорию порядковых статистик / Пер. с англ.; под ред. А. Я. Боярского. — М.: Статистика, 1970. Гл. 12. С. 152–172. (*Ruben H. The moments of the order statistics and of the range in samples from normal populations // Contributions to order statistics / Eds. A. E. Sarhan, B. G. Greenberg. — New York, NY, USA: Wiley, 1962. Ch. 10A.*)

Поступила в редакцию 12.02.19

CONDITIONAL BOUNDS OF EXPECTED MAXIMA OF RANDOM VARIABLES AND THEIR REACHABILITY

D. V. Ivanov

Faculty of Mechanics and Mathematics, M. V. Lomonosov Moscow State University, Main Building, 1 Leninskiye Gory, Moscow 119991, Russian Federation

Abstract: The subject of this article is the expected maxima of an arbitrary number n of independent and identically distributed random variables. Probability distributions with zero mean and variance of 1 and with given value of the expected maximum of m independent random variables of this distribution are taken into consideration. The question of reachability of the boundaries obtained by other authors is investigated. In the cases of failure to derive the answer to this question, the obtained boundaries are specified. The problem might have various applications in queuing theory, insurance, finance, and other fields.

Keywords: expected maximum; reachability

DOI: 10.14357/08696527190112

References

1. Volkova, M. A., and I. V. Kuzhevskaya. 2011. *Klimatologia. Teoreticheskie i prikladnye aspekty* [Climatology. Theoretical and applied aspects]. Tomsk: Tomsk State University. Electronic edition.
2. Arnold, B. C. 1988. Bounds on the expected maximum. *Commun. Stat. Theor. M.* 17(7):2135–2150.
3. Ross, A. M. 2010. Computing bounds on the expected maximum of correlated normal variables. *Methodol. Comput. Appl.* 12(1):111–138.

4. Borovkov, K., Yu. Mishura, A. Novikov, and M. Zhitlukhin. 2017. Bounds for expected maxima of Gaussian processes and their discrete approximations. *Stochastics*. 89(1):21–37.
5. Cherny, A. S., and D. B. Madan. 2006. Coherent measurement of factor risks. Available at: <http://arxiv.org/abs/math/0605062v1> (accessed April 5, 2019).
6. Orlov, D. 2009. On two estimates of a risk measure. *Theor. Probab Appl.* 53(1):169–173.
7. Cherny, A., and D. Orlov. 2011. On two approaches to coherent risk contribution. *Math. Financ.* 21(3):557–571.
8. Wang, S. S. 1996. Premium calculation by transforming the layer premium density. *Astin Bull.* 26(1):71–92.
9. Irkhina, N. 2010. Printsyp Wanga v matematicheskoy teorii strakhovaniya [Wang’s principle in mathematical insurance theory]. Moscow: MSU. PhD Diss. 137 p.
10. Gnedenko, B. V., Yu. K. Belyayev, and A. D. Solovyev. 1969. *Mathematical methods of reliability theory*. 1st ed. New York, NY: Academic Press. 518 p.
11. Thomasian, A. 2014. Analysis of fork/join and related queueing systems. *ACM Comput. Surv.* 47. 17 p.
12. Fiorini, P. M., and L. Lipsky. 2015. Exact analysis of some split-merge queues. *Perf. E. R.* 43(2):51–53.
13. Gorbunova, A., I. Zaryadov, S. Matyushenko, K. Samouylov, and S. Shorgin. 2015. Approksimatsiya vremeni otklika sistemy oblachnykh vychisleniy [The approximation of response time of a cloud computing system]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 9(3):32–38.
14. Zaryadov, I., A. Kradenyh, and A. Gorbunova. 2017. The analysis of cloud computing system as a queueing system with several servers and a single buffer. *Analytical and computational methods in probability theory*. Eds. D. B. Gnedenko, S. S. Demidov, A. M. Zubkov, and V. A. Kashtanov. Lecture notes in computer science ser. Springer. 10684:11–22.
15. Meykhanadzhyan, L., S. Matyushenko, D. Pyatkina, and R. Razumchik. 2017. Revisiting joint stationary distribution in two finite capacity queues operating in parallel. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 11(3):106–112.
16. Osipov, O. A., and I. E. Tananko. 2017. Seti massovogo obsluzhivaniya proizvol’noy topologii s deleniem i sliyaniem trebovaniy: sluchay beskonechnopribornnykh sistem obsluzhivaniya [Fork-join queueing networks with an arbitrary topology: The infinite server case]. *Herald of Tver State University. Ser. Appl. Math.* 4:43–58.
17. Patterson, D. A., G. Gibson, and R. H. Katz. 1987. A case of redundant arrays of inexpensive disks. Berkley, CA: University of California. Technical Report CSD-87-391. 26 p.
18. Gumbel, E. J. 1954. The maxima of the mean largest value and of the range. *Ann. Math. Stat.* 25(1):76–84.
19. Hartley, H. O., and H. A. David. 1954. Universal bounds for mean range and extreme observation. *Ann. Math. Stat.* 25(1):85–99.
20. Crow, C. S., D. Goldberg, and W. Whitt. 2007. Two-moment approximations for maxima. *Oper. Res.* 55(3):532–548.
21. Arnold, B. C. 1985. p -Norm bounds on the expectation of the maximum of possibly dependent sample. *J. Multivariate Anal.* 17(3):316–332.

22. Bertsimas, D. 2006. Tight bounds on expected order statistics. *Probab. Eng. Inform. Sc.* 20(4):667–686.
23. Rychlik, T. 2014. Maximal expectations of extreme order statistics from increasing density and failure rate populations. *Commun. Stat. Theor. M.* 43(10–12):2199–2213.
24. Goroncy, A., and T. Rychlik. 2016. Evaluations of expectations of order statistics and spacings based on IFR distributions. *Metrika* 79(6):635–657.
25. Balakrishnan, N. 1990. Improving the Hartley–David–Gumbel bound for the mean of extreme order statistics. *Stat. Probabil. Lett.* 9(4): 291–294.
26. Grigoryeva, M. 2015. Uslovnnye granitsy mer riska v finansovoy matematike [Conditional boundaries of risk measure in financial mathematics]. *Sovremennye problemy matematiki i mekhaniki* [Modern Problems of Mathematics and Mechanics]. Moscow: MSU. 10(3):63–81.
27. Huang, J.S. 1998. Sequence of expectations of maximum-order statistics. *Stat. Probabil. Lett.* 38(2):117–123.
28. Ruben, H. 1962. The moments of the order statistics and of the range in samples from normal populations. *Contributions to order statistics*. Eds. A. E. Sarhan and B. G. Greenberg. New York, NY: Wiley. Ch. 10A.

Received February 12, 2019

Contributor

Ivanov Daniil V. (b. 1993) — PhD student, Department of Probability Theory, Faculty of Mechanics and Mathematics, M. V. Lomonosov Moscow State University, Main Building, 1 Leninskiye Gory, Moscow 119991, Russian Federation; ashtynbamba@gmail.com

О ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ИЗБЫТОЧНОСТИ МЕТОДА ДИХОТОМИИ И УСЛОВНОЙ МИНИМИЗАЦИИ УНИМОДАЛЬНЫХ ФУНКЦИЙ МЕТОДОМ ЭКОНОМНОЙ ДИХОТОМИИ

*В. А. Коднянко*¹

Аннотация: Высказана гипотеза о вычислительной избыточности широко известного метода дихотомии (МД), используемого наряду с другими известными численными методами, в частности методом золотого сечения (МЗС), для условной минимизации унимодальных функций. Сформулирована методика устранения вычислительной избыточности метода и на ее основе разработан и предложен метод минимизации таких функций, названный методом экономной дихотомии (МЭД). Разработаны алгоритмы и код, реализующие метод на языке Delphi. Приведены результаты вычислительного эксперимента, показавшие, что по быстродействию, определяемому количеством вычислений минимизируемой функции (МФ), экономный метод не менее чем в 1,5 раза эффективнее классического МД. Это значит, что в среднем из трех вычислений МФ по МД одно является избыточным. По сравнению с МЗС и МД в среднестатистическом плане метод имеет приблизительно в 1,3 и 1,7 раз большее быстродействие соответственно. Иными словами, метод работает во столько раз быстрее МЗС, во сколько последний работает быстрее классического МД. Данный вывод позволяет критически отнестись к устоявшемуся представлению о том, что МД — худший из методов отсечения отрезков. С учетом полученных результатов МЭД заметно превосходит по быстродействию лучший из них — МЗС и может обоснованно претендовать на лидирующие позиции в данном семействе методов.

Ключевые слова: унимодальная функция; метод дихотомии; метод золотого сечения; метод чисел Фибоначчи; метод экономной дихотомии; монотонная функция; быстродействие метода

DOI: 10.14357/08696527190113

1 Введение

Минимизация функции одной переменной — наиболее простой тип оптимизационных задач. Однако ей отводится важное место в части разработки и практического применения математических методов их решения, включая численные методы. Это связано с тем, что лишь с помощью численных методов могут быть решены многие инженерные и экономические задачи не только однопараметрической оптимизации, но и более сложные многопараметрические задачи.

¹Политехнический институт Сибирского федерального университета, kowlad@rambler.ru

В практике одномерной оптимизации процедурам условной минимизации обычно подвергают унимодальные функции.

Существуют различные определения функций данного класса, поэтому будем придерживаться определения [1], согласно которому *унимодальной* называется функция $f(x)$, определенная на отрезке $[a, b]$, если существуют числа α и β , $a \leq \alpha \leq \beta \leq b$, такие что:

- (1) если $a < \alpha$, то на отрезке $[a, \alpha]$ функция $f(x)$ монотонно убывает;
- (2) если $\beta < b$, то на отрезке $[\beta, b]$ функция $f(x)$ монотонно возрастает;
- (3) на отрезке $[a, \beta]$ функция $f(x)$ постоянна и достигает своего минимума.

К основным требованиям, которые предъявляются к численным методам одномерной минимизации, относятся их надежность и приемлемое быстродействие. Считается, что чем меньше вычислений МФ требуется методу для достижения результата, тем он эффективней и тем выше его быстродействие.

Широко известны отвечающие данным требованиям численные методы условной минимизации унимодальных функций, к числу которых относятся три метода исключения отрезков — МЗС, метод чисел Фибоначчи и МД [2–4]. Два первых метода имеют примерно одинаковое быстродействие, поэтому на практике обычно применяют отличающийся простотой МЗС. Считается, что МД имеет существенно меньшее быстродействие, поэтому он почти не находит практического применения.

Причина пониженного быстродействия МД состоит в том, что, хотя за одну итерацию метод сужает отрезок неопределенности примерно вдвое, а МЗС лишь примерно в 1,62 раза, первый требует два вычисления МФ, в то время как второй, не считая первой итерации, требует лишь одного ее вычисления. В итоге МЗС имеет более высокое быстродействие.

В научной литературе нет однозначно высказанных заключений о бесперспективности МД, ибо предполагается, что он может быть усовершенствован. В этом смысле характерно следующее общее пожелание специалистов: «Более обдуманый подход к процессу поиска точки минимума позволил сэкономить на количестве обращений к вычислению функции. Однако в методе дихотомии имеется особенность, позволяющая строить более эффективные алгоритмы. На каждой итерации приходится вычислять значение функции в двух новых точках. Если удастся построить алгоритм так, чтобы каждый раз одна из этих точек совпадала с одной из аналогичных точек с предыдущей итерации, то это бы позволило на каждой итерации вычислять значение функции лишь в одной новой точке и тем самым обращаться к вычислению функции еще меньше» [5].

Подобные точки зрения превалирует во многих работах по численным методам минимизации, включая фундаментальные издания известных и авторитетных специалистов, в том числе ученых с мировым именем [1–10]. Однако попытки улучшить МД до конкурентного уровня на основе реализации высказанной идеи или иным способом (см., например, [11]) пока не увенчались успехом.

Наряду с этим МД представляется вычислительно избыточным в том смысле, что существует, по крайней мере теоретическая, возможность уменьшения числа обращений к МФ для решения названных задач с требуемой точностью.

Цель настоящей статьи — исследование возможности повышения быстродействия МД до конкурентного уровня за счет устранения его вычислительной избыточности. Методу, в котором устранены избыточные вычисления МФ, дано название *метода экономной дихотомии*.

2 Постановка задачи и описание метода

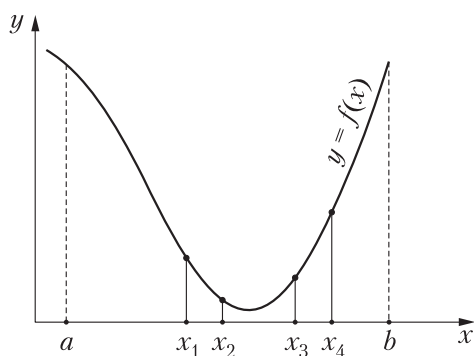


Рис. 1 Расчетная схема МЭД

Метод экономной дихотомии предназначен для нахождения абсциссы x минимума унимодальной функции $f(x)$ на отрезке $G = [a, b]$ с точностью до ε .

В основе метода лежит МД. Его суть состоит в следующем. Пусть на текущей итерации МД вычислены абсциссы дихотомии $x_1 = x - \varepsilon$, $x_2 = x + \varepsilon$ и соответствующие им значения функций $f(x_1)$ и $f(x_2)$ и пусть $f(x_1) \geq f(x_2)$, как показано на рис. 1.

В этом случае МД потребовал бы на следующей итерации вычисления МФ в аналогичных точках x_3 и x_4 . Однако прежде вычислим МФ в ближней к x_2 точке x_3 . Если $f(x_3) < f(x_2)$, то вычислим и $f(x_4)$, как в МД. Если окажется, что $f(x_3) \geq f(x_2)$, как показано на рис. 1, то вычисление $f(x_4)$ избыточно, ибо, основываясь на свойстве унимодальности МФ, можно и без вычисления $f(x_4)$ установить, что $f(x_3) \leq f(x_4)$, и сразу сократить отрезок неопределенности, изменив абсциссу b и завершив итерацию. Это обстоятельство указывает на возможность уменьшения количества вычислений МФ.

Аналогичны рассуждения для зеркальной ситуации, когда $f(x_1) \leq f(x_2)$.

3 Алгоритмизация метода экономной дихотомии

С целью подтверждения высказанной идеи и для оценки практической перспективности МЭД были разработаны алгоритмы и программный код на языке Delphi [12].

Блок-схема алгоритма Med, реализующего метод, приведена на рис. 2.

Входными параметрами алгоритма служат: a и b — левая и правая границы отрезка G соответственно; ε — точность определения абсциссы экстремума; h —

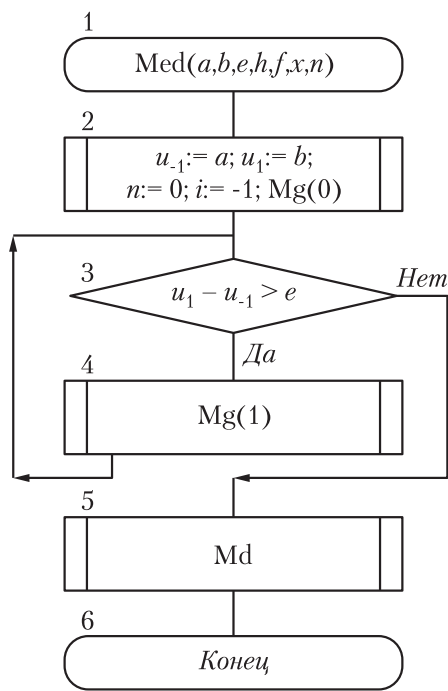


Рис. 2 Блок-схема алгоритма *Med*

коэффициент, используемый для деления текущего отрезка неопределенности в заданном отношении; f — имя МФ. Выходные параметры: x — абсцисса минимума МФ; n — счетчик количества вычислений МФ, определяющего быстродействие метода.

Алгоритм *Med* использует внутренние вспомогательные алгоритмы (на рис. 2 не показаны):

- (1) *Md* — вычисления абсциссы $x = u_i + h(u_{-i} - u_i)$, делящей отрезок неопределенности в заданном отношении, где i — индекс направления итерации ($i = -1$ — движение к левой границе отрезка; $i = 1$ — к его правой границе);
- (2) *Mg* — выполнения действий на текущей итерации.

При инициализации вычислительного процесса в блоке 2 алгоритма *Med* элементам массива u присваиваются значения соответствующих границ отрезка G , производится обнуление счетчика n и задается направление i . Затем с помощью алгоритма *Mg* совершается первая итерация алгоритма *Med*.

Блоки 3 и 4 образуют цикл итераций, реализуемых алгоритмом *Mg*. В блоке 5 найденное решение x уточняется обращением к алгоритму *Md*.

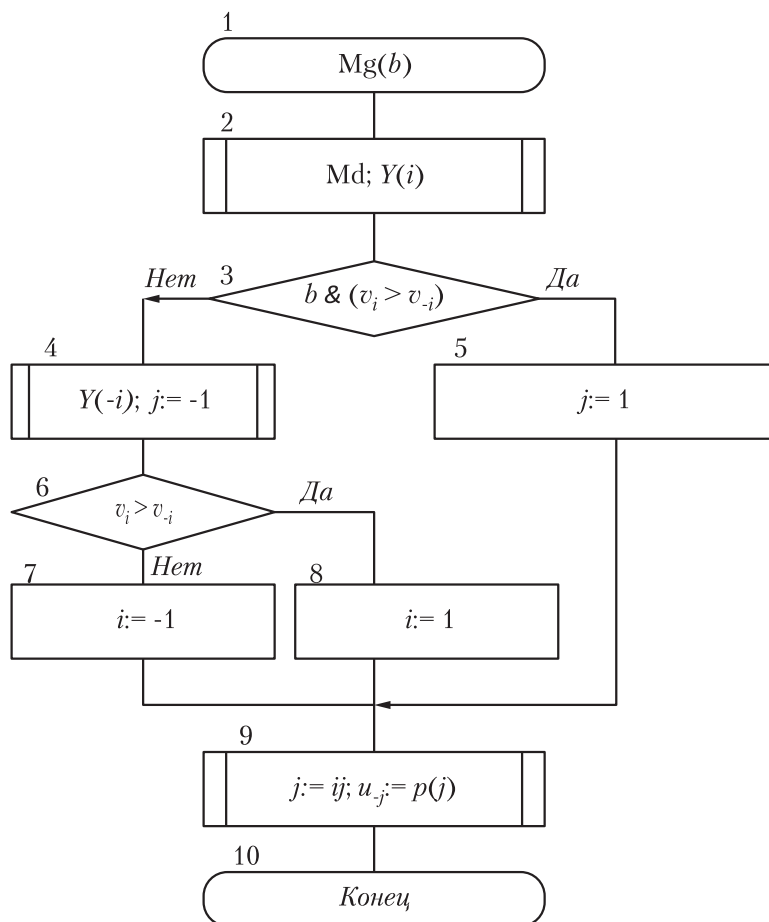


Рис. 3 Блок-схема вспомогательного алгоритма Mg

Блок-схема вспомогательного алгоритма Mg приведена на рис. 3. Он использует внутренние алгоритмы (на рис. 3 не показаны):

- (1) вычисления $p(i) = x + ie$ абсциссы точки дихотомии;
- (2) Y — вычисления ординаты $v_i = f(p(i))$ точки дихотомии и обновления n .

Алгоритм Mg содержит входной параметр b логического типа. При ложном значении параметра (0) совершается первая итерация алгоритма Med по MD , при истинном значении (1) — последующие итерации с контролем вычислений по $MЭД$.

4 Вычислительный эксперимент и обсуждение его результатов

Для оценки работоспособности и эффективности МЭД был проведен сравнительный вычислительный эксперимент на примерах решения десятков оптимизационных задач для унимодальных функций различных типов: гладких, пологих, медленно меняющихся, кусочных, монотонных.

Вычисления проводились для $\varepsilon = 10^{-5}$ при помощи переменных и констант арифметического типа, поддерживающего 19–20 значащих цифр.

В качестве контрольных методов были использованы МЗС и МБ [1–5, 7–9, 11].

Пример одной из экспериментальных функций приведен на рис. 4. Функция имеет минимум в точке $x = 1,24955$.

За критерии оценки быстродействия методов принято количество вычислений МФ: k — по МЭД; k_1 — по МЗС; k_2 — по МД. Изучались относительные величины $K_1 = k_1/k$ и $K_2 = k_2/k$ — приведенное к МЭД быстродействие МЗС и МД соответственно.

В результате проведенных экспериментов установлено, что границы отрезка G оказывают существенное влияние на быстродействие исследуемого метода. При этом в зависимости от значений параметра h МЭД в сравнении с МЗС показывал как лучшие, так и худшие результаты.

Чтобы получить ответ на вопрос о том, какой из этих двух методов эффективнее, был проведен статистический расчет. Попутно изучалась эффективность МЭД по отношению к МД. Для этого при фиксированном значении h брали два достаточно широких интервала — слева и справа от точки экстремума, далее случайным образом из них выбирали комбинации значений границ a и b и проводили расчеты для m сочетаний значений этих параметров. Для МФ, представленной на рис. 4, были выбраны интервалы $[0,0; 1,1]$ для a и $[1,3; 2,5]$ для b , число экспериментов $m = 500$.

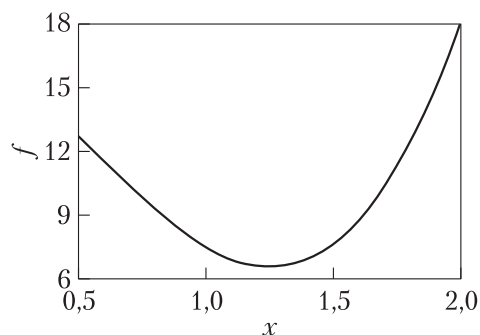


Рис. 4 График функции $f(x) = 15 \exp(-x^2) + 2(x^2 - x + 1)^2$

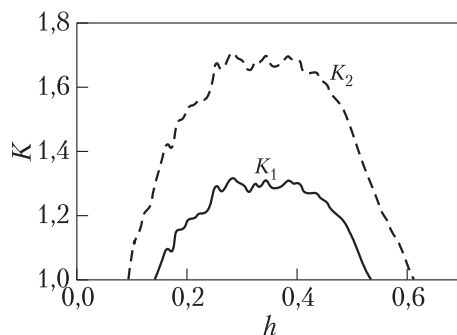


Рис. 5 Графики относительного быстродействия методов

Графики зависимости характеристик K_1 и K_2 от параметра h для данного эксперимента представлены на рис. 5.

Видно, что зависимости носят экстремальный характер. При этом их наибольшие значения приходятся на диапазон $h \in [0,25; 0,40]$. Наибольшие значения данных характеристик $K_1 = 1,31$ и $K_2 = 1,70$, т. е. при оптимальных значениях h МЭД по быстрдействию в среднем во столько раз превосходит МЗС и МД соответственно.

Расчеты показали, что при $h = 0,5$, что соответствует методу половинного деления, в 476 (95%) экспериментах МЭД показывал одинаковые с МЗС или лучшие результаты, а в 430 (86%) экспериментах — лучшие. Однако уже при $h = 0,4$ аналогичные показатели значительно улучшились и составили 498 (99%) и 496 (99%) вычислений МФ соответственно.

В абсолютном выражении это означает, что если МЗС и МД для нахождения экстремума в среднем требуется $k_1 = 28$ и $k_2 = 36$ вычислений МФ соответственно, то МЭД находит решение в среднем за $k = 21$ обращение к ней.

Схожие результаты дали расчеты для других экспериментальных функций.

Эксперименты показали, что МЭД имеет пониженное быстрдействие при минимизации монотонных функций. Однако данный тип функций не характерен для задач оптимизации, и, следовательно, этот факт не является фатальным. Впрочем, этот недостаток метода может быть преодолен несложной модернизацией алгоритма. Если при нескольких последовательных вычислениях МФ замечена тенденция к монотонности текущих результатов, то достаточно вычислить МФ в крайней точке интервала неопределенности и в точке, отстоящей от нее на величину ε , и если окажется, что эти точки также укладываются в прогноз монотонности, то функция действительно является монотонной.

5 Заключение

Таким образом, высказанная в работе гипотеза о вычислительной избыточности классического МД, применяемого для минимизации унимодальных функций, нашла свое теоретическое и экспериментальное обоснование.

Установлено, что МЭД работает быстрее своего классического предтечи не менее чем в 1,5 раза. Это значит, что в среднем из трех вычислений МФ по МД как минимум одно оказывается избыточным.

Метод достаточно чувствителен к параметрам отрезка неопределенности и по отношению к МЗС может работать как быстрее, так и медленнее его, однако при $h \in [0,25; 0,40]$ МЭД обычно требует меньшего количества вычислений МФ для достижения результата.

Общий вывод таков, что при минимизации экстремальных на отрезке неопределенности МФ по сравнению с МЗС и МД в среднестатистическом плане МЭД имеет приблизительно в 1,3 и 1,7 раз большее быстрдействие соответственно. Иными словами, при решении таких задач МЭД работает во столько раз быстрее МЗС, во сколько МЗС работает быстрее классического МД.

Данный вывод позволяет критически отнестись к устоявшемуся представлению о том, что МД — худший из методов отсечения отрезков. С учетом полученных результатов МЭД заметно превосходит по быстродействию лучший из них — МЗС и может обоснованно претендовать на лидирующие позиции в данном семействе методов.

Таким образом, имея перед МЗС определенные преимущества, МЭД представляется предпочтительным в практическом использовании.

Литература

1. Уайлд Д.-Дж. Методы поиска экстремума / Пер. с англ. — М.: Наука, 1967. 267 с. (*Wilde D. J. Optimum seeking methods. Englewood Cliffs, NJ, USA: Prentice Hall, Inc., 1964. 423 p.*)
2. Аттетков А. В., Галкин С. В., Зарубин В. С. Методы оптимизации. — 2-е изд., стереотип. — М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2003. 139 с.
3. Пантелеев А. В., Летова Т. А. Методы оптимизации в примерах и задачах. — М.: Высшая школа, 2005. 245 с.
4. Измайлов А. Ф., Солодов М. В. Численные методы оптимизации. — М.: Физматлит, 2005. 156 с.
5. Аббасов М. Э. Методы оптимизации. — СПб.: ВВМ, 2014. 263 с.
6. Kiefer J. K. Sequential minimax search for a maximum // P. Am. Math. Soc., 1953. Vol. 4. No. 3. P. 502–506.
7. Аоки М. Введение в методы оптимизации / Пер. с англ. — М.: Наука, 1977. 387 с. (*Aoki M. Introduction to optimization techniques, fundamentals and applications of nonlinear programming. — Macmillan ser. in applied computer sciences. — New York, NY, USA: The Macmillan Co., 1971. 344 p.*)
8. Пшеничный Б. Н., Данилин Ю. М. Численные методы в экстремальных задачах. — М.: Наука, 1975. 278 с.
9. Моисеев Н. Н., Иванюков Ю. П., Столярова Е. М. Методы оптимизации. — М.: Наука, 1978. 267 с.
10. Rao S. S. Engineering optimization: Theory and practice. — 4th ed. — Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2009. 320 p.
11. Жадан В. Г. Методы оптимизации. Ч. 2: Численные алгоритмы. — М.: МФТИ, 2015. 320 с.
12. Коднянко В. А. Метод экономной дихотомии. — Красноярск: СФУ, 2018. 13 с. <http://smiuk.sfu-kras.ru/kodnyanko/site>.

Поступила в редакцию 16.07.18

ON COMPUTATIONAL REDUNDANCY OF THE DICHOTOMOUS SEARCH AND CONDITIONAL MINIMIZATION OF UNIMODAL FUNCTIONS BY THE ECONOMICAL DICHOTOMOUS SEARCH

V. A. Kodnyanko

Polytechnical Institute, Siberian Federal University, 26 Kirensky Str., Krasnoyarsk 660074, Russian Federation

Abstract: The hypothesis about the computational redundancy of the well-known dichotomous search, applied along with other known numerical methods, in particular, the golden section search, for the conditional minimization of unimodal functions, is discussed. The technique for eliminating the computational redundancy of the method is formulated and on its basis, a method for minimizing such functions, called the economical dichotomous search, is developed. The author developed the algorithms and code that implement the method in Delphi. The results of a computational experiment are described. They show that the economical method is about 1.5 times more efficient than the classical dichotomous search by a speed determined by the number of calculations of the minimized function. It means that, on average, in three calculations of the function being minimized by dichotomous search, one is redundant. In comparison with the golden section search and the dichotomous search in the average statistical plan, the method is approximately 1.3 and 1.7 times faster, respectively. In other words, the method works as many times faster than the method of the golden section search, as the latter works faster than the classical dichotomous search. This conclusion allows us to take a critical view of the established notion that the dichotomous search is the worst method of cutting off segments. Taking into account the obtained results, the dichotomous search significantly exceeds the speed of the best of them — the golden section search and can reasonably claim to have the leading position in this family of methods.

Keywords: unimodal function; dichotomous search; golden section search; Fibonacci number method; economical dichotomous search; monotone function; method speed

DOI: 10.14357/08696527190113

References

1. Wilde, D. J. 1964. *Optimum seeking methods*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, Inc. 423 p.
2. Attekov, A. V., S. V. Galkin, and V. S. Zarubin. 2003. *Metody optimizatsii* [Optimization methods]. Moscow: Bauman Moscow State Technical University. 139 p.
3. Panteleev, A. V., and T. A. Letova. 2005. *Metody optimizatsii v primerakh i zadachakh* [Optimization methods in examples and problems]. Moscow: Vysshaya shkola. 245 p.

4. Izmailov, A. F., and M. V. Solodov. 2005. *Chislennyye metody optimizatsii* [Numerical optimization methods]. Moscow: Fizmatlit. 156 p.
5. Abbasov, M. E. 2014. *Metody optimizatsii* [Optimization methods]. Saint-Petersburg: VVM. 263 p.
6. Kiefer, J. K. 1953. Sequential minimax search for a maximum. *P. Am. Math. Soc.* 4:502–506.
7. Aoki, M. 1971. Introduction to optimization techniques, fundamentals and applications of nonlinear programming. Macmillan ser. in applied computer sciences. New York, NY: The Macmillan Co. 344 p.
8. Pshenichny, B. N., and Y. M. Danilin. 1975. *Chislennyye metody v ekstremal'nykh zadachakh* [Numerical methods in extremal problems]. Moscow: Nauka. 278 p.
9. Moiseev, N. N., Yu. P. Ivanilov, and E. M. Stolyarova. 1978. *Metody optimizatsii* [Methods of optimization]. Moscow: Nauka. 276 p.
10. Rao, S. S. 2009. *Engineering optimization: Theory and practice*. 4th ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons. 320 p.
11. Zhadan, V. G. 2015. *Metody optimizatsii. Ch. 2. Chislennyye algoritmy* [Optimization methods. Part 2: Numerical algorithms]. Moscow: MIPT. 320 p.
12. Kodnyanko, V. A. 2018. *Metod ekonomnoy dikhotomii* [Economical dichotomous search]. Krasnoyarsk: Siberian Federal University. 13 p. Available at: <http://smiuk.sfu-kras.ru/kodnyanko/site/> (accessed February 21, 2019).

Received July 16, 2018

Contributor

Kodnyanko Vladimir A. (b. 1951) — Doctor of Science in technology, professor, Polytechnical Institute, Siberian Federal University, 26 Kirensky Str., Krasnoyarsk 660074, Russian Federation; kowlad@rambler.ru

АПРИОРНОЕ ВЕЙБУЛЛОВСКОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ В БАЙЕСОВСКИХ МОДЕЛЯХ БАЛАНСА*

Е. Н. Арутюнов¹, А. А. Кудрявцев², А. И. Титова³

Аннотация: Работа посвящена байесовским моделям баланса, которые подразумевают разделение факторов, влияющих на исследуемую систему, на позитивные, т. е. способствующие функционированию, и негативные — препятствующие функционированию. Для исследования эффективности работы системы рассматривается индекс баланса, равный отношению негативного фактора к позитивному. Предполагается, что факторы зависят от условий окружающей среды, а определить их точные значения не представляется возможным в силу нехватки временных и материальных ресурсов, несовершенства измерительного оборудования и т. п., однако законы изменения факторов остаются постоянными и априори известны исследователю. В поставленных условиях представляется разумным применение байесовского метода, подразумевающего рандомизацию исходных параметров, а следовательно, и индекса баланса в предположении, что априорные распределения факторов известны. В данной работе рассматриваются вероятностные характеристики индекса баланса в случае, когда оба фактора имеют априорное распределение Вейбулла. Работа продолжает ряд исследований авторов в области применения байесовских методов в задачах массового обслуживания и надежности.

Ключевые слова: байесовский подход; модели баланса; смешанные распределения; распределение Вейбулла; гамма-экспоненциальная функция

DOI: 10.14357/08696527190114

1 Введение

В современном мире процессы, составляющие основу большинства сфер человеческой деятельности, усложнились настолько, что определение критериев эффективности классическими методами стало практически невозможным. По этой причине повсеместно используются показатели, рейтинги и индексы, позволяющие экономить временные и материальные ресурсы при исследовании

* Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект 17-07-00577).

¹ Институт проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук, enapoleon@mail.ru

² Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, факультет вычислительной математики и кибернетики, nubigena@mail.ru

³ Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, факультет вычислительной математики и кибернетики, onkelskroot@gmail.com

разного рода систем. Как правило, математическим моделям, используемым в исследованиях эффективности, свойственно разделение параметров на позитивные и негативные. При этом факторы, оказывающие влияние на систему, разделяются на два условных класса: способствующие функционированию целевого объекта (р-факторы) и препятствующие функционированию (п-факторы). Для исследования функционирования таких систем естественно рассматривать отношение этих факторов, при этом большое расхождение между величинами факторов, как правило, является признаком недооценки негативного воздействия или же чрезмерных затрат на его преодоление. Следовательно, для достижения баланса в системе следует приближать это отношение к единице.

Рассмотрим индекс баланса системы $\rho = \lambda/\mu$, где λ и μ представляют собой п- и р-фактор соответственно. Примерами индекса баланса при исследовании, скажем, сложных модифицируемых информационных систем могут служить коэффициент загрузки системы, определяемый как отношение интенсивности входящего потока к интенсивности обслуживания, и ожидаемое время безотказной работы, представимое в виде отношения среднего времени безотказной работы к среднему времени восстановления системы.

С течением времени изменяется состояние окружающей среды, а вместе с тем меняются и значения факторов, влияющих на систему. Это дает предпосылки для рассмотрения факторов, а следовательно, и индексов как случайных величин. При этом стоит учитывать, что глобальные изменения окружающей среды происходят достаточно редко, поэтому законы, влияющие на значения факторов, можно считать (в рамках конкретной модели) неизменными. В связи с этим представляется разумным применение байесовского метода, основанного на рандомизации параметров при помощи известных априорных распределений [1].

В статье в качестве априорного рассматривается вейбулловское распределение. Ниже приводятся вероятностные характеристики индекса баланса, по сути являющегося масштабной смесью двух распределений из гамма-класса.

2 Основные результаты

Обозначим через $W(p, \alpha)$ распределение Вейбулла с плотностью

$$w_{p,\alpha}(x) = \frac{px^{p-1}e^{-(x/\alpha)^p}}{\alpha^p}, \quad x > 0, \quad p > 0, \quad \alpha > 0.$$

Рассмотрим гамма-экспоненциальную функцию [2]

$$\text{Ge}_{\alpha,\beta}(x) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{x^k}{k!} \Gamma(\alpha k + \beta), \quad x \in \mathbb{R}, \quad \alpha \geq 0, \quad \beta > 0.$$

Для дальнейших вычислений потребуется следующее утверждение.

Лемма 1. Для некоторых $q > 0$, $p > 0$, $a > 0$ и $b > 0$ справедливо

$$\int_0^\infty y^{q+p-1} e^{-(y/a)^p} e^{-(y/b)^q} dy = \begin{cases} b^{q+p} q^{-1} \text{Ge}_{p/q, (p+q)/q} \left(- \left(\frac{b}{a} \right)^p \right), & p < q; \\ a^{q+p} p^{-1} \text{Ge}_{q/p, (p+q)/p} \left(- \left(\frac{a}{b} \right)^q \right), & q < p; \\ p^{-1} (a^{-p} + b^{-p})^{-2}, & p = q. \end{cases}$$

Доказательство. Рассмотрим случай $p < q$. Используя теорему Лебега о предельном переходе, получаем

$$\begin{aligned} \int_0^\infty y^{q+p-1} e^{-(y/a)^p} e^{-(y/b)^q} dy &= \frac{a^{q+p}}{p} \int_0^\infty t^{q/p} \sum_{k=0}^\infty \frac{(-t)^k}{k!} e^{-(at^{1/p}/b)^q} dt = \\ &= \frac{b^{p+q}}{q} \sum_{k=0}^\infty \frac{(-1)^k (b/a)^{pk}}{k!} \int_0^\infty z^{(pk+p)/q} e^{-z} dz = \\ &= \frac{b^{p+q}}{q} \sum_{k=0}^\infty \frac{(-1)^k (b/a)^{pk}}{k!} \Gamma \left(\frac{pk + p + q}{q} \right). \end{aligned}$$

Случай $q < p$ рассматривается аналогично. Случай $p = q$ напрямую следует из определения гамма-функции. Лемма доказана.

Теорема 1. Пусть негативный фактор λ и позитивный фактор μ имеют распределение Вейбулла $W(q, \theta)$ и $W(p, \alpha)$ соответственно, причем λ и μ независимы. Тогда при $x > 0$ плотность, функция распределения и моменты индекса баланса $\rho = \lambda/\mu$ имеют вид:

$$\begin{aligned} f_\rho(x) &= \begin{cases} \frac{q\alpha^q x^{q-1}}{\theta^q} \text{Ge}_{q/p, (p+q)/p} \left(- \left(\frac{\alpha x}{\theta} \right)^q \right), & q < p; \\ \frac{p\theta^p}{\alpha^p x^{p+1}} \text{Ge}_{p/q, (p+q)/q} \left(- \left(\frac{\alpha x}{\theta} \right)^{-p} \right), & p < q; \end{cases} \\ F_\rho(x) &= \begin{cases} \frac{q}{p} \left(\frac{\alpha x}{\theta} \right)^q \text{Ge}_{q/p, q/p} \left(- \left(\frac{\alpha x}{\theta} \right)^q \right), & q < p; \\ \int_{(\alpha x/\theta)^{-p}}^\infty \text{Ge}_{p/q, (p+q)/q}(-z) dz, & p < q; \end{cases} \\ E\rho^z &= \left(\frac{\theta}{\alpha} \right)^z \Gamma \left(1 + \frac{z}{q} \right) \Gamma \left(1 - \frac{z}{p} \right), \quad -q < z < p. \end{aligned}$$

При $p = q$ распределение индекса баланса ρ совпадает с распределением Дагума [3] с параметрами $(p, \alpha/\theta, 1)$.

Доказательство. Поскольку

$$f_{\rho}(x) = \int_0^{\infty} \frac{pqx^{q-1}y^{p+q-1}}{\alpha^p\theta^q} e^{-(xy/\theta)^q} e^{-(y/\alpha)^p} dy,$$

вид плотности $f_{\rho}(x)$ вытекает из леммы 1 для всех $p, q > 0$.

Найдем функцию распределения ρ . В случае $q < p$ имеем

$$\begin{aligned} F_{\rho}(x) &= \sum_{k=0}^{\infty} \frac{q(-1)^k \alpha^{q+qk}}{\theta^{q+qk} k!} \Gamma\left(\frac{qk+p+q}{p}\right) \int_0^x y^{qk+q-1} dy = \\ &= \sum_{k=0}^{\infty} \frac{q(-1)^k (\alpha x)^{q+qk}}{(q+qk)\theta^{q+qk} k!} \Gamma\left(\frac{qk+p+q}{p}\right) = \\ &= \sum_{k=0}^{\infty} \frac{q(-1)^k (\alpha x)^{q+qk}}{p\theta^{q+qk} k!} \Gamma\left(\frac{qk+q}{p}\right). \end{aligned}$$

Для $p < q$ имеем

$$\begin{aligned} F_{\rho}(x) &= \frac{p\theta^p}{\alpha^p} \int_0^x \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k \theta^{pk}}{\alpha^{pk} k!} \Gamma\left(\frac{pk+p+q}{q}\right) y^{-pk-p-1} dy = \\ &= \int_{(\alpha x/\theta)^{-p}}^{\infty} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-z)^k}{k!} \Gamma\left(\frac{pk+p+q}{q}\right) dz. \end{aligned}$$

Соотношение для моментов ρ следует из независимости случайных величин λ и μ и того факта, что для вейбулловского распределения

$$E\lambda^z = \theta^z \Gamma\left(1 + \frac{z}{q}\right), \quad z > -q.$$

Теорема доказана.

3 Заключение

Результаты статьи обобщают полученные ранее утверждения для вероятностных характеристик индекса баланса факторов, имеющих априорные распределения Вейбулла, Рэля и экспоненциальные [1, 2], и в очередной раз демонстрируют

удобство применения гамма-экспоненциальной функции для анализа масштабных смесей частных случаев обобщенного гамма-распределения.

Литература

1. *Кудрявцев А. А.* Байесовские модели баланса // Информатика и её применения, 2018. Т. 12. Вып. 3. С. 18–27.
2. *Кудрявцев А. А., Титова А. И.* Гамма-экспоненциальная функция в байесовских моделях массового обслуживания // Информатика и её применения, 2017. Т. 11. Вып. 4. С. 104–108.
3. *Dagum C.* A new model of personal income-distribution-specification and estimation // Econ. Appl., 1977. Vol. 30. No. 3. P. 413–437.

Поступила в редакцию 28.12.18

A PRIORI WEIBULL DISTRIBUTION IN BAYESIAN BALANCE MODELS

E. N. Arutyunov¹, A. A. Kudryavtsev², and A. I. Titova²

¹Institute of Informatics Problems, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation

²Faculty of Computational Mathematics and Cybernetics, M. V. Lomonosov Moscow State University, 1-52 Leninskiye Gory, GSP-1, Moscow 119991, Russian Federation

Abstract: This paper is devoted to Bayesian balance models, which imply separation of factors affecting the system under study, into positive, i. e., contributing to functioning, and negative, i. e., impeding functioning. To study the effectiveness of the system, the balance index, equal to the ratio of negative and positive factors, is concerned. It is assumed that the factors depend on environment, and it is not possible to determine their exact values due to lack of time and material resources, imperfect measuring equipment, etc.; however, the laws governing factors’ alterations remain unchanged and are known *a priori* to the researcher. Under these conditions, it is reasonable to use the Bayesian method, which implies randomization of the initial parameters and, hence, the balance index, under the assumption that *a priori* distributions of the factors are known. In this paper, the probabilistic characteristics of the balance index in the case when both factors have *a priori* Weibull distribution are concerned. This work continues a series of studies on the application of Bayesian methods in problems of mass service and reliability.

Keywords: Bayesian approach; balance models; mixed distributions; Weibull distribution; gamma-exponential function

DOI: 10.14357/08696527190114

Acknowledgments

The work was partly supported by the Russian Foundation for Basic Research (project 17-07-00577).

References

1. Kudryavtsev, A. A. 2018. Bayesovskie modeli balansa [Bayesian balance models]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 12(3):18–27.
2. Kudryavtsev, A. A., and A. I. Titova. 2017. Gamma-eksponentsial'naya funktsiya v bayesovskikh modelyakh massovogo obsluzhivaniya [Gamma-exponential function in Bayesian queuing models]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 11(4):104–108.
3. Dagum, C. 1977. A new model of personal income-distribution-specification and estimation. *Econ. Appl.* 30(3):413–437.

Received December 28, 2018

Contributors

Arutyunov Evgeny N. (b. 1952) — Candidate of Science (PhD) in physics and mathematics, senior scientist, Institute of Informatics Problems, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation; enapoleon@mail.ru

Kudryavtsev Alexey A. (b. 1978) — Candidate of Science (PhD) in physics and mathematics, associate professor, Department of Mathematical Statistics, Faculty of Computational Mathematics and Cybernetics, M. V. Lomonosov Moscow State University, 1-52 Leninskiye Gory, GSP-1, Moscow 119991, Russian Federation; nubigena@mail.ru

Titova Anastasiia I. (b. 1995) — student, Faculty of Computational Mathematics and Cybernetics, M. V. Lomonosov Moscow State University, 1-52 Leninskiye Gory, GSP-1, Moscow 119991, Russian Federation; onkelskroot@gmail.com

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТРАНСФОРМАЦИИ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ТЕКСТОВ В ЗАДАЧАХ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ЗНАНИЙ*

А. А. Гончаров¹, И. М. Зацман²

Аннотация: Рассматривается задача целенаправленного обнаружения и заполнения лагун в лингвистических типологиях, выступающих как формы представления знаний. Процесс решения этой задачи включает несколько многократно повторяемых стадий, которые в совокупности образуют одну итерацию решения задачи целенаправленного извлечения знаний из параллельных текстов для заполнения лагун. Параллельные тексты как информационный ресурс трансформируются в процессе решения этой задачи. Цель статьи состоит в описании видов информационных трансформаций параллельных текстов, используемых в начале процесса извлечения знаний и заполнения лагун в лингвистических типологиях, а именно: фрагментации текстов на объекты интерпретации и поиска тех из них, которые и являются потенциальными источниками знания для заполнения лагун. В статье процесс фрагментации позиционируется как один из видов информационных трансформаций параллельных текстов.

Ключевые слова: обнаружение лагун; заполнение лагун; лингвистические типологии; извлечение знаний из параллельных текстов; корпусная лингвистика; объекты интерпретации

DOI: 10.14357/08696527190115

1 Введение

Обнаружение и заполнение лагун в типологиях, рассматриваемых как формы представления лингвистических знаний, — это одна из задач проекта по гранту РФФИ, который в настоящее время выполняется в Институте проблем информатики ФИЦ ИУ РАН. Для решения данной задачи предлагается использовать лингвистическое аннотирование параллельных текстов [1–4], которое включает 5 многократно повторяемых стадий. В совокупности они образуют одну итерацию решения задачи целенаправленного извлечения знаний из параллельных текстов для заполнения лагун.

В вышеупомянутом проекте предлагаемый подход к извлечению знаний иллюстрируется на примере уточнения типологии значений немецких модальных

* Работа выполнена в Институте проблем информатики ФИЦ ИУ РАН при частичной поддержке РФФИ (проект 18-07-00192).

¹ Институт проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук, a.gonch48@gmail.com

² Институт проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук, izatsman@yandex.ru

глаголов и их переводных эквивалентов на русском языке [5]. Для проверки реализуемости разработанных методов обнаружения и заполнения лакун используются тексты, полученные из немецко-русского подкорпуса Национального корпуса русского языка (НКРЯ) общим объемом 2,6 млн словоупотреблений, включая 1,4 млн словоупотреблений в оригинальных текстах на немецком языке и 1,2 млн словоупотреблений в их переводах на русский язык.

В работе [6] дано описание вышеупомянутых 5 стадий обнаружения и заполнения лакун:

- (1) определение одной или нескольких языковых единиц (ЯЕ), исследуемых на текущей итерации, а также поиск предложений, которые содержат исследуемые ЯЕ, и соответствующих им переводов в параллельных текстах;
- (2) лингвистическое аннотирование предложений с исследуемыми ЯЕ и их переводов, найденных в параллельных текстах на первой стадии [7];
- (3) семантический анализ незавершенных аннотаций, помеченных рубриками, которые указывают на причины незавершенности аннотирования (в том числе на лакуны в типологии исследуемых ЯЕ);
- (4) доработка аннотаций, включающих рубрики, которые указывают на лакуны в типологии как на причину незавершенности, и пополнение существующей типологии;
- (5) вычисление значений числовых параметров, характеризующих состояние процесса пополнения типологии на момент завершения каждой итерации.

Предложения и их переводы, найденные на первой стадии, будем называть *объектами интерпретации*. Три примера объектов интерпретации, состоящие из одного-двух предложений и их переводов, приведены в виде строк табл. 1.

Эти примеры были найдены по лемме *sollen*, так как до начала поиска было решено на текущей итерации исследовать конструкции с немецким модальным глаголом *sollen* и их переводы на русский язык [5]. Ввиду того что данный глагол обладает ярко выраженной полисемией (в [8] для него описано 13 значений), для уточнения предлагаемой типологии значений были использованы немецко-русские параллельные тексты преимущественно художественных произведений, в которых всего было найдено более двух тысяч объектов интерпретации, содержащих словоформы леммы *sollen* [6].

Используемые в проекте параллельные тексты выровнены (оригинальным предложениям поставлены в соответствие их переводы, см. строки табл. 1), т. е. в процессе формирования НКРЯ была выполнена их фрагментация на строки с предложениями на немецком и русском языке. С точки зрения информационных трансформаций можно говорить о том, что до начала итерационного выполнения 5 перечисленных стадий была осуществлена фрагментация оригинальных текстов и соответствующих им переводов на объекты интерпретации.

Однако после выполнения поиска появляется возможность переформировать любой найденный объект интерпретации путем добавления к нему одной или

Таблица 1 Примеры объектов интерпретации

— “Soll ich Ihr helfen, Jungfer?” sagte ich. — Sie ward rot über und über. [Johann Wolfgang Goethe. Die Leiden des jungen Werther (1774)]	— Помочь вам, девушка? — спросил я. Она вся так и зарделась. [Иоганн Вольфганг Гёте. Страдания юного Вертера (Н. Касаткина, 1954)]
Aber wie sollte ich von hier den Weg finden, der zur Menschenliebe führte? [Hermann Hesse. Peter Camenzind (1904)]	Однако где же мне следовало искать путь, ведущий к человеколюбию? [Герман Гессе. Петер Каменцинд (Р. Эйвадис, 1995)]
— “Es kann sie jeder machen,” versetzte sie drauf, “und sollte denn in der weiten Welt kein Mädchen sein, das die Wünsche Ihres Herzens erfüllte?” [Johann Wolfgang Goethe. Die Leiden des jungen Werther (1774)]	— Так всякий бы рассудил, — ответила она. — Неужто во всём мире не найдётся девушки вам по сердцу? [Иоганн Вольфганг Гёте. Страдания юного Вертера (Н. Касаткина, 1954)]

нескольких строк, расположенных соответственно в тексте и переводе произведения до этого объекта и/или после него. Например, если для интерпретации выбрана некоторая найденная строка, то она может быть объединена с соседними строками (необязательно смежными по тексту книги) в новый объект интерпретации, что обеспечивается за счет расширения границ контекста, необходимого для выполнения аннотирования.

Цель статьи состоит в описании информационных трансформаций параллельных текстов, обеспечивающих поиск и переформирование именно тех объектов интерпретации, которые являются потенциальными источниками знания для уточнения типологии в процессе обнаружения и заполнения лакун.

2 Формирование и поиск объектов интерпретации

Формирование объектов интерпретации с исследуемыми ЯЕ выполняется в три этапа:

- (1) выравнивание параллельных текстов;
- (2) поиск объектов интерпретации с исследуемыми ЯЕ, которые являются потенциальными источниками знания для уточнения типологии (первая стадия итерации);
- (3) переформирование найденных объектов интерпретации (посредством расширения границ объекта интерпретации за счет других строк таблицы, содержащих текст и перевод произведения), если для аннотирования требуется более широкий контекст (вторая стадия итерации).

Результатом первого этапа формирования объектов интерпретации являются пары фрагментов текста, включающие предложения оригинала и соответствующие им переводы. В рамках надкорпусной базы данных (НБД) на текущий момент используются полные тексты произведений, которые визуальным образом представлены в форме таблицы. Каждая строка таблицы содержит фрагмент текста оригинала (в левом столбце) и соответствующий ему фрагмент текста перевода (в правом столбце), фрагменты же в большинстве случаев состоят из одного предложения [9, 10]. Если в табл. 1 убрать названия произведений, имена авторов и переводчиков, то ее строки будут примерами результатов выполнения первого этапа.

Кратко опишем технологию выравнивания, исходя из того, что тексты оригинала и перевода уже представлены в электронном варианте. Сначала тексты проверяются на предмет опечаток, что можно сделать, например, при помощи функции «Правописание» MS Word. Затем в текстах удаляется нумерация страниц, знаки табуляции заменяются пробелами, разрывы страниц — знаками абзаца, лишние пробелы и мягкие переносы удаляются, знаки тире унифицируются. Цель этих операций — нормализация знаков форматирования, что в дальнейшем поможет избежать сбоев при использовании программы выравнивания параллельных текстов. Необходимо также учитывать особенности конкретных языков. Так, в текстах на французском языке нередко приходится заменять сочетание букв «oe» на «œ».

При подготовке текстов к выравниванию встает вопрос о необходимости сохранения и редактирования постраничных сносок. Если принимается решение об их сохранении, то текст сноски заключается в фигурные скобки и помещается после предложения, к которому он относится. При этом неинформативные сноски, как правило, удаляются.

После всех вышеперечисленных операций выполняется выравнивание предложений оригинального текста и его перевода при помощи программы «Евклид» [11], созданной на основе находящейся в открытом доступе программы выравнивания текстов HunAlign [12]. Программа «Евклид» позволяет установить соответствие между одним или несколькими предложениями текста оригинала и их переводами. В автоматическом режиме она формирует таблицу с полным текстом произведения в левом столбце и его переводом в правом.

Полученная таблица может содержать ошибки выравнивания, которые исправляются вручную при помощи нескольких команд. Во-первых, это перенос фрагмента текста в таблице на строку выше или ниже. Во-вторых, это добавление пустой строки в таблицу или, напротив, удаление лишней (пустой) строки. В-третьих, это распределение фрагментов текста оригинала и перевода, помещенных в ходе автоматического выравнивания в одну строку, по двум или более новым строкам, а также объединение фрагментов текста из нескольких строк. Следует отметить, что программа «Евклид» в автоматическом режиме выделяет красным цветом те фрагменты, где с большой вероятностью могут присутствовать ошибки выравнивания. Таким образом, с помощью этой программы

линейный текст и его перевод трансформируются в таблицу, состоящую из двух столбцов. Предложения текста оригинала распределяются по строкам в левом столбце этой таблицы (по одному или более предложений в строке), а перевод этих предложений — в правом.

После информационной трансформации текста произведения и его перевода в таблицу выполняется разметка выровненных текстов программами Яндекса [13, 14] согласно Морфологическому стандарту НКРЯ. Перечень тегов, используемых при разметке, приведен на странице по адресу: <http://www.ruscorpora.ru/corpora-morph.html>. Морфологическая разметка представляет собой информационную трансформацию, которая преобразует таблицу выровненных текстов в таблицу морфологически размеченных текстов произведения и его перевода. Например, три первые слова оригинального текста первого объекта интерпретации в табл. 1 (Soll ich Ihr) будут размечены следующим образом:

```
<w>
<ana lex="soll" sem="" disamb="yes" gr="S,n,nom,norm,sg" sem2=""/>
<ana lex="soll" sem="" disamb="yes" gr="S,dat,n,norm,sg" sem2=""/>
<ana lex="soll" sem="" disamb="yes" gr="S,acc,n,norm,sg" sem2=""/>
<ana lex="sollen" sem="" gr="V,1p,act,indic,intr,norm,praes,sg" sem2=""/>
<ana lex="sollen" sem="" gr="V,3p,act,indic,intr,norm,praes,sg"
sem2=""/>Soll</w>
<w>
<ana lex="ich" sem="" disamb="yes" gr="SPRO,1p,nom,norm,sg" sem2=""/>ich</w>
<w>
<ana lex="ihr" sem="" disamb="yes" gr="SPRO,2p,nom,norm,pl" sem2=""/>
<ana lex="sie" sem="" gr="SPRO,3p,dat,f,norm,sg" sem2=""/>
<ana lex="ihr" sem="" gr="APRO,m,nom,norm,sg" sem2=""/>
<ana lex="ihr" sem="" gr="APRO,n,nom,norm,sg" sem2=""/>
<ana lex="ihr" sem="" gr="APRO,acc,n,norm,sg" sem2=""/>Ihr</w>
```

Здесь приведен фрагмент морфологически размеченного текста с неснятой грамматической омонимией. Это означает, что для каждой словоформы перечислены все возможные варианты интерпретации. Видимые пользователю единицы для наглядности выделены в примере полужирным шрифтом, а леммы, которые могут соответствовать каждой из этих трех словоформ, — подчеркиванием; кроме того, сплошной текст для удобства разбит на строки.

Так, для словоформы *soll* представлено 5 вариантов интерпретации.

Три из них соответствуют лемме *Soll* с разными наборами морфологических характеристик:

- (1) существительное (S), средний род (n), именительный падеж (nom), отсутствие особенностей словоформы (norm), единственное число (sg);
- (2) существительное (S), дательный падеж (dat), средний род (n), отсутствие особенностей словоформы (norm), единственное число (sg);

- (3) существительное (S), винительный падеж (acc), средний род (n), отсутствие особенностей словоформы (nom), единственное число (sg).

Два других варианта разметки включают морфологические характеристики омонимичных форм модального глагола *sollen*:

- (4) глагол (V), первое лицо (1p), действительный залог (act), изъявительное наклонение (indic), непереходность (intr), отсутствие особенностей словоформы (nom), настоящее время (praes), единственное число (sg);
- (5) глагол (V), третье лицо (3p), действительный залог (act), изъявительное наклонение (indic), непереходность (intr), отсутствие особенностей словоформы (nom), настоящее время (praes), единственное число (sg).

В корпусе со снятой омонимией для данного словоупотребления был бы сохранен лишь вариант разметки под номером 4.

Для словоформы *ich* вариант разметки лишь один (ввиду отсутствия омонимичных словоформ): местоимение-существительное (SPRO), первое лицо (1p), именительный падеж (nom), отсутствие особенностей словоформы (nom), единственное число (sg).

Для словоформы *Ihr* представлены 5 вариантов интерпретации для трех лемм.

Один вариант для леммы *ihr*:

- (1) местоимение-существительное (SPRO), второе лицо (2p), именительный падеж (nom), отсутствие особенностей словоформы (nom), множественное число (pl).

Один вариант для леммы *sie*:

- (2) местоимение-существительное (SPRO), третье лицо (3p), дательный падеж (dat), женский род (f), отсутствие особенностей словоформы (nom), единственное число (sg).

Три варианта для леммы *ihr*, омонимичной первой:

- (3) местоимение-прилагательное (APRO), мужской род (m), именительный падеж (nom), отсутствие особенностей словоформы (nom), единственное число (sg);
- (4) местоимение-прилагательное (APRO), средний род (n), именительный падеж (nom), отсутствие особенностей словоформы (nom), единственное число (sg);
- (5) местоимение-прилагательное (APRO), винительный падеж (acc), средний род (n), отсутствие особенностей словоформы (nom), единственное число (sg).

В корпусе со снятой омонимией для данного словоупотребления был бы сохранен лишь вариант разметки под номером 2.

Таблица 2 Примеры результатов поиска пар фрагментов текста по лемме *sollen*

Номер строки	Оригинальный текст	Перевод
1479	Oder meinst du, ich soll's?	Или ты думаешь — должен?
1582	Soll ich es dir zeigen?	Показать тебе?
1636	Du sollst nur damit spielen, so wie ich es dir erklärt habe.	Только играть должна ты со всем этим так, как я тебе объяснил.
1660	“Ich glaube,” erwiderte er sanft, “wir sollten einmal ernsthaft miteinander reden, Kleine, damit du lernst, worauf es ankommt.”	— Я думаю, что нам надо серьезно поговорить, — сказал он. — Ты должна понять, что к чему.

Аналогичным образом размечается и перевод на русский язык. При этом сохраняется выравнивание, полученное в результате предыдущей информационной трансформации. Морфологическая разметка текстов дает возможность осуществлять поиск не только по точной форме, но также по лемме или по грамматическим характеристикам.

Морфологически размеченные тексты загружаются в НБД, функциональность которой, включая поисковые возможности, описана на примерах нескольких категорий ЯЕ в работах [15–22]. Приведем пример поиска объектов интерпретации в НБД, в которую были загружены выровненные немецко-русские параллельные тексты общим объемом 2,6 млн словоупотреблений. Таблица загруженных текстов состоит из 83 190 строк, включая более двух тысяч объектов интерпретации [6], содержащих словоформы леммы *sollen*, на примере которой иллюстрируются поисковые возможности НБД.

Для извлечения объектов интерпретации в НБД реализован поиск строк в таблице как по словоформам, так и по леммам. Поиск можно вести как по тексту одного произведения, так и по всем загруженным текстам. Например, если задать поиск строк во всех произведениях по лемме *sollen*, то будет найдена 2041 строка с исследуемой ЯЕ, 4 из которых приведены в табл. 2¹.

Найденные строки по умолчанию являются объектами интерпретации, содержащими исследуемые ЯЕ и представляющими собой потенциальные источники знания для уточнения типологии.

3 Расширение границ объектов интерпретации

Лингвист, выполняющий аннотирование, может при необходимости переформировать найденный объект интерпретации, объединяя строки таблицы. Примером может послужить строка № 1479 (см. табл. 2). Содержащийся в ней фрагмент текста недостаточен для формирования аннотации, так как он не по-

¹Все четыре объекта интерпретации из книги *М. Энде. Момо* (перевод Ю. И. Коринец, 1982).

Таблица 3 Объединение соседних строк в один объект интерпретации

1476	Ich weiß wirklich nicht, was ich tun soll.	Я правда не знаю, что делать.
1477	Aber alle machen's doch heute so.	Но сегодня все так поступают.
1478	Warum soll ich allein es anders machen?	Почему я должен поступать по-иному?
1479	Oder meinst du, ich soll's?	Или ты думаешь — должен?

звояет описать функционирование модального глагола *sollen* (словоформа *soll*) и определить его семантику. Поэтому в данном случае для обоснования выбора одного из словарных значений исследуемой ЯЕ в процессе аннотирования необходимо расширить контекст за счет строк 1476–1478, с которыми строка 1479 тесно связана по смыслу, и таким образом сформировать новый объект интерпретации (включающий все строки табл. 3). Это даст возможность определить релевантное значение глагола *sollen* — обязанность что-либо делать по чьему-либо указанию, по закону, по правилам и т. п. [8].

Таким образом, при недостаточности контекста в процессе аннотирования может возникать потребность в его расширении, в первую очередь для определения значения исследуемой ЯЕ и особенностей ее функционирования. В этих случаях возможность такой информационной трансформации выровненных и размеченных текстов оригинала и перевода в НБД, как расширение границ объектов интерпретации, сложно переоценить. Эта функция широко используется в процессе лингвистического аннотирования не только модальных глаголов, но и других категорий ЯЕ, например коннекторов, в сферу действия которых может входить не только часть предложения или отдельное предложение, но и фрагмент текста, включающий два и более предложений [23, с. 17–20].

Отметим, что в описанном выше расширении контекста для строки 1479 в расширенный объект интерпретации попали еще два случая употребления исследуемой ЯЕ (словоформа *soll* в строках 1476 и 1478). И если контекст строки 1476 достаточен для определения значения глагола *sollen* (выражение неуверенности, растерянности в главных и придаточных вопросительных предложениях с вопросительными словами [8]), то для аннотирования исследуемой ЯЕ в строке 1478 снова возникает необходимость расширения контекста. Расширенный объект интерпретации будет включать строки 1476–1478. Таким образом, этот объект интерпретации будет вложен в объект интерпретации, включающий строки 1476–1479. Однако в общем случае расширенные объекты интерпретации могут пересекаться по составляющим их строкам и тогда границы таких объектов интерпретации нельзя описать, используя расширяемый язык разметки (eXtensible Markup Language — XML)¹. Для информационной трансформации выровненных и размеченных текстов оригинала и перевода, состоящей в расши-

¹Согласно синтаксическим правилам XML любой элемент, начинающийся внутри другого элемента, должен заканчиваться внутри элемента, в котором он начался.

рении границ объектов интерпретации, используются функции НБД, описанные в работе [24].

4 Заключение

Подход к извлечению знаний из параллельных текстов, используемый в проекте, предполагает, что сначала выполняется ряд информационных трансформаций этих текстов, включая фрагментацию на объекты интерпретации и поиск тех из них, которые и являются потенциальными источниками знания для формирования и уточнения лингвистических типологий. В статье рассмотрены следующие информационные трансформации параллельных текстов:

- (1) преобразование линейного текста произведения и его перевода в таблицу, состоящую из двух столбцов. Предложения текста произведения распределяются по строкам в левом столбце этой таблицы (по одному или более предложений в строке). Перевод предложений из левого столбца строки размещается в правом столбце той же строки. В результате такой трансформации соответствие оригинальных предложений и их переводов, основанное на эквивалентности смыслового содержания, фиксируется в табличной форме;
- (2) преобразование таблицы выровненных текстов в таблицу текстов, размеченных согласно Морфологическому стандарту НКРЯ. При этом сохраняется выравнивание, полученное в результате первой информационной трансформации. Разметка, включенная в тексты, дает возможность искать объекты интерпретации не только в точной форме, но также по лемме и по грамматическим характеристикам (в оригинальном тексте и/или в его переводе);
- (3) переформирование объектов интерпретации, являющихся потенциальными источниками знания для уточнения лингвистических типологий в процессе обнаружения и заполнения лагун, которое обеспечивается за счет расширения границ контекста исследуемых ЯЕ, необходимого для выполнения аннотирования ЯЕ и их контекстов.

В заключение отметим, что используемый в проекте метод аннотирования объектов интерпретации, содержащих исследуемые ЯЕ, характеризуется тем, что допускает возможность незавершенности процесса аннотирования. Именно эта возможность и позволяет фиксировать лагуны в уточняемой типологии и заполнять их в процессе доработки незавершенных аннотаций [6, 24].

Литература

1. Дурново А. А., Зацман И. М., Лоцилова Е. Ю. Кросслингвистическая база данных для аннотирования логико-семантических отношений в тексте // Системы и средства информатики, 2016. Т. 26. № 4. С. 124–137.

2. *Зацман И. М., Мамонова О. С., Щурова А. Ю.* Обратимость и альтернативность генерализации моделей перевода коннекторов в параллельных текстах // Системы и средства информатики, 2017. Т. 27. № 2. С. 125–142.
3. *Зацман И. М., Кружков М. Г., Лощилова Е. Ю.* Методы анализа частотности моделей перевода коннекторов и обратимость генерализации статистических данных // Системы и средства информатики, 2017. Т. 27. № 4. С. 164–176.
4. *Kruzhhkov M. G.* Approaches to annotation of discourse relations in linguistic corpora // Информатика и её применения, 2017. Т. 11. Вып. 4. С. 118–125.
5. *Добровольский Д. О., Зализняк Анна А.* Немецкие конструкции с модальными глаголами и их русские соответствия: проект надкорпусной базы данных // Компьютерная лингвистика и интеллектуальные технологии: По мат-лам Междунар. конф. «Диалог». — М.: РГГУ, 2018. Вып. 17(24). С. 172–184.
6. *Зацман И. М.* Стадии целенаправленного извлечения знаний, имплицированных в параллельных текстах // Системы и средства информатики, 2018. Т. 28. № 3. С. 175–188.
7. *Handbook of linguistic annotation / Eds. N. Ide, J. Pustejovsky.* — Dordrecht, The Netherlands: Springer Science + Business Media, 2017. 1468 p.
8. *Немецко-русский словарь: актуальная лексика / Под ред. Д. О. Добровольского.* — М.: Лексрус, 2019 (в печати).
9. *Добровольский Д. О., Кретов А. А., Шаров С. А.* Корпус параллельных текстов // Научно-техническая информация. Серия 2: Информационные процессы и системы, 2005. № 6. С. 16–27.
10. *Loiseau S., Sitchinava D. V., Zalizniak Anna A., Zatsman I. M.* Information technologies for creating the database of equivalent verbal forms in the Russian-French multivariant parallel corpus // Информатика и её применения, 2013. Т. 7. Вып. 2. С. 100–109.
11. *Сичинава Д. В.* Параллельные тексты в составе Национального корпуса русского языка: новые направления развития и результаты // Труды Института русского языка им. В. В. Виноградова, 2015. № 6. С. 194–235.
12. *Varga D., Németh L., Halácsy P., Kornai A., Trón V., Nagy V.* Parallel corpora for medium density languages // Conference (International) on Recent Advances in Natural Language Processing Proceedings. — Shoumen, Bulgaria: INCOMA Ltd., 2005. P. 590–596.
13. *Segalovich I.* A fast morphological algorithm with unknown word guessing induced by a dictionary for a Web Search Engine // Conference (International) on Machine Learning; Models, Technologies and Applications Proceedings. — Las Vegas, NV, USA: CSREA Press, 2003. P. 273–280.
14. *Зобнин А. И., Носырев Г. В.* Морфологический анализатор MyStem 3.0 // Труды Института русского языка им. В. В. Виноградова, 2015. № 6. С. 300–310.
15. *Zalizniak Anna A., Sitchinava D. V., Loiseau S., Kruzhhkov M., Zatsman I. M.* Database of equivalent verbal forms in a Russian-French multivariant parallel corpus // Conference (International) on Artificial Intelligence Proceedings. — Las Vegas, NV, USA: CSREA Press, 2013. Vol. 1. P. 101–107.
16. *Kruzhhkov M. G., Buntman N. V., Loshchilova E. Ju., Sitchinava D. V., Zalizniak Anna A., Zatsman I. M.* A database of Russian verbal forms and their French

- translation equivalents // Компьютерная лингвистика и интеллектуальные технологии: по мат-лам ежегодной Междунар. конф. «Диалог». — М.: РГГУ, 2014. Вып. 13(20). С. 275–287.
17. Бунтман Н. В., Зализняк Анна А., Зацман И. М., Кружков М. Г., Лощилова Е. Ю., Сичинава Д. В. Информационные технологии корпусных исследований: принципы построения кросслингвистических баз данных // Информатика и её применения, 2014. Т. 8. Вып. 2. С. 98–110.
 18. Попкова Н. А., Инькова О. Ю., Зацман И. М., Кружков М. Г. Методика построения моноэквиваленций в надкорпусной базе данных коннекторов // Задачи современной информатики: Тр. Второй молодежной научн. конф. — М.: ФИЦ ИУ РАН, 2015. С. 143–153.
 19. Зализняк Анна А., Зацман И. М., Инькова О. Ю., Кружков М. Г. Надкорпусные базы данных как лингвистический ресурс // Корпусная лингвистика-2015: Тр. Междунар. конф. — СПб.: СПбГУ, 2015. С. 211–218.
 20. Кружков М. Г. Информационные ресурсы контрастивных лингвистических исследований: электронные корпуса текстов // Системы и средства информатики, 2015. Т. 25. № 2. С. 140–159.
 21. Инькова О. Ю., Кружков М. Г. Надкорпусные русско-французские базы данных глагольных форм и коннекторов // *Lingue slave a confronto* / Eds. O. Inkoва, A. Trovesi. — Bergamo: Bergamo University Press, 2016. P. 365–392.
 22. Зализняк Анна А., Кружков М. Г. База данных безличных глагольных конструкций русского языка // Информатика и её применения, 2016. Т. 10. Вып. 4. С. 132–141.
 23. Инькова-Манзотти О. Ю. Коннекторы противопоставления во французском и русском языках (сопоставительное исследование). — М.: Информэлектро, 2001. 434 с.
 24. Зацман И. М. Целенаправленное развитие систем лингвистических знаний: выявление и заполнение лагун // Информатика и её применения, 2019. Т. 13. Вып. 1. С. 91–98.

Поступила в редакцию 15.02.19

INFORMATION TRANSFORMATIONS OF PARALLEL TEXTS IN KNOWLEDGE EXTRACTION

A. A. Goncharov and I. M. Zatsman

Institute of Informatics Problems, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119133, Russian Federation

Abstract: The paper examines the task of goal-oriented discovery and filling of lacunas in linguistic typologies considered as forms of knowledge representation. The process of solving this task includes several repeated stages which collectively form one iteration of the proposed solution to the task of goal-oriented knowledge discovery in parallel texts required to fill the lacunas. Parallel texts as an information resource are transformed in the process of solving this task. The purpose of the paper is to describe the types of information transformations of parallel texts that are used during early stages of the process of knowledge

discovery and filling of lacunas in linguistic typologies. As a part of knowledge discovery, first, the parallel texts are fragmented into objects of interpretation and then, the search for potential sources of knowledge capable to fill the lacunas is performed. This paper considers this fragmentation process as one of the information transformation types of parallel texts.

Keywords: discovery of lacunas; filling of lacunas; linguistic typology; knowledge extraction from parallel texts; corpus linguistics; objects of interpretation

DOI: 10.14357/08696527190115

Acknowledgments

The work was performed at the Institute of Informatics Problems, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences with partial financial support of the Russian Foundation for Basic Research (project 18-07-00192).

References

1. Durnovo, A. A., I. M. Zatsman, and E. Yu. Loshchilova. 2016. Krosslingvisticheskaya baza dannykh dlya annotirovaniya logiko-semanticheskikh otnosheniy v tekste [Cross-lingual database for annotating logical-semantic relations in the text]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 26(4):124–137.
2. Zatsman, I. M., O. S. Mamonova, and A. Yu. Shchurova. 2017. Obratimost' i al'ternativnost' generalizatsii modeley perevoda konnektorov v parallel'nykh tekstakh [Reversibility and alternativeness of generalization of connectives translations models in parallel texts]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 27(2):125–142.
3. Zatsman, I. M., M. G. Kruzhkov, and E. Yu. Loshchilova. 2017. Metody analiza chastotnosti modeley perevoda konnektorov i obratimost' generalizatsii statisticheskikh dannykh [Methods of frequency analysis of connectives translations and reversibility of statistical data generalization]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 27(4):164–176.
4. Kruzhkov, M. G. 2017. Approaches to annotation of discourse relations in linguistic corpora. *Informatika i ee primeneniya — Inform. Appl.* 11(4):118–125.
5. Dobrovol'skiy, D. O., and Anna A. Zaliznyak. 2018. Nemetskie konstruksii s modal'nymi glagolami i ikh russkie sootvetstviya: proekt nadkorpusnoy bazy dannykh [German constructions with modal verbs and their Russian correlates: A supracorpora database project]. *Komp'yuternaya lingvistika i intellektual'nye tekhnologii. Po mat-lam ezhegodnoy Mezhdunar. konf. “Dialog.”* [Computational Linguistics and Intellectual Technologies. Papers from the Annual Conference (International) “Dialogue”]. Moscow: RGGU. 17(24):172–184.
6. Zatsman, I. M. 2018. Stadii tselenapravlennoogo izvlecheniya znaniy, implitsirovannykh v parallel'nykh tekstakh [Stages of goal-oriented discovery of knowledge implied in parallel texts]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 28(3):175–188.

7. Ide, N., and J. Pustejovsky, eds. 2017. *Handbook of linguistic annotation*. Dordrecht, The Netherlands: Springer Science + Business Media. 1468 p.
8. Dobrovol'skiy, D. O., ed. 2019 (in press). *Nemetsko-russkiy slovar': aktual'naya leksika* [German-Russian dictionary: Actual vocabulary]. Moscow: Leksrus.
9. Dobrovol'skiy, D. O., A. A. Kretov, and S. A. Sharov. 2005. Korpus parallel'nykh tekstov [Corpus of parallel texts]. *Automatic Documentation Math. Linguistics* 6:16–27.
10. Loiseau, S., D. V. Sitchinava, Anna A. Zalizniak, and I. M. Zatsman. 2013. Information technologies for creating the database of equivalent verbal forms in the Russian-French multivariant parallel corpus. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 7(2):100–109.
11. Sitchinava, D. V. 2015. Parallel'nye teksty v sostave Natsional'nogo korpusa russkogo yazyka: novye napravleniya razvitiya i rezul'taty [Parallel texts within the Russian National Corpus: New directions and results]. *Trudy Instituta russkogo yazyka im. V. V. Vinogradova* [Proceedings of the V. V. Vinogradov Russian Language Institute]. 6:194–235.
12. Varga D., L. Németh, P. Halácsy, A. Kornai, V. Trón, and V. Nagy. 2005. Parallel corpora for medium density languages. *Conference (International) on Recent Advances in Natural Language Processing Proceedings*. Shoumen, Bulgaria: INCOMA Ltd. 590–596.
13. Segalovich, I. 2003. A fast morphological algorithm with unknown word guessing induced by a dictionary for a Web Search Engine. *Conference (International) on Machine Learning: Models, Technologies and Applications Proceedings*. Las Vegas, NV: CSREA Press. 273–280.
14. Zobnin, A. I., and G. V. Nosyrev. 2015. Morfologicheskii analizator MyStem 3.0 [Morphological analyzer MyStem 3.0]. *Trudy Instituta russkogo yazyka im. V. V. Vinogradova* [Proceedings of the V. V. Vinogradov Russian Language Institute] 6:300–310.
15. Zaliznyak, Anna A., D. V. Sitchinava, S. Loiseau, M. Kruzhkov, and I. M. Zatsman. 2013. Database of equivalent verbal forms in a Russian-French multivariant parallel corpus. *Conference (International) on Artificial Intelligence Proceedings*. Las Vegas, NV: CSREA Press. 1:101–107.
16. Kruzhkov, M. G., N. V. Buntman, E. Ju. Loshchilova, D. V. Sitchinava, Anna A. Zalizniak, and I. M. Zatsman. 2014. A database of Russian verbal forms and their French translation equivalents. *Komp'yuternaya lingvistika i intellektual'nye tekhnologii: po mat-lam ezhegodnoy Mezhdunar. konf. "Dialog"* [Computational Linguistics and Intellectual Technologies. Papers from the Annual Conference (International) "Dialogue"]. Moscow: RGGU. 13(20):275–287.
17. Buntman, N. V., Anna A. Zaliznyak, I. M. Zatsman, M. G. Kruzhkov, E. Yu. Loshchilova, and D. V. Sitchinava. 2014. Informatsionnye tekhnologii korpusnykh issledovaniy: printsipy postroeniya krosslingvisticheskikh baz dannykh [Information technologies for corpus studies: Underpinnings for cross-linguistic database creation]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 8(2):98–110.
18. Popkova, N. A., O. Yu. Inkova, I. M. Zatsman, and M. G. Kruzhkov. 2015. Metodika postroeniya monoekvivalentsiy v nadkorpusnoy baze dannykh konnektorov [Methodology of constructing mono-equivalences in the supracorpora database of connectors]. *Tr. 2-y molodezhnoy nauchn. konf. "Zadachi sovremennoy informatiki"* [2nd Scientific

- ic Conference “Problems of Modern Informatics” Proceedings]. Moscow: FRC CSC RAS. 143–153.
19. Zaliznyak, Anna A., I. M. Zatsman, O. Yu. Inkova, and M. G. Kruzhkov. 2015. Nadkorporusnye bazy dannyykh kak lingvisticheskiy resurs [Supracorpora databases as linguistic resource]. *Conference (International) “Corpus Linguistics-2015” Proceedings*. St. Petersburg: St. Petersburg State University. 211–218.
 20. Kruzhkov, M. G. 2015. Informatsionnye resursy kontrastivnykh lingvisticheskikh issledovaniy: elektronnye korpusa tekstov [Information resources for contrastive studies: Electronic text corpora]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 25(2):140–159.
 21. Inkova, O. Yu., and M. G. Kruzhkov. 2016. Nadkorporusnye russko-frantsuzskie bazy dannyykh glagol’nykh form konnektorov [Supracorpora databases of Russian and French verbal forms and connectors]. *Lingue slave a confronto*. Eds. O. Inkova and A. Trovesi. Bergamo: Bergamo University Press. 365–392.
 22. Zaliznyak, Anna A., and M. G. Kruzhkov. 2016. Baza dannyykh bezlichnykh glagol’nykh konstruktsiy russkogo yazyka [Database of Russian impersonal verbal constructions]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 10(4):132–141.
 23. Inkova-Manzotti, O. Yu. 2001. *Konnektory protivopostavleniya vo frantsuzskom i russkom yazykakh (sopostavitel’noe issledovanie)* [Connectives of opposition in French and Russian (comparative research)]. Moscow: Informelektro. 434 p.
 24. Zatsman, I. M. 2019. Tselenapravlennoe razvitie sistem lingvisticheskikh znaniy: vyyavlenie i zapolnenie lakun [Goal-oriented development of linguistic knowledge systems: Identifying and filling lacunae]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 13(1):91–98.

Received February 15, 2019

Contributors

Goncharov Alexander A. (b. 1994) — junior scientist, Institute of Informatics Problems, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation; a.gonch48@gmail.com

Zatsman Igor M. (b. 1952) — Doctor of Science in technology, Head of Department, Institute of Informatics Problems, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation; izatsman@yandex.ru

ЕДИНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПОДДЕРЖКИ КОНКРЕТНО-ИСТОРИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

И. М. Адамович¹, О. И. Волков²

Аннотация: Статья посвящена дальнейшему развитию технологии поддержки конкретно-исторических исследований, построенной на базе системы автоматического извлечения фактов из текстов историко-биографической направленности Т-парсер и ориентированной на широкий круг не являющихся профессиональными историками и биографами пользователей. Развитие осуществляется за счет интеграции в технологию инструментального комплекса π-Фактограф, ориентированного на поддержку исследовательского процесса. Приведено описание возможностей инструментального комплекса, обосновано его включение в технологию. Задача интеграции решается за счет анализа моделей данных, лежащих в основе как системы Т-парсер, так и комплекса π-Фактограф. Описываются концепции биографического факта и фактоподобного высказывания, обосновывается их единство. По результатам анализа строится и подробно описывается единая модель данных, позволяющая осуществить совместную работу элементов единой технологии. Обосновывается вывод о востребованности единой технологии поддержки конкретно-исторических исследований в связи со все увеличивающимся общественным интересом к семейной истории.

Ключевые слова: конкретно-историческое исследование; распределенная технология; семантическая сеть; модель данных; историко-биографический факт

DOI: 10.14357/08696527190116

1 Введение

Поддержка конкретно-исторических исследований является одной из актуальных задач современности в связи с вовлечением в исследовательский процесс не только членов профессионального исторического сообщества, но и самых широких слоев непрофессионалов благодаря все увеличивающемуся интересу к частной, семейной истории [1].

В ФИЦ ИУ РАН была разработана концепция комбинированной распределенной среды для поддержки конкретно-исторических исследований, описана соответствующая информационная технология поддержки конкретно-исторических исследований и создан ряд программных средств ее поддержки [2].

¹Институт проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук, Adam@amsd.com

²Институт проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук, Volkov@amsd.com

Технология была построена на принципах сотворчества и краудсорсинга (мобилизации ресурсов широкого круга добровольцев посредством информационных технологий). Такая новая, но перспективная форма вовлечения общественности в процессы решения научных задач получила название «краудсайенс» (гражданская наука), в основе которой лежит научное волонтерство [3]. Элементы технологии в настоящий момент проходят апробацию в реальных конкретно-исторических исследованиях [4].

В основу технологии положена система Т-парсер [5], осуществляющая автоматическое, адаптированное к специфике биографического поиска извлечение фактов из текстов историко-биографической направленности и решающая задачи фактографического индексирования источников и их семантической разметки (вычленения значимых фрагментов и оснащения их метаданными). Была изучена практическая эффективность технологии в условиях конкретно-исторического исследования: Т-парсер показал свою высокую эффективность на реальных текстах историко-биографической направленности [5]; устойчивость семантической сети к ошибкам пользователей в условиях ее распределенного наполнения была проверена методом имитационного моделирования [6–8].

2 Модель данных технологии

Модель данных, положенная в основу технологии, опирается на иерархическое представление историко-биографического факта (ИБФ) [9].

Ресурсом для ИБФ служит фрагмент текста историко-биографической направленности, причем сам текст должен быть загружен в базу данных (БД). Фрагмент может состоять из нескольких интервалов символов в тексте. Ссылкой на ресурс в технологии служит указатель фрагмента текста (УФТ), включающий идентификатор текста в БД и набор интервалов в тексте.

В совокупности ИБФ образуют семантическую сеть, состоящую из двух подсетей — сети понятий и сети экземпляров.

Узлы сети понятий представляют собой именованные универсальные классы объектов. Единственным обязательным свойством класса является его имя. Из требования распределенности вытекает, что сеть может создаваться независимо разными исследователями, а поэтому она должна формироваться из автономных именованных подсетей. Для «склейки» этих подсетей между собой предусмотрена связь эквивалентности. Помимо нее предусмотрены направленные связи типа «подпонятие», «атрибут» и «значение».

Каждая связь может иметь признак условности. Условная связь для успешной интерпретации пользователем должна иметь описание причин условности, т. е. границ ее действия. Описание состоит из текстового комментария и при необходимости набора ссылок на источники в форме УФТ.

Также каждая связь типа «атрибут» может иметь признак уникальности значения, необходимый для задач поиска противоречий в данных, и признак

наследуемости значения, использующийся только для связей типа «часть», описанных ниже.

Факты задаются значениями экземпляров классов и отношениями между ними. Отношения наследуются из сети классов. Между экземплярами одного класса может быть дополнительно установлена связь эквивалентности. Также может быть добавлено отношение нового типа — «часть», необходимое для наследования атрибутов. Каждый экземпляр имеет значение (которое может быть пустым). Непустое значение сопровождается либо текстовым комментарием, либо УФТ, связывающим его с документом-источником.

Хотя, как сказано выше, ограничения на структуру семантической сети исходно наложены самые минимальные, в первой версии технологии, опирающейся исключительно на Т-парсер, были введены дополнительные ограничения, упрощающие ее реализацию. Так, под понятиями понимаются только те узлы сети, у которых нет входящих связей или есть только входящие связи типа «зна-

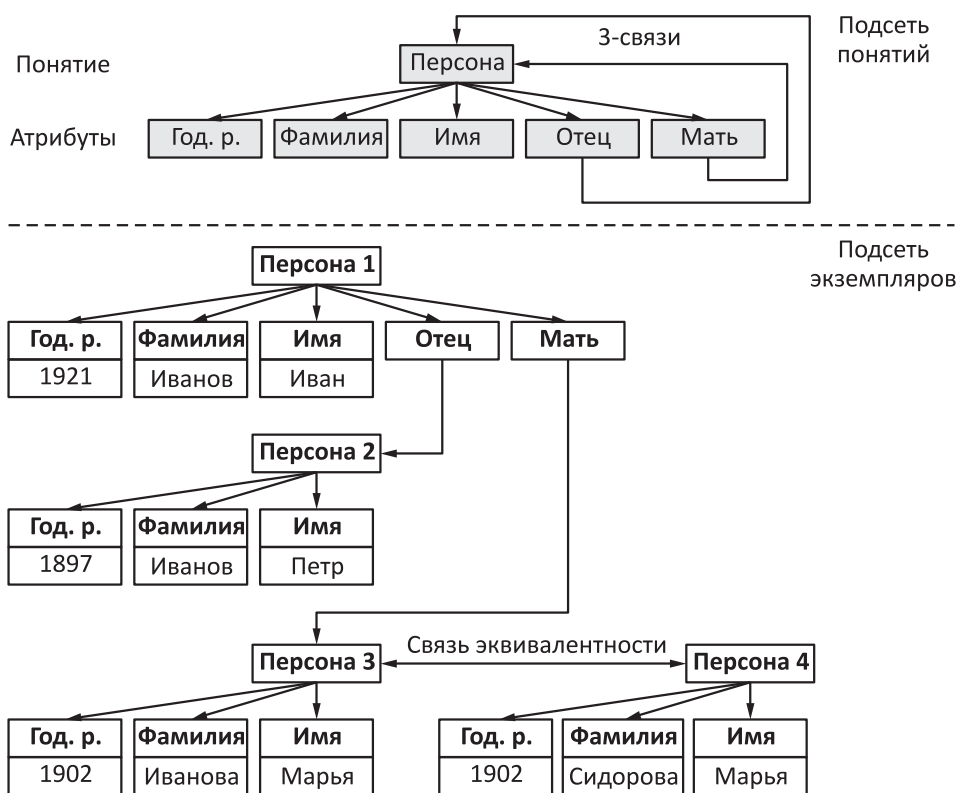


Рис. 1 Пример структуры семантической сети технологии

чение». У понятий могут быть исходящие связи либо исключительно типа «атрибут» (такое понятие называется нормальным понятием, или Н-понятием), либо типа «подпонятие». Такое понятие по смыслу является атрибутом, и оно не встречается без входящей связи «значение». Оно называется атрибутивным, или А-понятием. Узел, у которого есть входящая связь «атрибут», называется атрибутом. Из атрибута могут исходить связи только типа «подпонятие» или «значение». Если у атрибута нет исходящих связей, то он называется терминальным. На рис. 1 приведен пример структуры семантической сети первой версии технологии.

3 π -модель

В рамках развития технологии поддержки конкретно-исторических исследований был разработан инструментальный комплекс π -Фактограф [10], ориентированный на поддержку самого исследовательского процесса и решающий следующие задачи:

- фиксация не только четко установленных фактов, но и предположений, неточных значений, вопросов;
- соотнесение высказывания с ресурсами-источниками или/и цепочками вывода, с одной стороны, и целевыми информационными ресурсами, в которых они публикуются, с другой;
- поддержка сочетания формализованного и неформализованного представления знаний;
- отслеживание процессов накопления данных, выявления дефектов, выдвижения/опровержения гипотез по источникам, времени, исполнителям, аргументации.

Для эффективного решения этих задач в основу технологии, на которую опирается π -Фактограф, положена π -модель данных, объединяющая сведения о внешних ресурсах (источниках и целевых публикациях) и рабочих материалах исследовательского проекта и интерпретирующая ИБФ как π -факт (фактоподобное высказывание) [10], подразумевающий:

- вариативный характер и неоднозначность имен объектов и значений свойств;
- ограничения времени существования объекта и периодов постоянства значения для большинства его свойств;
- зависимость перечня (набора) свойств объекта от его класса и конкретного исследования;
- наличие искажений, дефектов в источниках, ошибок при их распознавании, интерпретации и интеграции.

Коллекция π -фактов составляет ядро информационного поля, включающего также документы-источники, целевые материалы, промежуточные данные. Формализованные данные играют роль метаданных, сопровождающих основной массив документов, с их помощью может быть организован эффективный поиск. π -факты, отражающие как действия исследователя, так и сведения о предметной области, сопровождаются неформальным комментарием, в качестве которого может выступать не только текст, но и рисунок или произвольный мультимедийный объект. Этот комментарий может содержать цитату или изложение источника, а также отсылки на документ или конкретное место в документе, который, в свою очередь, может содержать отсылки на π -факты. Таким образом формируется многосвязное информационное поле.

π -модель составляют формализованные высказывания (π -факты), представляющие:

- модель области исследований (μ -факты);
- объекты исследования и сопряженные с ними сущности (ξ -факты);
- процесс исследований (φ -факты).

1. Набор μ -фактов — это списки определений классов объектов, классов их свойств, их возможных значений, а также накладываемых на них ограничений.
2. Параметрами ξ -факта выступают степень его достоверности («правда», «скорее правда», «неизвестно», «скорее ложь», «ложь») и временной промежуток, для которого данный факт о свойстве объекта верен.

ξ -фактами являются следующие виды высказываний:

- дефиниция (D) — высказывание, фиксирующее принадлежность объекта к некоторому классу;
- атрибут (A) — высказывание о значении некоторого свойства объекта;
- отношение (R) некоторых свойств объектов;
- высказывание (T) о темпоральных отношениях (сопоставление временных интервалов) между свойствами объектов;
- высказывание (L) о логическом отношении между свойствами объектов.

3. φ -факты представляют собой исследовательские операции трех видов:

- интерпретация — сопоставление ξ -факту документального объекта — источника, на основании которого он сформулирован;
- представление — сопоставление ξ -факту документального объекта, в котором он опубликован;
- умозаключение — сопоставление ξ -фактам нового ξ -факта-вывода. Вывод из формализованных высказываний делается с привлечением экспертного знания и интуиции исследователя. Ссылка на лицо, осуществившее

ствляющее исследование, и время выполнения операции — компоненты φ -факта.

4 Объединенная модель данных

Адаптацию модели данных технологии поддержки конкретно-исторических исследований с целью поддержки требований π -модели можно произвести следующим способом.

1. Роль μ -фактов играют элементы подсети понятий, т. е. N -понятия и их атрибуты. Для поддержки хранения возможных значений атрибутов и накладываемых на них ограничений необходимо дополнить классы терминальных атрибутов диапазонами и списками возможных значений.
2. Как показано ниже, ξ -факты могут быть отражены в модели данных технологии в форме соответствующих связей в сети экземпляров. Следовательно, параметры ξ -фактов могут быть реализованы за счет расширения понятия признака условности связи, поскольку параметры определяют границы истинности факта, т. е. именно его условность. На данный момент описание границ действия связи реализовано в форме текстового комментария и при необходимости набора ссылок на источники в форме УФТ. Для совместимости с π -моделью должны быть дополнительно введены параметры оценки достоверности и периода истинности. Оценка достоверности может принимать не только значения ПРАВДА (Т) и ЛОЖЬ (F), но и промежуточные значения. В качестве таких значений могут быть выбраны как диапазон нечеткой логики (интервал $[0, 1]$), так и номинальная шкала. На практике вполне достаточно включить в такую шкалу промежуточные значения: «скорее ЛОЖЬ» (?F), «скорее ПРАВДА» (?T), «равновероятно ПРАВДА и ЛОЖЬ» (?). Эти значения фиксируют как степень сомнения в правдивости утверждения, так и вопросы или предположения, формулируемые исследователем [10]. Период истинности задается временным промежутком, в течение которого факт с учетом оценки достоверности является истинным. Подробно варианты фиксации временных промежутков рассмотрены в [11]. Дефиниция (ξ -факт типа D) определяет принадлежность экземпляра к определенному классу. Факт данной принадлежности реализован за счет некоторой технологической связи «класс \rightarrow экземпляр». ξ -факт типа D может быть ассоциирован с данной связью. Будем называть ее D-связью. Поскольку D-связь также может обладать признаком условности, необходимо разрешить установление связи эквивалентности не только между экземплярами одного класса, но и между экземплярами разных классов.

ξ -факт типа A соответствует экземпляру связи типа «атрибут».

ξ -факт типа R определяет отношение значений атрибутов двух экземпляров одного понятия без явного указания самих значений, а ξ -факт типа T определяет отношение темпоральных параметров входящих связей для двух

объектов сети экземпляров без указания самих значений этих параметров. Таким образом, ξ -факты типа R и T могут быть реализованы за счет расширения понятия связи типа «часть» (Ч-связь). Для этого следует разрешить для этой связи соединение любых двух узлов в сети экземпляров, а не только экземпляров одного понятия. У связи должно быть три параметра: признак того, что первый узел является частью второго (Ч-параметр), отношение значений (З-параметр) и отношение темпоральных параметров (Т-параметр). Ч-параметр является бинарным, З-параметр может принимать значения «не задано», «больше», «меньше», «равно» и «примерно равно», Т-параметр может принимать значения «не задано», «раньше», «позже», «одновременно» и «примерно одновременно». Вариант, когда все параметры Ч-связи не установлены, следует считать бессмысленным, и в этом случае связь не может быть установлена.

ξ -факт типа L отличается от остальных типов фактов, поскольку ему не соответствует никакой реальный объект в семантической сети, а он является логическим выражением над значениями множества объектов. Целесообразно понимать под ξ -фактом типа L результат выполнения некоторого информационного запроса к семантической сети. Синтаксис запроса допускает логические выражения [2], поэтому дополнительная адаптация технологии с целью поддержки ξ -фактов типа L не требуется.

Для поддержки итерационного процесса формирования ξ -фактов в соответствии с новыми возможностями технологии, связанными с включением в нее обновленного T-парсера и π -Фактографа, необходимы следующие изменения: если в первой версии технологии атрибуты не могли составлять иерархию, поскольку из атрибута могли исходить связи только типа «подпонятие» или «значение», то теперь необходимо дополнить этот список связью типа «атрибут». Это означает, что N-понятия с атрибутами на последующих шагах формирования фактов могут быть объединены связями типа «атрибут» под новым N-понятием и стать его атрибутами. Само новое N-понятие на последующих шагах итерационного процесса формирования семантической сети также может стать атрибутом некоторого N-понятия более высокого порядка.

3. φ -факты могут быть отражены в модели данных технологии в форме модифицированного УФТ. На данный момент УФТ решает задачу отражения φ -факта одного вида — интерпретации, а БД документов поддерживает хранение таких атрибутов документа, как «автор», «реквизиты публикации» и «дата создания». Для поддержки представления и умозаключения в УФТ требуется ввести параметр «вид», принимающий значения «источник», «публикация» и «результат», а также допустить наличие у объекта семантической сети нескольких УФТ разного вида.

На рис. 2 приведен пример структуры семантической сети единой технологии.

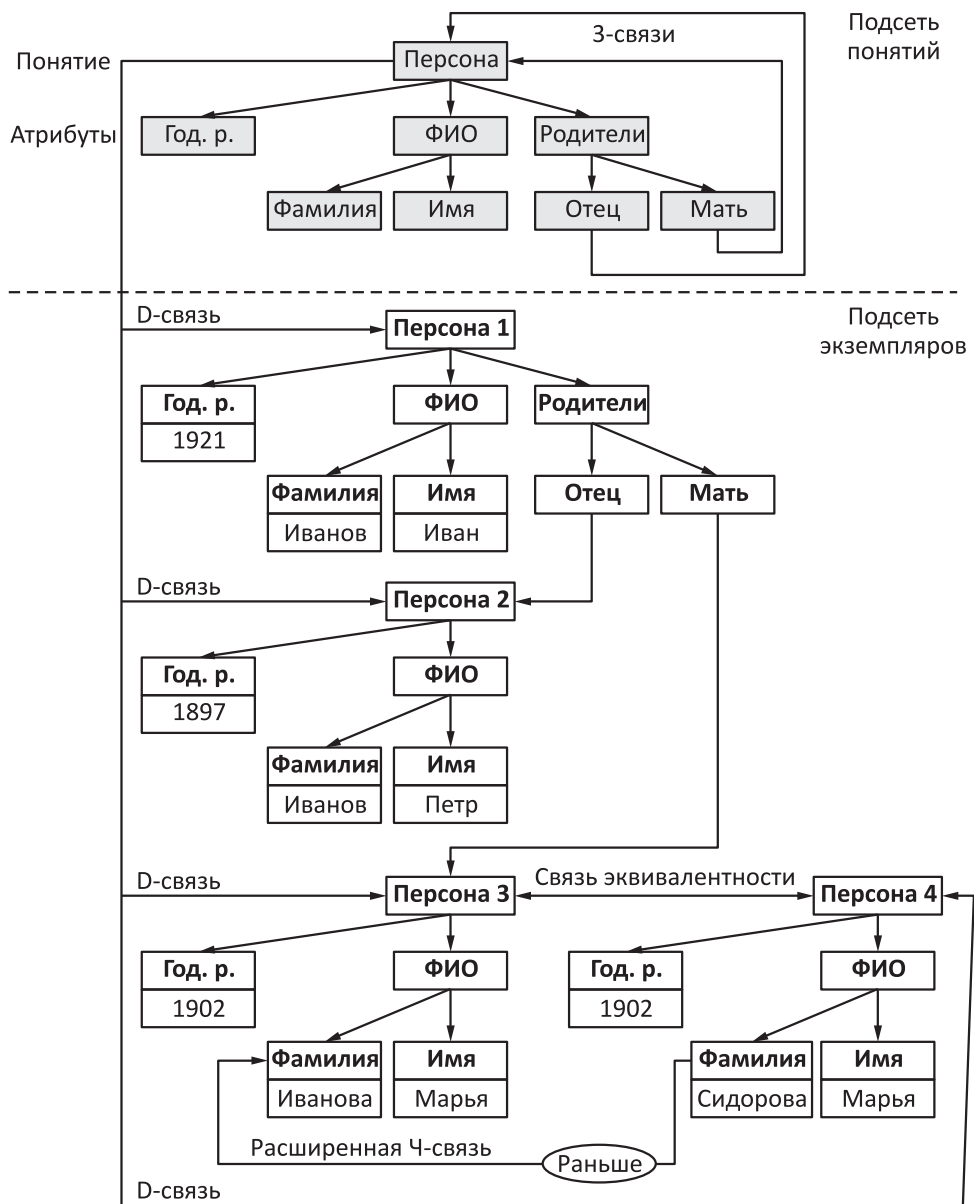


Рис. 2 Пример структуры семантической сети единой технологии

5 Выводы

Разработана единая распределенная технология поддержки конкретно-исторических исследований с опорой на систему Т-парсер, осуществляющую автоматическое извлечение фактов из текстов историко-биографической направленности, и инструментальный комплекс π -Фактограф, ориентированный на поддержку самого исследовательского процесса.

Актуальность и значимость результатов вытекает из существенного роста в последнее время интереса к биографическим исследованиям, в том числе со стороны непрофессиональных исследователей [12], с одной стороны, и отсутствия устоявшейся и обоснованной методологии этих исследований [13], с другой стороны. Сокращению этого разрыва между возросшей потребностью и отсутствием достаточной методологической поддержки и соответствующего инструментария должна служить разработанная в рамках данного исследования технология и создаваемое для ее поддержки специализированное программное обеспечение.

Технология предназначена для широкого круга не являющихся профессиональными историками и биографами пользователей.

Литература

1. *Грибач С. В.* Исследование семейных кризисов посредством психолингвистического эксперимента // Сборники конференций НИЦ Социосфера, 2010. № 6. С. 45–54.
2. *Адамович И. М., Волков О. И.* Технология распределенного автоматизированного анализа исторических текстов // Системы и средства информатики, 2016. Т. 26. № 3. С. 148–161. doi: 10.14357/08696527160311.
3. *Егеров С. В.* От краудсорсинга простых операций к «науке граждан» // Социология науки и технологий, 2016. Т. 7. № 4. С. 74–85
4. *Маркова Н. А.* Фольклористы-любители в переписке с А. В. Марковым // Традиционная культура, 2017. № 2(66). С. 123–135.
5. *Адамович И. М., Волков О. И.* Система извлечения биографических фактов из текстов исторической направленности // Системы и средства информатики, 2015. Т. 25. № 3. С. 235–250. doi: 10.14357/08696527150315.
6. *Адамович И. М., Волков О. И.* Об одном подходе к моделированию процесса развития семантической сети // Системы и средства информатики, 2017. Т. 27. № 2. С. 143–154. doi: 10.14357/08696527170212.
7. *Адамович И. М., Волков О. И.* Влияние ошибок пользователей на динамику качества семантической сети // Системы и средства информатики, 2017. Т. 27. № 4. С. 150–163. doi: 10.14357/08696527170412.
8. *Адамович И. М., Волков О. И.* Модель процесса коррекции ошибок в семантической сети // Системы и средства информатики, 2018. Т. 28. № 1. С. 65–76. doi: 10.14357/08696527180105.
9. *Адамович И. М., Волков О. И.* Иерархическая форма представления биографического факта // Системы и средства информатики, 2016. Т. 26. № 2. С. 108–122. doi: 10.14357/08696527160207.

10. Маркова Н. А. Технология поддержки конкретно-исторических исследований на основе модели фактоподобных высказываний // Программная инженерия, 2015. № 5. С. 43–48.
11. Разин В. В., Тузовский А. Ф. Представление знаний о времени с учетом неопределенности в онтологиях Semantic Web // Доклады ТУСУРа, июнь 2013. № 2(28). С. 157–162.
12. Зубова О. В. Ищем корни свои. — Управление Государственной архивной службы Самарской области, 2012. http://regsamarh.ru/external/media/files/info_dejatelnost/publikazii/genealogia.pdf.
13. Козлова Л. А. Биографическое исследование российской социологии: предварительные теоретико-методологические замечания // Социологический журнал, 2007. № 2. С. 59–87.

Поступила в редакцию 10.08.18

UNIFIED TECHNOLOGY OF CONCRETE HISTORICAL RESEARCH SUPPORT

I. M. Adamovich and O. I. Volkov

Institute of Informatics Problems, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119133, Russian Federation

Abstract: The article is devoted to the further development of the technology of concrete historical research support which was built on the basis of the system of automatic facts extraction from historical and biographical texts T-parser and designed for a broad range of users which are not professional historians and biographers. The development is carried out by the integration of the program complex π -Factograph oriented towards the research process support into technology. The article describes the capabilities of the program complex and justifies its inclusion into the technology. The problem of integration is solved by using analysis of the data models on which the T-parser system and π -Factograph complex are based. The concepts of the biographical fact and fact-like statement are described, the evidence of their likeness is provided. Based on the results of the analysis, a unified data model which allows the joint use of elements of the unified technology was built and described in detail. In conclusion, the need for the unified technology of concrete historical research support in connection with increase of public interest in family history is substantiated.

Keywords: concrete historical research; distributed technology; semantic network; data model; historical-biographical fact

DOI: 10.14357/08696527190116

References

1. Gribach, S. V. 2010. Issledovanie semeynykh krizisov posredstvom psikholingvisticheskogo eksperimenta [The study of family crises through a psycholinguistic experiment]. *Sborniki konferentsiy NITs Sotsiosfera* [Conference Proceedings NIC Sociosfera] 6:45–54.
2. Adamovich, I. M., and O. I. Volkov. 2016. Tekhnologiya raspredelenogo avtomatizirovannogo analiza istoricheskikh tekstov [The distributed automated technology of historical texts analysis]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 3(26):148–161. doi: 10.14357/08696527160311.
3. Egerev, S. V. 2016. Ot kraudsorsinga prostykh operatsiy k “nauke grazhdan” [From SciSourcing of simple operations to the citizen science]. *Sotsiologiya nauki i tekhnologii* [Sociology of Science and Technology] 7(4):74–85.
4. Markova, N. A. 2017. Fol’kloristy-lyubiteli v perepiske s A. V. Markovym [Folklorists-amateurs in correspondence with A. V. Markov]. *Traditsionnaya kul’tura* [Traditional Culture] 2(66):123–135.
5. Adamovich, I. M., and O. I. Volkov. 2015. Sistema izvlecheniya biograficheskikh faktov iz tekstov istoricheskoy napravlenosti [The system of facts extraction from historical texts]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 25(2):235–250. doi: 10.14357/08696527150315.
6. Adamovich, I. M., and O. I. Volkov. 2017. Ob odnom podkhode k modelirovaniyu protsessa razvitiya semanticheskoy seti [An approach to modeling the semantic net evolution]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 27(2):143–154. doi: 10.14357/08696527170212.
7. Adamovich, I. M., and O. I. Volkov. 2017. Vliyanie oshibok pol’zovateley na dinamiku kachestva semanticheskoy seti [The influence of user errors on the semantic network quality dynamics]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 27(4):150–163. doi: 10.14357/08696527170412.
8. Adamovich, I. M., and O. I. Volkov. 2018. Model’ protsessa korrektsii oshibok v semanticheskoy seti [Model of error correction process in semantic network]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 28(1):65–76. doi: 10.14357/08696527180105.
9. Adamovich, I. M., and O. I. Volkov. 2016. Ierarkhicheskaya forma predstavleniya biograficheskogo fakta [Hierarchical format of biographical fact]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 26(2):147–161. doi: 10.14357/08696527160207.
10. Markova, N. A. 2015. Tekhnologiya podderzhki konkretno-istoricheskikh issledovaniy na osnove modeli faktopodobnykh vyskazyvaniy [Support technology for specific historical studies on the base of fact-like propositions model]. *Programmnyaya inzheneriya* [Software Engineering] 5:43–48.
11. Rasin, V. V., and A. F. Tuzovsky. 2013. Predstavlenie znaniy o vremeni s uchedom neopredelennosti v ontologiyakh Semantic Web [Representation of temporal knowledge in Semantic Web ontologies considering knowledge uncertainty]. *Doklady TUSURa* [Proceedings of TUSUR] 2(28):157–162.
12. Zubova, O. V. 2012. Ishhem korni svoi [Investigating of own antecedents]. Available at: http://regsamarh.ru/info_act/publication/23.10.2011/all/61/19305/ (accessed July 25, 2018).

13. Kozlova, L. A. 2007. Biograficheskoe issledovanie rossiyskoy sotsiologii: predvaritel'nye teoretiko-metodologicheskie zamechaniya [The biography research of Russian sociology: Preliminary theoretical and methodological notes]. *Sociologicheskij zh.* [Sociological J.] 2:59–87.

Received August 10, 2018

Contributors

Adamovich Igor M. (b. 1934) — Candidate of Science (PhD) in technology, leading scientist, Institute of Informatics Problems, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119133, Russian Federation; Adam@amsd.com

Volkov Oleg I. (b. 1964) — leading programmer, Institute of Informatics Problems, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119133, Russian Federation; Volkov@amsd.com

НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ АВТОМАТИЗАЦИИ ПОИСКА И АНАЛИЗА ВЕБ-ТЕКСТОВ ЭКСТРЕМИСТСКОЙ СЕМАНТИКИ*

М. М. Шарнин¹, И. В. Галина²

Аннотация: Рассматриваются вопросы автоматизации методов тематического моделирования (ТМ) для мониторинга экстремистской активности в интернете. Объект исследования — русскоязычные тексты сайтов и социальных сетей. Рассмотрены базовые элементы технологии, реализуемой как единый процесс от сбора данных до получения результата. Приведены примеры экспериментов. Технология включает автоматизированное построение авторского показателя — индекса идеологического влияния (ИИВ), рассчитываемого по неявным ссылкам между текстами. Оптимальные параметры алгоритма расчета неявных ссылок находятся автоматически по максимуму корреляции между явными и неявными ссылками.

Ключевые слова: тематическое моделирование; автоматизированные системы; экстремизм; интернет; неявные ссылки

DOI: 10.14357/08696527190117

1 Постановка задачи. Базовые элементы технологии

Автоматизация процесса обнаружения экстремистской активности в Сети — сложная задача. Авторский коллектив ряд лет разрабатывает методы ТМ для изучения экстремистских текстов на материале русскоязычных (частично — англоязычных, а в перспективе — и на других языках) веб-сайтов и социальных сетей (далее — Сайты) [1–6]. Скрытая переписка в мессенджерах, аудио- и видеопереговоры в чатах и т. п. не являются предметом изучения. Авторы рассматривают *новый показатель степени экстремизма Сайтов* — ИИВ. Индекс идеологического влияния базируется на гипотезе: рост идеологического влияния группы в интернете способствует росту ее численности; влияние измеряется количеством распространяющихся идей этой группы, а рост численности — числом дополнительных Сайтов группы. Индекс идеологического влияния извлекается автоматическим анализом текстов Сайтов; его расчет основан на вероятностной модели влияния (impact) тем и идей Сайта на темы и идеи Сайтов схожей тематики [4] (близкий аналог — метод скрытого распределения Дирихле, Latent Dirichlet Allocation (LDA)). На основе подобного представления «идей», а также

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 16-29-09527).

¹ Институт проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук, mc@keywen.com

² Институт проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук, irn_gl@mail.ru

путем их наблюдения во временной динамике [5] можно идентифицировать вклад каждого Сайта по отношению к выявленным темам, что позволяет обнаружить скрытые связи между различными Сайтами/авторами (аккаунтами). Конечным итогом должно стать создание автоматизированного комплекса программного обеспечения. В настоящее время разработаны базовые модули [1, 3, 4, 6].

Выявление экстремистских Сайтов плохо поддается автоматизации, методики поиска по ключевым словам не позволяют отграничить такие тексты от, например, новостных статей. Сегодня лучшие методы, автоматически вычисляющие релевантность фрагментов текста, основаны на ТМ текстов с использованием латентно-семантического анализа, который работает с матричным представлением коллекции текстов, получаемым с помощью модели «мешок слов» (bag-of-words). Для выявления экстремистских групп (их Сайтов) в интернете предлагается использовать методы ТМ, оптимальные параметры которых определяются при анализе реально существующих экстремистских групп; найденные при этом закономерности позволят выработать более общие критерии поиска и анализа текстов экстремистской семантики.

Базовые элементы технологии следующие.

1. Направленный семантический поиск по заданным ключевым словам (КС) и накопление базы релевантных интернет-текстов, из которых формируются тематические корпуса естественно-языковых (ЕЯ) текстов. Сбор текстов осуществляется в том числе и из социальных сетей, а также поиск по связям цитирования в Google. Поиск включает:
 - 1.1. Выбор первоначального набора КС вручную и поиск по ним в интернете с целью создания тематической обучающей выборки для последующего машинного обучения. На следующих итерациях обучающая выборка может формироваться из ранее сформированных баз данных (БД).
 - 1.2. Поиск по найденным КС в открытых веб-источниках с целью создания больших корпусов ЕЯ-текстов. Осуществляется циклическими итерациями. Алгоритм поиска и сбора данных подразделяется на несколько «поточков»:
 - 1.2.1. Общий мониторинг интернета. Поиск из открытой сети по заданным словам проводится авторской системой «KeyCrawler для систем извлечения знаний» [7]. KeyCrawler — семантический навигатор для отбора данных по исходным семантическим образам — наборам КС. KeyCrawler был успешно применен при разработке авторского метода ассоциативного портрета предметной области в проекте РФФИ 13-07-00272 [8]. В данном проекте использован модифицированный KeyCrawler-2 для построения корпусов, настроенный на поиск текстов, ассоциированных с заданными КС выбранной тематики. KeyCrawler-2 строит также тематические коллекции

текстов (в формате PDF) с названиями, авторами и формальными ссылками.

- 1.2.2. Создание БД первоначального неструктурированного на подтемы корпуса ЕЯ-текстов на основе проведенного семантического поиска.
 - 1.2.3. Специализированный мониторинг социальных сетей системой IQBuzz [9]. IQBuzz — это интернет-сервис отслеживания социальных сетей, позволяющий анализировать интенсивность коммуникации по отдельным темам, выгружать массивы данных и др.
 - 1.3. Семантический поиск по КС, автоматически выделенным с помощью оригинального процессора BREF (Book Reference). BREF (создан на базе системы Pullenti [3] выделяет в виде XML-структуры сами тексты, их параметры: имена авторов — аккаунты, названия статей (если есть), локации и др., а также эксплицитные ссылки.
 - 1.4. Семантический поиск по КС, автоматически выделенным из первых обучающих корпусов и текстовых коллекций с помощью методов статистики (например, по их частотным характеристикам).
2. Составление частотного словаря наиболее значимых КС и фрагментов текста для каждой предметной области. В качестве меры тематической близости стандартно используется косинусная мера для векторов признаков (в данном случае КС), вычисляемая по формуле:

$$\frac{xy}{|x||y|} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^n x_i^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n y_i^2}},$$

где x и y — векторы в пространстве признаков, которыми служат сами значимые словосочетания из данного семантического контекстного пространства; i — индекс, пробегающий число признаков. Также применяются формулы расчета log-likelihood score, silhouette-score и др.

3. Автоматический отбор КС из полнотекстовых корпусов, значимых для целей тематической кластеризации, с помощью методов ТМ (LDA). На основе выделяемых признаков ставятся эксперименты с кластеризацией и ТМ, в результате которых возможно: (а) автоматизированное разбиение корпуса на тематические коллекции; (б) расширение построенной системы тематических категорий при пополнении корпуса новыми текстами.
4. Автоматизированное разбиение полученных выборок из интернета и БД (в результате вышеперечисленных видов поиска) на тематические корпуса и коллекции текстов определенной тематики методами статистики, кластеризации и ТМ.

5. Проведение офлайн-экспериментов на полученных тематических корпусах для вычленения коллекций явно связанных текстов процессором BREF, который выделяет прямые связи (ссылки, цитирование) в виде направленного графа и подсчитывает число явных ссылок (входящих дуг графа) на каждый текст.
6. Расчет индекса степени террористической угрозы (ИСТУ) на основании коллективного решения экспертов. Индекс степени террористической угрозы моделируется методом машинного обучения по лексическим характеристикам Сайта и подсчетом выделенных явных связей. Но при автоматическом анализе текстов сложно однозначно определить их экстремистскую направленность. Случаи, где «интеллекта» системы недостаточно, передаются экспертам для дальнейшего анализа.
7. Проведение экспериментов на тематических корпусах с целью вычисления семантической меры подобия (меры неявной связанности) между текстами. Мера подобия — авторский показатель; она основана на соотношении явных и неявных ссылок, когда тексты связаны через общие (или сходные) текстовые фрагменты. Формула этой меры:

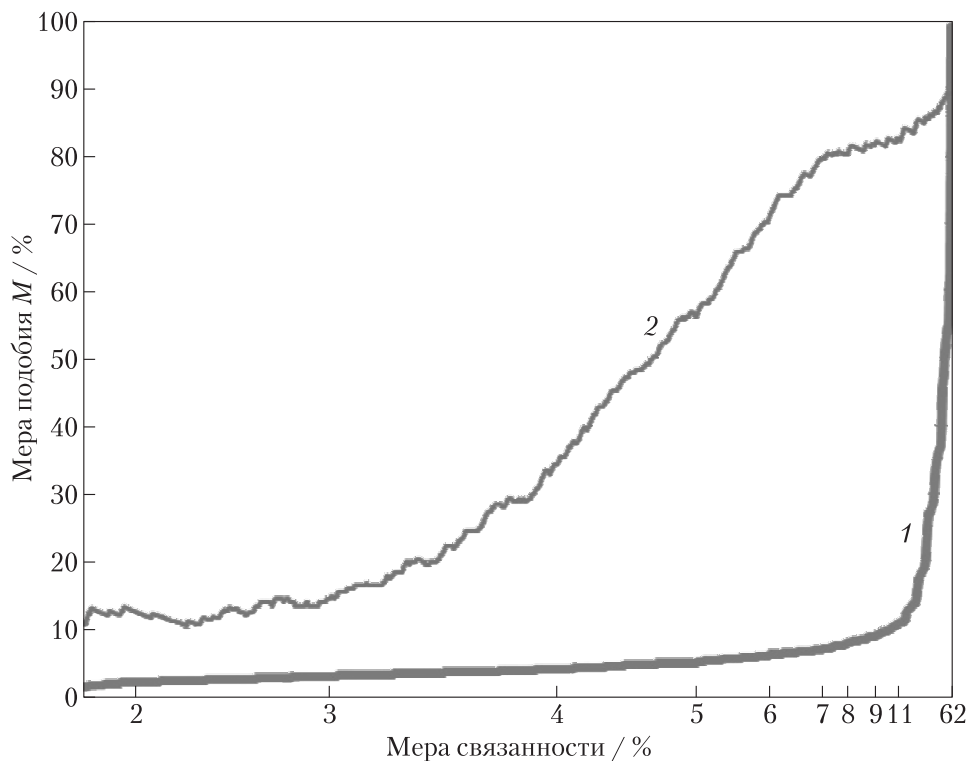
$$M = \frac{S_{\text{interset}}}{\min(S_1, S_2)} \cdot 100\%,$$

где S_{interset} — сумма весов всех значимых ключевых слов и их семантических эквивалентов, входящих в оба текста; S_1 — сумма весов КС и их эквивалентов первого текста, а S_2 — второго.

Мера подобия текста самому себе равна 100%. В простейшем случае вес КС равен числу символов в них. Чем больше мера подобия текстов, тем выше вероятность наличия явной ссылки между ними. Зависимость была измерена экспериментально и представлена на графике зависимости меры связанности от меры подобия — нелинейная шкала подобия с равномерным размещением пар.

8. Проведение экспериментов на полученных тематических коллекциях с целью обнаружения имплицитных связей текстов с помощью текущей версии лингвистического процессора неявных ссылок (ЛПНС), обнаруживающего неявные ссылки с заданными параметрами (пороги минимального и максимального семантического подобия, учет времени статей и т. д.). Лингвистический процессор неявных ссылок, как и BREF, разработан на базе Pullenti [3]. Весовая функция в ЛПНС подбиралась по максимуму корреляции между явными и неявными ссылками, при этом наиболее значимые КС получили наибольший вес и попали в начало списка. С помощью ЛПНС был проведен анализ текстов и сделаны следующие выводы:

- (1) неявные связи могут быть выделены из текстов путем сравнения их лексики с лексикой посторонних коллекций;



Зависимость формальной связанности от меры подобия: 1 — мера схожести; 2 — вероятность связи

- (2) явная ссылка почти всегда сопровождается группой неявных ссылок;
 - (3) может быть построен рейтинг КС и словосочетаний/фраз, потенциально являющихся неявными ссылками, где наиболее вероятные кандидаты будут занимать лидирующие позиции.
9. Автоматизированный расчет ИИВ на основе ЛПНС по числу неявных связей между текстами из тематических коллекций. Неявная ссылка может быть представлена одним КС или фрагментом текста либо семантически релевантным им набором (синонимы, перевод, синтаксическая трансформация, перифраза и т. д.).

Оптимальные параметры алгоритма выявления неявных ссылок изначально подбирались на коллекции по компьютерной графике [2]. При вычислении индекса контекстного научного цитирования (ИКНЦ) на этой тематике был найден один из параметров алгоритма (минимальная длина анализируемых слов), при кото-

ром корреляция достигает максимума. Алгоритм расчета ИИВ работает сходным с ИКНЦ образом, а именно: вероятностная математическая модель зависимости экспертной оценки ИСТУ (в простейшем случае — число явных связей) от количества неявных связей и их параметров строится на базе ЛПНС по методу поиска релевантных фраз (подчета встречаемости фразы и ее семантических эквивалентов) и с помощью меры семантического подобия. Лингвистический процессор неявных ссылок настраивается так, чтобы корреляция между индексом ИИВ и ИСТУ была максимальной. Тексты (Сайты) считаются связанными, если между ними есть прямая ссылка (мера связанности равна 100%) или если они связаны через другой текст (мера связанности равна 80%). Данные величины меры связанности выбраны при максимизации корреляции. Эксперимент показал, что максимум корреляции 55,7% достигается, если при расчете меры подобия игнорируются КС длиной менее 8 букв. Игнорирование более длинных словосочетаний приводит к уменьшению корреляции.

Для апробации индекса ИИВ и предложенной меры подобия был проведен ряд экспериментов в открытом интернете. К примеру, была собрана коллекция на КС «кафиры». Коллекция из 25 документов содержит $(25 \cdot 25 - 25)/2 = 300$ различных пар документов. Для ее анализа была рассчитана мера подобия каждой пары документов. Два документа из 25 имели меру подобия 100%, так как один документ составлял часть другого. Считалось, что пара документов неявно связана, если она имеет меру подобия более 0,5%. Всего 12 пар документов имели меру подобия более 1% и 26 пар документов имели меру подобия более 0,5%. Эти группы документов фактически являются кластерами семантически близких текстов. В состав 26 пар с мерой подобия более 0,5% входят 14 различных текстов. При их сравнении по числу неявных ссылок (что совпадает с ИИВ) был выявлен текст, имеющий максимальное число (7) связей с прочими текстами, который лучше всего отражает общие смысловые черты всей коллекции. Этот текст считается центральным в рассматриваемом кластере и имеет наивысший ИИВ.

2 База данных, кластеризация и тематическое моделирование

Для хранения коллекции текстов используется БД, которая также хранит списки тем, словари терминов, КС и ключевые фразы, составляющие в совокупности лексические ресурсы проекта. Связи в БД между темами, терминами и фразами организованы в виде тезауруса идей. В каждой теме выделяются главные термины, из которых строится иерархия тем на основе ассоциативных связей главных терминов [8]. Также определяются ключевые фразы для каждой темы.

Организация текстов в виде кластеров проводится так, чтобы тексты в пределах каждого кластера были похожи. Текст отображается в векторном пространстве (в виде «мешка слов») и представляется как вектор признаков с использованием схемы взвешивания. Затем выполняется кластеризация путем измерения расстояния между векторами признаков. Тематические модели осно-

ваны на идее, что документы представляют собой смеси тем, где тема является распределением вероятностей по словам. Список ключевых слов темы может быть получен таким путем, но извлекаемые темы надо сопровождать процедурой кластеризации, так как тематические модели, в принципе, не предназначены для кластеризации.

В ходе экспериментов была опробована методика ТМ с использованием ИИВ для обнаружения экстремистских Сайтов. Найдены динамические закономерности употребления терминов разных тем [1, 5, 6]. Так, с помощью IQbuzz были сформированы две коллекции текстов реальных групп: радикальных мусульман и украинских националистов. Использование ими семантики терминов-антагонистов данной идеологии («москали» и др.) — основание, по которому собирались корпуса. Были выделены общие КС и специфические ключевые слова, преобладающие в каждой из коллекций. В результате были выделены следующие темы, указывающие на деятельность группы: формирование коллективной элитарности; оскорбление антагонистов; призывы к насилию по отношению к ним; представление своей деятельности как справедливой войны за высшие идеалы — религиозные и политические соответственно.

В одном из экспериментов [5] были задействованы два корпуса текстов, построенных с помощью IQBuzz: iqbuzzK (целевой запрос «кафиры»), включающий 100 тыс. документов и 25 млн слов, и iqbuzzV (целевой запрос «ватники»), содержащий около 200 тыс. документов и 70 млн слов. Тексты собирались из соцсетей (vk.com, odnoklassniki.ru, livejournal.com, facebook.com, twitter.com и пр.) и представлялись в виде «мешка слов» в силу принимаемой гипотезы о несущественности порядка слов для определения темы текста. Из текстов удалялись пунктуация, цифры, специальные символы, стоп-слова и др., также были исключены 50 наиболее частотных слов. Затем проводились эксперименты как со всеми доступными словами, так и со словами, отобранными с использованием логрифмического критерия правдоподобия (log-likelihood score) для пороговых значений 10,83 для уровня значимости 0,001. Выбор критерия основан на его лучшей устойчивости в случае низкочастотных слов по сравнению с альтернативами. В результате осталось не более 15 000 ключевых слов с наибольшим значением log-likelihood score. Отбор слов по log-likelihood score с порогом 15,13 для уровня значимости 0,0001 в экспериментах не применялся, так как оставлял большинство описаний текстов корпуса пустыми в силу недостаточного числа получаемых признаков.

Была проведена кластеризация получаемых на начальном этапе векторов ключевых слов, описывающих каждый из текстов корпуса, с целью выделить глобальные категории, по которым можно классифицировать тексты корпусов. Основным алгоритмом кластеризации выбран алгоритм Repeated Bisections из пакета CLUTO, представляющий собой реализацию метода дивизивной иерархической кластеризации Bisecting K-means. В качестве меры близости стандартно использовалась косинусная мера для векторов признаков (в данном случае — ключевых слов).

Были поставлены эксперименты для 10, 15 и 20 кластеров. Тексты распределились достаточно равномерно, что является отличительной особенностью используемого алгоритма кластеризации (см. таблицу).

Для анализа качества кластеризации дополнительно применялась мера разделимости кластеров *silhouette-score* из пакета *Sci-Kit Learn*, не требующая наличия эталонной кластеризации. К сожалению, для экспериментов с чистой кластеризацией алгоритм *silhouette-score* оказывается неудовлетворительным.

Для описаний текстов ключевыми словами, отобранными по указанной методике, были построены тематические модели LDA на 20 и 250 тем для корпуса *iqbuzzK*, а также на 20 и 130 тем для корпуса *iqbuzzV*. Тематическая модель, в отличие от чистой кластеризации, представляет собой вероятностную модель, позволяющую для каждого текста корпуса получить степень его ассоциации с некоторым набором тем, число которых задается предварительно. В экспериментах с ТМ использовался пакет ТМТ (*Topic Modelling Toolbox*). Для настройки параметров сглаживания (отдельно для каждого набора ключевых слов) применялась мера качества *perplexity*, которая определяется через логарифм правдоподобия вероятностной модели на данных тестовой выборки:

$$L(w) = \ln p(w|\Phi, \alpha) = \sum_{w_d \notin S} \ln p(w_d|\Phi, \alpha) ; \quad \text{perplexity}(w) = e^{-L(w)/C} .$$

Здесь w — множество всех текстов обучающей и тестовой частей корпуса; Φ — распределения слов для тем; α — параметр симметричного распределения Дирихле; S — множество текстов обучающей выборки; C — число различных токенов во всех текстах.

Во всех экспериментах было выделено по 30 текстов с наибольшей вероятностью принадлежности к каждой из тем. Полученные описания можно воспринимать как аннотацию для соответствующих тем модели LDA. Для каждой из тем также строился список наиболее частотных слов, которые, как и аннотации в виде выборки наиболее характерных текстов, в дальнейшем можно использо-

Количество текстов в 20 кластерах для алгоритма RB (*iqbuzzK*)

Номер кластера	Количество текстов	Доля кластера
1	1244	0,0123
2	4406	0,0438
3	799	0,0079
4	2522	0,0249
5	1989	0,0196
6	1169	0,0115
7	1863	0,0184
8	2667	0,0263
9	1948	0,0192
10	2538	0,0251
11	3128	0,0309
12	2115	0,0209
13	4286	0,0423
14	4219	0,0416
15	8831	0,0871
16	8172	0,0806
17	9145	0,0902
18	16757	0,1654
19	13152	0,1298
20	10392	0,1025

вать для ручной интерпретации тем в терминах предметной области корпуса. При проведении дальнейших экспериментов описаниями текстов полагались векторы распределений тем тематической модели. Применялись ранее построенные модели LDA на 250 тем для корпуса iqbuzzK и на 130 тем для корпуса iqbuzzV с целью получить максимально возможное число признаков. Векторы распределений тем кластеризовались алгоритмом Repeated Bisections аналогично векторам КС.

В качестве меры качества применялся silhouette-score, усредненный по 10 итерациям, на каждой из которых для подсчета значения меры формировалась случайная подвыборка в 15 000 элементов. Наилучший результат для корпуса iqbuzzK был показан в эксперименте с кластеризацией на 200 кластеров, где при построении модели LDA были использованы описания текстов корпуса в виде КС, отобранных с использованием log-likelihood score с пороговым значением 10,83. Средний silhouette-score составил 0,404, его медиана по всем документам корпуса — 0,502. Доля ядер кластеров (silhouette-score > 0,4) составила 0,574, что представляет собой долю устойчиво кластеризуемых описанным алгоритмом текстов корпуса.

3 Заключение

Авторским коллективом получены следующие результаты:

- (1) определен состав базовых модулей технологии обнаружения и анализа экстремистских текстов;
- (2) построены и постоянно пополняются БД и обучающие тематические коллекции;
- (3) построены коллекции веб-текстов объемом > 10 ГБ, в том числе коллекции > 10 000 датированных текстов из соцсетей;
- (4) разработан ЛПНС для выявления неявных ссылок с заданными параметрами;
- (5) предложена и апробирована новая мера семантического подобия текстов;
- (6) предложен и частично апробирован алгоритм расчета ИИВ Сайтов.

Далее планируется улучшить оценку ИИВ, используя методы поиска семантических связей между словами — Word2Vec, WMD и им подобные.

Литература

1. Золотарев О. В., Шарнин М. М., Клименко С. В. Семантический подход к анализу террористической активности в сети Интернет на основе методов тематического моделирования // Вестник РосНОУ. Серия: Сложные системы: модели, анализ и управление. — М.: РосНОУ, 2016. № 3. С. 64–71.

2. Орлов Д. Е., Клименко С. В., Орлова Н. А., Шарнин М. М., Слепцов И. О. Построение и анализ тематических коллекций научных публикаций по тематике «Компьютерная графика, визуализация и виртуальная реальность» // Ситуационные центры и информационно-аналитические системы класса 4i для задач мониторинга и безопасности: Тр. Междунар. научн. конф. — Протвино: ИФТИ, 2016. Т. 1. С. 36–42.
3. Золотарёв О. В., Шарнин М. М., Клименко С. В., Кузнецов К. И. Система PullEnti — извлечение информации из текстов естественного языка и автоматизированное построение информационных систем // Ситуационные центры и информационно-аналитические системы класса 4i для задач мониторинга и безопасности: Тр. Междунар. научн. конф. — Протвино: ИФТИ, 2016. Т. 2. С. 28–35.
4. Клименко С. В., Шарнин М. М., Ищенко Н. С., Хакимова А. Х. Использование метода неявных ссылок для противодействия распространению деструктивных антигуманистических идеологий в сети Интернет // Ситуационные центры и информационно-аналитические системы класса 4i для задач мониторинга и безопасности: Тр. Междунар. научн. конф. — Протвино: ИФТИ, 2016. Т. 2. С. 143–147.
5. Демидов А. О., Шарнин М. М. Построение развивающейся во времени системы тематических категорий для пополняемого корпуса текстов // Тр. Междунар. научн. конф. СРТ1617. — Протвино: ИФТИ, 2017. С. 166–171.
6. Клименко С. В., Шарнин М. М., Галина И. В., Мацкевич А. Г., Хакимова А. Х., Соколов Е. Г. Индекс идеологического влияния: базовые модули комплексной методики // Тр. Междунар. научн. конф. по физико-технической информатике СРТ2018. — Протвино: ИФТИ, 2018. С. 18–32.
7. Charnine M. Keywen: Automated writing tools. — Booktango, 2013. 129 p.
8. Галина И. В., Козеренко Е. Б., Морозова Ю. И., Сомин Н. В., Шарнин М. М. Ассоциативные портреты предметной области — инструмент автоматизированного построения систем Big Data для извлечения знаний: теория, методика, визуализация, возможное применение // Информатика и её применения, 2015. Т. 9. Вып. 2. С. 94–111.
9. IQBuzz.pro. <http://iqbuzz.pro/about.php>.

Поступила в редакцию 17.10.17

SOME ASPECTS OF AUTOMATION OF SEARCH AND ANALYSIS OF WEB-TEXTS OF EXTREMIST SEMANTICS

M. M. Charnine and I. V. Galina

Institute of Informatics Problems, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119133, Russian Federation

Abstract: The questions of automation of thematic modeling methods for monitoring and studying extremist sites on the Internet are considered. The authors study the texts of sites and social networks. The basic elements of the

technology realized as a unified process from data collection to obtaining the result are considered. The examples of experiments are given. The technology includes the automated construction of the author's index — the index of ideological impact, calculated by implicit references between texts. The optimal parameters of the algorithm for calculating implicit references are calculated automatically on the basis of maximum correlation between explicit and implicit references.

Keywords: thematic modeling; automated systems; terrorism; Internet; implicit references

DOI: 10.14357/08696527190117

Acknowledgments

The work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (project 16-29-09527).

References

1. Zolotarev, O. V., M. M. Sharnin, and S. V. Klimenko. 2016. Semanticheskiy podkhod k analizu terroristicheskoy aktivnosti v seti Internet na osnove metodov tematicheskogo modelirovaniya [A semantic approach to the analysis of terrorist activity on the Internet based on the methods of topic modeling]. *Vestnik RosNOU. Ser. Slozhnye sistemy: modeli, analiz i upravlenie* [Vestnik RosNOU. Ser. Complex Systems: Models, Analysis, Management] 3:64–71.
2. Orlov, D. E., S. V. Klimenko, N. A. Orlova, M. M. Sharnin, and I. O. Sleptsov. 2016. Postroenie i analiz tematicheskikh kolleksiy nauchnykh publikatsiy po tematike “Komp'yuternaya grafika, vizualizatsiya i virtual'naya real'nost'” [Design and analysis of thematic collections of scientific publications on topics “Computer Graphics, Visualization and Virtual Reality”]. *School-Seminar (International) on Situational Centers and Information-Analytical System 4i Class for Monitoring and Security Tasks Proceedings*. Protvino: IFTI. 1:36–42.
3. Zolotarev, O. V., M. M. Sharnin, S. V. Klimenko, and K. I. Kuznetsov. 2016. Sistema PullEnti — izvlechenie informatsii iz tekstov estestvennogo yazyka i avtomatizirovanoe postroenie informatsionnykh sistem [System PullEnti — information extraction from natural language texts and automatic construction of information systems]. *School-Seminar (International) on Situational Centers and Information-Analytical System 4i Class for Monitoring and Security Tasks Proceedings*. Protvino: IFTI. 2:28–35.
4. Klimenko, S. V., M. M. Sharnin, N. S. Ishchenko, and A. Kh. Khakimova. 2016. Ispol'zovanie metoda neyavnykh ssylok dlya protivodeystviya rasprostraneniyu destruktivnykh antigumanisticheskikh ideologiy v seti Internet [The applying of the implicit links method for counterwork of destructive anti-humanist ideologies propagation on Internet]. *School-Seminar (International) on Situational Centers and Information-Analytical System 4i Class for Monitoring and Security Tasks Proceedings*. Protvino: IFTI. 2:143–147.
5. Demidov, A. O., and M. M. Sharnin. 2017. Postroenie razvivayushchey vo vremeni sistemy tematicheskikh kategoriy dlya popolnyaemogo korpusa tekstov [Building a devel-

- oping system of topic categories for an expanding text corpus]. *Conference (International) CPT1617 Proceedings*. Protvino: IFTI. 166–171.
6. Klimenko, S. V., M. M. Sharnin, I. V. Galina, A. G. Matskevich, A. Kh. Khakimova, and E. G. Sokolov. 2018. Indeks ideologicheskogo vliyaniya: bazovye moduli kompleksnoy metodiki [Index of ideological influence: Basic modules of a complex methodology]. *Conference (International) CPT2018 Proceedings*. Protvino: IFTI. 18–32.
 7. Charnine, M. 2013. *Keywen: Automated writing tools*. Booktango. 129 p.
 8. Galina, I. V., E. B. Kozerenko, Yu. I. Morozova, N. V. Somin, and M. M. Charnine. 2015. Assotsiativnye portrety predmetnoy oblasti — instrument avtomatizirovannogo postroeniya sistem Big Data dlya izvlecheniya znaniy: teoriya, metodika, vizualizatsiya, vozmozhnoe primenenie [Associative portraits of subject areas as a tool for automated construction of Big Data systems for knowledge extraction: Theory, methods, visualization, and application]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 9(2):93–110.
 9. IQBuzz.pro. Available at: <http://iqbuzz.pro/about.php> (accessed February 20, 2019).

Received October 17, 2017

Contributors

Charnine Mikhail M. (b. 1959)— Candidate of Science (PhD) in technology, senior scientist, Institute of Informatics Problems, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119133, Russian Federation; mc@keywen.com

Galina Irina V. (b. 1965) — leading engineer, Institute of Informatics Problems, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation; irn_gl@mail.ru

ОБ АВТОРАХ

Абгарян Каринэ Карленовна (р. 1963) — доктор физико-математических наук, заведующая отделом Вычислительного центра им. А. А. Дородницына Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук; заведующая кафедрой Московского авиационного института (национального исследовательского университета)

Адамович Игорь Михайлович (р. 1934) — кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник Института проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Арутюнов Евгений Наполеонович (р. 1952) — кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Института проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Власова Светлана Александровна (р. 1960) — кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник Библиотеки по естественным наукам Российской академии наук

Волков Олег Игоревич (р. 1964) — ведущий программист Института проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Гаврилов Евгений Сергеевич (р. 1985) — научный сотрудник Вычислительного центра им. А. А. Дородницына Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук; старший преподаватель Московского авиационного института (национального исследовательского университета)

Галина Ирина Владимировна (р. 1965) — ведущий инженер Института проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Гончаров Александр Анатольевич (р. 1994) — младший научный сотрудник Института проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Грушо Александр Александрович (р. 1946) — доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник Института проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Грушо Николай Александрович (р. 1982) — кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Института проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Егоров Владимир Борисович (р. 1948) — кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник Института проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Зацаринный Александр Алексеевич (р. 1951) — доктор технических наук, заместитель директора Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук (ФИЦ ИУ РАН); главный научный сотрудник Института проблем информатики ФИЦ ИУ РАН

Зацман Игорь Моисеевич (р. 1952) — доктор технических наук, заведующий отделом Института проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Иванов Даниил Владимирович (р. 1993) — аспирант кафедры теории вероятностей механико-математического факультета Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова

Каленов Николай Евгеньевич (р. 1945) — доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Библиотеки по естественным наукам Российской академии наук

Коднянко Владимир Александрович (р. 1951) — доктор технических наук, профессор Политехнического института Сибирского федерального университета

Колесников Александр Васильевич (р. 1948) — доктор технических наук, профессор Института физико-математических наук и информационных технологий Балтийского федерального университета им. И. Канта; ведущий научный сотрудник Калининградского филиала Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Кондрашев Вадим Адольфович (р. 1963) — старший научный сотрудник Института проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Королёв Вадим Иванович (р. 1943) — доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник Института проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук; профессор Финансового университета при Правительстве Российской Федерации; старший научный сотрудник Российской академии народного хозяйства и государственной службы при Президенте Российской Федерации

Кудрявцев Алексей Андреевич (р. 1978) — кандидат физико-математических наук, доцент кафедры математической статистики факультета вычислительной математики и кибернетики Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова

Листопад Сергей Викторович (р. 1984) — кандидат технических наук, старший научный сотрудник Калининградского филиала Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Никишин Дмитрий Александрович (р. 1976) — кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник Института проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Одинаев Раим Назарович (р. 1964) — кандидат физико-математических наук, доцент, декан механико-математического факультета Таджикского национального университета

Рудак Анна Олеговна (р. 1996) — студентка магистратуры Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики»

Синицын Владимир Игоревич (р. 1968) — доктор физико-математических наук, доцент, главный научный сотрудник Института проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Синицын Игорь Николаевич (р. 1940) — доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, главный научный сотрудник Института проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Сучков Александр Павлович (р. 1954) — доктор технических наук, ведущий научный сотрудник Института проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Тимонина Елена Евгеньевна (р. 1952) — доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник Института проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Титова Анастасия Игоревна (р. 1995) — студентка факультета вычислительной математики и кибернетики Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова

Шарнин Михаил Михайлович (р. 1959) — кандидат технических наук, старший научный сотрудник Института проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Шнурков Петр Викторович (р. 1953) — кандидат физико-математических наук, доцент Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики»

Правила подготовки рукописей статей для публикации в журнале «Системы и средства информатики»

Журнал «Системы и средства информатики» публикует теоретические, обзорные и дискуссионные статьи, посвященные научным исследованиям и разработкам в области информационных технологий.

Журнал издается на русском языке. По специальному решению редколлегии отдельные статьи могут печататься на английском языке.

Тематика журнала охватывает следующие направления:

- информационно-телекоммуникационные системы и средства их построения;
- архитектура и программное обеспечение вычислительных машин, комплексов и сетей;
- методы и средства защиты информации.

1. В журнале печатаются статьи, содержащие результаты, ранее не опубликованные и не предназначенные к одновременной публикации в других изданиях.

Публикация предоставленной автором(ами) рукописи не должна нарушать положений глав 69, 70 раздела VII части IV Гражданского кодекса, которые определяют права на результаты интеллектуальной деятельности и средства индивидуализации, в том числе авторские права, в РФ.

Ответственность за нарушение авторских прав, в случае предъявления претензий к редакции журнала, несут авторы статей.

Направляя рукопись в редакцию, авторы сохраняют свои права на данную рукопись и при этом передают учредителям и редколлегии журнала неисключительные права на издание статьи на русском языке (или на языке статьи, если он отличен от русского) и на перевод ее на английский язык, а также на ее распространение в России и за рубежом. Каждый автор должен представить в редакцию подписанный с его стороны «Лицензионный договор о передаче неисключительных прав на использование произведения», текст которого размещен по адресу <http://www.ipiran.ru/publications/licence.doc>. Этот договор может быть представлен в бумажном (в 2-х экз.) или в электронном виде (отсканированная копия заполненного и подписанного документа).

Редколлегия вправе запросить у авторов экспертное заключение о возможности публикации представленной статьи в открытой печати.

2. К статье прилагаются данные автора (авторов) (см. п. 8). При наличии нескольких авторов указывается фамилия автора, ответственного за переписку с редакцией.
3. Редакция журнала осуществляет экспертизу присланных статей в соответствии с принятой в журнале процедурой рецензирования.

Возвращение рукописи на доработку не означает ее принятия к печати.

Доработанный вариант с ответом на замечания рецензента необходимо прислать в редакцию.

4. Решение редколлегии о публикации статьи или ее отклонении сообщается авторам. Редколлегия может также направить авторам текст рецензии на их статью. Дискуссия по поводу отклоненных статей не ведется.

5. Редактура статей высылается авторам для просмотра. Замечания к редакции должны быть присланы авторами в кратчайшие сроки.
6. Рукопись предоставляется в электронном виде в форматах MS WORD (.doc или .docx) или L^AT_EX (.tex), дополнительно — в формате .pdf, на дискете, лазерном диске или электронной почтой. Предоставление бумажной рукописи необязательно.
7. При подготовке рукописи в MS Word рекомендуется использовать следующие настройки.

Параметры страницы: формат — А4; ориентация — книжная; поля (см): внутри — 2,5, снаружи — 1,5, сверху и снизу — 2, от края до нижнего колонтитула — 1,3.

Основной текст: стиль — «Обычный», шрифт — Times New Roman, размер — 14 пунктов, абзацный отступ — 0,5 см, 1,5 интервала, выравнивание — по ширине.

Рекомендуемый объем рукописи — не свыше 15 страниц указанного формата. При превышении указанного объема редколлегия вправе потребовать от автора сокращения объема рукописи.

Сокращения слов, помимо стандартных, не допускаются. Допускается минимальное количество аббревиатур.

Все страницы рукописи нумеруются.

Шаблоны примеров оформления представлены в Интернете:

<http://www.ipiran.ru/publications/collected/template.doc>

8. Статья должна содержать следующую информацию на **русском и английском языках**:
 - название статьи;
 - Ф.И.О. авторов, на английском можно только имя и фамилию;
 - место работы, с указанием города и страны и электронного адреса каждого автора;
 - сведения об авторах, в соответствии с форматом, образцы которого представлены на страницах:
http://www.ipiran.ru/journal/collected/2012.22.02_rus/authors.asp и
http://www.ipiran.ru/journal/collected/2012.22.02_eng/authors.asp;
 - аннотация (не менее 100 слов на каждом из языков). Аннотация — это краткое резюме работы, которое может публиковаться отдельно. Она является основным источником информации в информационных системах и базах данных. Английская аннотация должна быть оригинальной, может не быть дословным переводом русского текста и должна быть написана хорошим английским языком. В аннотации не должно быть ссылок на литературу и, по возможности, формул;
 - ключевые слова — желательно из принятых в мировой научно-технической литературе тематических тезаурусов. Предложения не могут быть ключевыми словами.
 - источники финансирования работы (ссылка на гранты, проекты, поддерживающие организации и т. п.).
9. Требования к спискам литературы.

Ссылки на литературу в тексте статьи нумеруются (в квадратных скобках) и располагаются в каждом из списков литературы в порядке первых упоминаний.

Списки литературы представляются в двух вариантах:

- (1) **Список литературы к русскоязычной части.** Русские и английские работы — на языке и в алфавите оригинала.
- (2) **References.** Русские работы и работы на других языках — в латинской транслитерации с переводом на английский язык; английские работы и работы на других языках — на языке оригинала.

Необходимо для составления списка “References” пользоваться размещенной на сайте <http://www.translit.net/ru/bgn/> бесплатной программой транслитерации русского текста в латиницу.

Список литературы “References” приводится полностью отдельным блоком, повторяя все позиции из списка литературы к русскоязычной части, независимо от того, имеются или нет в нем иностранные источники. Если в списке литературы к русскоязычной части есть ссылки на иностранные публикации, набранные латиницей, они полностью повторяются в списке “References”.

Примеры ссылок на различные виды публикаций в списке “References”:

Описание статьи из журнала:

Zhang, Z., and D. Zhu. 2008. Experimental research on the localized electrochemical micromachining. *Rus. J. Electrochem.* 44(8):926–930. doi:10.1134/S1023193508080077.

Описание статьи из электронного журнала:

Swaminathan, V., E. Lepkoswka-White, and B. P. Rao. 1999. Browsers or buyers in cyberspace? An investigation of electronic factors influencing electronic exchange. *JCMC* 5(2). Available at: <http://www.ascusc.org/jcmc/vol5/issue2/> (accessed April 28, 2011).

Описание материалов конференций:

Usmanov, T. S., A. A. Gusmanov, I. Z. Mullagalin, R. Ju. Muhametshina, A. N. Chervyakova, and A. V. Sveshnikov. 2007. Osobennosti proektirovaniya razrabotki mestorozhdeniy s primeneniem gidrorazryva plasta [Features of the design of field development with the use of hydraulic fracturing]. *Trudy 6-go Mezhdunarodnogo Simpoziuma “Novye resursoberegayushchie tekhnologii nedropol’zovaniya i povyshe-niya neftegazootdachi”* [6th Symposium (International) “New Energy Saving Subsoil Technologies and the Increasing of the Oil and Gas Impact” Proceedings]. Moscow. 267–272.

Описание книги (монографии, сборники):

Lindorf, L. S., and L. G. Mamikonians, eds. 1972. *Ekspluatatsiya turbogeneratorov s neposredstvennym okhlazhdeniem* [Operation of turbine generators with direct cooling]. Moscow: Energy Publs. 352 p.

Описание переводной книги (в списке литературы к русскоязычной части необходимо указать: / Пер. с англ. — после названия книги, а в конце ссылки указать оригинал книги в круглых скобках):

1. В русскоязычной части:

Тимошенко С. П., Янг Д. Х., Уивер У. Колебания в инженерном деле / Пер. с англ. — М.: Машиностроение, 1985. 472 с. (*Timoshenko S. P., Young D. H., Weaver W.* Vibration problems in engineering. — 4th ed. — N.Y.: Wiley, 1974. 521 p.)

2. В англоязычной части:

Timoshenko, S. P., D. H. Young, and W. Weaver. 1974. *Vibration problems in engineering*. 4th ed. N.Y.: Wiley. 521 p.

Описание неопубликованного документа:

Latypov, A. R., M. M. Khasanov, and V. A. Baikov. 2004. Geology and production (NGT GiD). Certificate on official registration of the computer program No. 2004611198. (In Russian, unpubl.)

Описание интернет-ресурса:

Pravila tsitirovaniya istochnikov [Rules for the citing of sources]. Available at: <http://www.scribd.com/doc/1034528/> (accessed February 7, 2011).

Описание диссертации или автореферата диссертации:

Semenov, V. I. 2003. Matematicheskoe modelirovanie plazmy v sisteme kompaktnyy tor [Mathematical modeling of the plasma in the compact torus]. D.Sc. Diss. Moscow. 272 p.

Kozhunova, O. S. 2009. Tekhnologiya razrabotki semanticheskogo slovarya informatsionnogo monitoringa [Technology of development of semantic dictionary of information monitoring system]. PhD Thesis. Moscow: IPI RAN. 23 p.

Описание ГОСТа:

GOST 8.586.5-2005. 2007. Metodika vypolneniya izmereniy. Izmerenie raskhoda i kolichestva zhidkostey i gazov s pomoshch'yu standartnykh suzhayushchikh ustroystv [Method of measurement. Measurement of flow rate and volume of liquids and gases by means of orifice devices]. Moscow: Standardinform Pubs. 10 p.

Описание патента:

Bolshakov, M. V., A. V. Kulakov, A. N. Lavrenov, and M. V. Palkin. 2006. Spособ orientirovaniya po krenu letatel'nogo apparata s opticheskoy golovkoy samonavedeniya [The way to orient on the roll of aircraft with optical homing head]. Patent RF No. 2280590.

10. Присланные в редакцию материалы авторам не возвращаются.
11. При отправке файлов по электронной почте просим придерживаться следующих правил:
 - указывать в поле subject (тема) название журнала и фамилию автора;
 - использовать attach (присоединение);
 - в состав электронной версии статьи должны входить: файл, содержащий текст статьи, и файл(ы), содержащий(е) иллюстрации.
12. Журнал «Системы и средства информатики» является некоммерческим изданием. Плата за публикацию не взимается, гонорар авторам не выплачивается.

Адрес редакции журнала «Системы и средства информатики»:

Москва 119333, ул. Вавилова, д. 44, корп. 2, ФИЦ ИУ РАН
Тел.: +7 (499) 135-86-92 Факс: +7 (495) 930-45-05
e-mail: rust@ipiran.ru (Сейфуль-Мулюков Рустем Бадриевич)
<http://www.ipiran.ru/journal/collected>

Requirements for manuscripts submitted to Journal “Systems and Means of Informatics”

Journal “Systems and Means of Informatics” publishes theoretical, review, and discussion articles on the research and development in the field of information technology.

The journal is published in Russian. By a special decision of the editorial board, some articles can be published in English.

Topics covered include the following areas:

- information and communication systems and tools of their design;
 - architecture and software of computational complexes and networks; and
 - methods and tools of information protection.
1. The Journal publishes original articles which have not been published before and are not intended for simultaneous publication in other editions. An article submitted to the Journal must not violate the Copyright law. Sending the manuscript to the Editorial Board, the authors retain all rights of the owners of the manuscript and transfer the nonexclusive rights to publish the article in Russian (or the language of the article, if not Russian) and its distribution in Russia and abroad to the Founders and the Editorial Board. Authors should submit a letter to the Editorial Board in the following form:

Agreement on the transfer of rights to publish:

“We, the undersigned authors of the manuscript “. . . ,” pass to the Founder and the Editorial Board of the Journal “Systems and Means of Informatics” the nonexclusive right to publish the manuscript of the article in Russian (or in English) in both print and electronic versions of the Journal. We affirm that this publication does not violate the Copyright of other persons or organizations.

Author(s) signature(s): (name(s), address(es), date).”

This agreement should be submitted in paper form or in the form of a scanned copy (signed by the authors).

The Editorial Board has the right to request from the authors an official expert conclusion that the submitted article has no classified data prohibited for publication.

2. A submitted article should be attached with **the data on the author(s)** (see item 8). If there are several authors, the contact person should be indicated who is responsible for correspondence with the Editorial Board and other authors about revisions and final approval of the proofs.
3. The Editorial Board of the Journal examines the article according to the established reviewing procedure. If authors receive their article for correction after reviewing, it does not mean that the article is approved to be published. The corrected article should be sent to the Editorial Board for the subsequent review and approval.
4. The decision on the article publication or its rejection is communicated to the authors. The Editorial Board may also send the reviews on the submitted articles to the authors. Any discussion upon the rejected articles is not possible.
5. The edited articles will be sent to the authors for proofread. The comments of the authors to the edited text of the article should be sent to the Editorial Board as soon as possible.
6. The manuscript of the article should be presented electronically in the MS WORD (.doc or .docx) or L^AT_EX (.tex) formats, and additionally in the .pdf format. All documents

may be sent by e-mail or provided on a CD or diskette. A hard copy submission is not necessary.

7. The recommended typesetting instructions for manuscript.

Pages parameters: format A4, portrait orientation, document margins (cm): left — 2.5, right — 1.5, above — 2.0, below — 2.0, footer 1.3.

Text: font — Times New Roman, font size — 14, paragraph indent — 0.5, line spacing — 1.5, justified alignment.

The recommended manuscript size: not more than 15 pages of the specified format. If the specified size exceeded, the editorial board is entitled to require the author to reduce the manuscript.

Use only standard abbreviations. Avoid abbreviations in the title and abstract. The full term for which an abbreviation stands should precede its first use in the text unless it is a standard unit of measurement.

All pages of the manuscript should be numbered.

The templates for the manuscript typesetting are presented on site:

<http://www.ipiran.ru/publication/collected/template.doc>

8. Articles should enclose data both in **Russian and English**:

- title;
- author's name and surname;
- affiliation — organization, its address with ZIP code, city, country, and official e-mail address;
- data on authors according to the format (see site):
http://www.ipiran.ru/journal/collected/2012_22_02_rus/authors.asp and
http://www.ipiran.ru/journal/collected/2012_22_02_eng/authors.asp;
- abstract (not less than 100 words) both in Russian and in English. Abstract is a short summary of the article that can be published separately. The abstract is the main source of information on the article and it could be included in leading information systems and data bases. The abstract in English has to be an original text and should not be an exact translation of the Russian one. Good English is required. In abstracts, avoid references and formulae.
- Indexing is performed on the basis of keywords. The use of keywords from the internationally accepted thematic Thesauri is recommended.
Important! Keywords must not be sentences.
- Acknowledgments.

9. References. Russian references have to be presented both in English translation and in Latin transliteration (refer <http://www.translit.net/ru/bgn/>).

Please take into account the following examples of Russian references appearance:

Article in journal:

Zhang, Z., and D. Zhu. 2008. Experimental research on the localized electrochemical micromachining. *Rus. J. Electrochem.* 44(8):926–930. doi:10.1134/S1023193508080077.

Journal article in electronic format:

Swaminathan, V., E. Lepkoswka-White, and B. P. Rao. 1999. Browsers or buyers in cyberspace? An investigation of electronic factors influencing electronic

exchange. *JCMC* 5(2). Available at: <http://www.ascusc.org/jcmc/vol5/issue2/> (accessed April 28, 2011).

Conference proceedings:

Usmanov, T. S., A. A. Gusmanov, I. Z. Mullagalin, R. Ju. Muhametshina, A. N. Chervyakova, and A. V. Sveshnikov. 2007. Osobennosti proektirovaniya razrabotki mestorozhdeniy s primeneniem gidrorazryva plasta [Features of the design of field development with the use of hydraulic fracturing]. *Trudy 6-go Mezhdunarodnogo Simpoziuma "Novye resursoberegayushchie tekhnologii nedropol'zovaniya i povyshe-niya neftegazootdachi"* [6th Symposium (International) "New Energy Saving Subsoil Technologies and the Increasing of the Oil and Gas Impact" Proceedings]. Moscow. 267–272.

Books and other monographs:

Lindorf, L. S., and L. G. Mamikonians, eds. 1972. *Ekspluatatsiya turbogenera-torov s neposredstvennym okhlazhdeniem* [Operation of turbine generators with direct cooling]. Moscow: Energy Publ. 352 p.

Dissertation and Thesis:

Kozhunova, O. S. 2009. Tekhnologiya razrabotki semanticheskogo slovaryaya informat-sionnogo monitoringa [Technology of development of semantic dictionary of information monitoring system]. PhD Thesis. Moscow: IPI RAN. 23 p.

State standards and patents:

GOST 8.586.5-2005. 2007. Metodika vypolneniya izmereniy. Izmerenie raskhoda i kolichestva zhidkostey i gazov s pomoshch'yu standartnykh suzhayushchikh ustroystv [Method of measurement. Measurement of flow rate and volume of liquids and gases by means of orifice devices]. M.: Standardinform Publ. 10 p.

Bolshakov, M. V., A. V. Kulakov, A. N. Lavrenov, and M. V. Palkin. 2006. Sposob orientirovaniya po krenu letatel'nogo apparata s opticheskoy golovkoy samonavedeniya [The way to orient on the roll of aircraft with optical homing head]. Patent RF No. 2280590.

References in Latin transcription are presented in the original language.

References in the text are numbered according to the order of their first appearance; the number is placed in square brackets. All items from the reference list should be cited.

10. Manuscripts and additional materials are not returned to Authors by the Editorial Board.
11. Submissions of files by e-mail must include:
 - the journal title and author's name in the "Subject" field;
 - an article and additional materials have to be attached using the "attach" function;
 - an electronic version of the article should contain the file with the text and a separate file with figures.
12. "System and Means of Informatics" journal is not a profit publication. There are no charges for the authors as well as there are no royalties.

Editorial Board address:

FRC CSC RAS, 44, block 2, Vavilov Str., Moscow 119333, Russia

Ph.: +7 (499) 135 86 92, Fax: +7 (495) 930 45 05

e-mail: rust@ipiran.ru (to Prof. Rustem Seyful-Mulyukov)

http://www.ipiran.ru/english/journal_systems.asp

SYSTEMS AND MEANS OF INFORMATICS (SISTEMY I SREDSTVA INFORMATIKI)

SCIENTIFIC JOURNAL

Volume 29 No.1 Year 2019

Editor-in-Chief and Chair of Editorial Council
Academician I. A. Sokolov

IN THIS ISSUE:

- METHODS OF PROTECTION AGAINST MASS INACTIVATION OF LOW PROTECTED COMPUTERS OF DIGITAL ECONOMY
A. A. Grusho, N. A. Grusho, and E. E. Timonina 4
- TECHNOLOGICAL ASPECTS OF INFORMATION SECURITY IN THE FINANCIAL MARKET IN TERMS OF DIGITAL TRANSFORMATION OF THE RUSSIAN ECONOMY
A. A. Zatsarinny and V. I. Korolev 12
- THE SYSTEM OF SCIENTIFIC SERVICES AS A RELEVANT COMPONENT OF SCIENTIFIC RESEARCH
A. A. Zatsarinny, V. A. Kondrashev, and A. P. Suchkov 25
- FUNCTIONAL STRUCTURE OF THE HYBRID INTELLIGENT MULTIAGENT SYSTEM OF HETEROGENEOUS THINKING FOR SOLVING THE PROBLEM OF RESTORING THE DISTRIBUTION POWER GRID
A. V. Kolesnikov and S. V. Listopad 41
- INFORMATIONAL SUPPORT OF THE MULTISCALE MODELING INTEGRATION PLATFORM
K. K. Abgaryan and E. S. Gavrilov 53
- A WAY TO ENHANCE THROUGHPUT OF PACKET SWITCHES BUILT ON THE BASIS OF INTEGRATED NETWORK PROCESSORS
V. B. Egorov 63
- TYPES OF INHOMOGENEITIES IN THE STRUCTURE OF GEODATA GENERALIZATION
D. A. Nikishin 74
- ELECTRONIC CATALOG OF THE LIBRARY FOR NATURAL SCIENCES OF THE RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES AS A SPECIALIZED INFORMATION RETRIEVAL SYSTEM FOCUSED ON A QUALIFIED USER
S. A. Vlasova and N. E. Kalenov 86
- A MATHEMATICAL MODEL OF THE PROBLEM OF PLANT PROTECTION IN A BIOSYSTEM OF THE TYPE "HARMFUL INSECTS – BENEFICIAL INSECTS" WITH ARBITRARY TROPHIC FUNCTIONS
R. N. Odinaev 96