

# БИЗНЕС- ИНФОРМАТИКА

МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

## СОДЕРЖАНИЕ

### *Моделирование социально-экономических систем*

*В.П. Романов, Б.А. Ахмадеев*

Моделирование инновационной экосистемы  
на основе модели «хищник-жертва» ..... 7

*А.И. Громов, Ю.А. Билинчис, А. Фляйшман,  
Т.В. Новикова, Е.И. Худобин, Д.В. Торшин*

Подход к построению модели  
инновационного процесса на платформе  
субъектно-ориентированной методологии ..... 18

### *Математические методы и алгоритмы решения задач бизнес-информатики*

*V. Gurvich*

A four-person chess-like game without Nash  
equilibria in pure stationary strategies ..... 31

*О.И. Бабина*

Имитационная модель склада промышленного  
предприятия по производству бетона ..... 41

*Е.Н. Ефимов, Г.М. Лапицкая*

Оценка эффективности мероприятий  
информационной безопасности  
в условиях неопределенности ..... 51

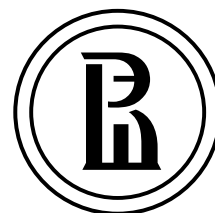
### *Анализ данных и интеллектуальные системы*

*Л.А. Демидова*

Подход к оценке качества моделей  
прогнозирования на основе строго бинарных  
деревьев и модифицированного алгоритма  
клонального отбора ..... 58

*А.Л. Бекларян, А.С. Акопов*

Моделирование поведения толпы  
на основе интеллектуальной динамики  
взаимодействующих агентов ..... 69



*Издатель:*

Национальный  
исследовательский университет  
«Высшая школа экономики»

**Подписной индекс  
в каталоге агентства  
«Роспечать» –72315**

Выпускается ежеквартально

*Журнал включен в Перечень  
российских рецензируемых  
научных журналов,  
в которых должны быть  
опубликованы основные научные  
результаты диссертаций  
на соискание ученых степеней  
доктора и кандидата наук*

*Главный редактор  
А.О. Голосов*

*Заместители главного редактора  
А.Р. Горбунов, Д.В. Исаев*

*Научный редактор  
Н.Н. Лычкина*

*Технический редактор  
В.И. Осипов*

*Дизайн обложки  
С.Н. Борисова*

*Компьютерная верстка  
О.А. Богданович*

*Администратор веб-сайта  
Д.С. Проценко*

Журнал рекомендован ВАК  
для научных публикаций

*Адрес редакции:*  
105187, г. Москва, ул. Кирпичная, д. 33  
Тел./факс: +7 (495) 771-32-38  
<http://bijournal.hse.ru>  
E-mail: [bijournal@hse.ru](mailto:bijournal@hse.ru)

За точность приведенных сведений  
и содержание данных,  
не подлежащих открытой публикации,  
несут ответственность авторы

**При перепечатке ссылка на журнал  
«Бизнес-информатика» обязательна**

*Тираж 500 экз.*

Отпечатано в типографии НИУ ВШЭ  
г. Москва, Кочновский проезд, 3

© Национальный  
исследовательский университет  
«Высшая школа экономики»

# О ЖУРНАЛЕ

«**Б**изнес-информатика» – рецензируемый междисциплинарный научный журнал, выпускаемый с 2007 года Национальным исследовательским университетом «Высшая школа экономики» (НИУ ВШЭ). Администрирование журнала осуществляется факультетом бизнес-информатики НИУ ВШЭ.

Миссия журнала – развитие бизнес-информатики как новой области информационных технологий и менеджмента. Журнал осуществляет распространение последних разработок технологического и методологического характера, способствует развитию соответствующих компетенций, а также обеспечивает возможности для дискуссий в области применения современных информационно-технологических решений в бизнесе, менеджменте и экономике.

Журнал публикует статьи по следующей тематике:

- ◆ корпоративные информационные системы;
- ◆ информационные технологии в бизнесе;
- ◆ организационные и управленческие проблемы создания и внедрения информационных систем;
- ◆ математическое моделирование социально-экономических процессов;
- ◆ методы анализа информации;
- ◆ интеллектуальные системы и управление знаниями в бизнесе;
- ◆ информационные сети и телекоммуникации;
- ◆ программная инженерия;
- ◆ информационная безопасность;
- ◆ электронный бизнес;
- ◆ инновации и бизнес в сфере информационных технологий;
- ◆ стандартизация, сертификация и качество;
- ◆ правовые вопросы бизнес-информатики;
- ◆ обучение в сфере бизнес-информатики.

В соответствии с решением президиума Высшей аттестационной комиссии Российской Федерации с 2010 года журнал включен в Перечень российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук.

Журнал выпускается ежеквартально и распространяется как в печатном виде, так и в электронной форме.

Журнал «Бизнес-информатика» зарегистрирован в «Роскомнадзоре».  
Свидетельство ПИ № ФС 7752404 от 28 декабря 2012 г.

## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

### ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

**ГОЛОСОВ Алексей Олегович** — кандидат технических наук, Президент компании «ФОРС — Центр разработки»

### ЗАМЕСТИТЕЛИ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

**ГОРБУНОВ Алексей Рэмович** — кандидат экономических наук, старший научный сотрудник, Института США и Канады РАН

**ИСАЕВ Дмитрий Валентинович** — кандидат экономических наук, доцент кафедры бизнес-аналитики, факультет бизнес-информатики, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»

### ЧЛЕНЫ РЕДКОЛЛЕГИИ

**АБДУЛЬРАБ Абиб** — PhD, профессор департамента математики и программной инженерии, Национальный институт прикладных наук, Руан, Франция

**АВДОШИН Сергей Михайлович** — кандидат технических наук, профессор, руководитель департамента программной инженерии, факультет компьютерных наук, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»

**АЛЕСКЕРОВ Фуад Тагиевич** — доктор технических наук, профессор, руководитель департамента математики, факультет экономических наук, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»

**БАБКИН Эдуард Александрович** — кандидат технических наук, PhD, профессор кафедры информационных систем и технологий, факультет бизнес-информатики и прикладной математики (Нижний Новгород), Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»

**БАЙЕР Алекс** — PhD, Директор KAFAN FX Information Services, Нью-Йорк, США

**БАРАНОВ Александр Павлович** — доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой информационной безопасности, факультет бизнес-информатики, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»

**БЕККЕР Йорг** — PhD, проректор, профессор, директор Европейского исследовательского центра в области информационных систем (ERCIS) Мюнстерского университета, Мюнстер, Германия

**БЕЛОВ Владимир Викторович** — доктор технических наук, профессор кафедры вычислительной и прикладной математики, факультет вычислительной техники, Рязанский государственный радиотехнический университет.

**ГРИБОВ Андрей Юрьевич** — кандидат экономических наук, Генеральный директор компании «КиберПлат»

**ГРОМОВ Александр Игоревич** — кандидат химических наук, профессор, заведующий кафедрой моделирования и оптимизации бизнес-процессов, факультет бизнес-информатики, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»

**ГУРВИЧ Владимир Александрович** — PhD, приглашенный профессор и исследователь, Центр исследования операций, Ратгерский университет (Университет Нью-Джерси), США

**ДЖЕЙКОБС Лоренц** — PhD, профессор медицинского факультета, Университет Цюриха, Швейцария

**ЗАНДКУЛЬ Курт** — PhD, заведующий кафедрой информационных систем для бизнеса, институт информатики, факультет информатики и электротехники, Университет Ростока, Германия

**ИЛЬИН Николай Иванович** — доктор технических наук, профессор, заместитель начальника Управления специальной связи, Федеральная служба охраны Российской Федерации (ФСО России)

**КАЛЯГИН Валерий Александрович** — доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой прикладной математики и информатики, факультет бизнес-информатики и прикладной математики (Нижний Новгород), Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»

**КАМЕННОВА Мария Сергеевна** — кандидат технических наук, директор компании «Логика ВРМ»

**КУЗНЕЦОВ Сергей Олегович** — доктор физико-математических наук, профессор, руководитель департамента анализа данных и искусственного интеллекта, факультет компьютерных наук, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»

**МАЛЬЦЕВА Светлана Валентиновна** — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой инноваций и бизнеса в сфере информационных технологий, декан факультета бизнес-информатики, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»

**МЕЙОР Питер** — PhD, заместитель директора консультативной группы по радиокommunikациям, Международный телекоммуникационный союз (ITU), заместитель руководителя Комиссии ООН по науке и технологиям, Женева, Швейцария

**МИРКИН Борис Григорьевич** — доктор технических наук, профессор департамента анализа данных и искусственного интеллекта, факультет компьютерных наук, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»

**МОТТЛЬ Вадим Вячеславович** — доктор технических наук, профессор кафедры информационной безопасности, факультет кибернетики, Тульский государственный университет

**ПАЛЬЧУНОВ Дмитрий Евгеньевич** — доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой общей информатики, факультет информационных технологий, Новосибирский государственный университет

**ПАРДАЛОС Панайот (Панос)** — PhD, почетный профессор, директор центра прикладной оптимизации, департамент промышленной и системной инженерии, Университет Флориды, США

**СИЛАНТЬЕВ Альберт Юрьевич** — доктор технических наук, профессор кафедры информационных бизнес систем, Институт информационных бизнес-систем, Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

**ТАРАТУХИН Виктор Владимирович** — кандидат технических наук, PhD, руководитель научной группы Европейского исследовательского центра в области информационных систем (ERCIS) Мюнстерского университета, Мюнстер, Германия

**УЛЬЯНОВ Михаил Васильевич** — доктор технических наук, профессор департамента программной инженерии, факультет компьютерных наук, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»

**ШАЛКОВСКИЙ Алексей Геннадьевич** — кандидат технических наук, директор Института информационных технологий, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»

ISSN 1998-0663

# BUSINESS INFORMATICS

INTERDISCIPLINARY ACADEMIC JOURNAL

## CONTENTS

### *Modeling of social and economic systems*

*V. Romanov, B. Akhmadeev*

Innovation ecosystem modelling  
based on «predator-prey» model .....7

*A. Gromoff, J. Bilinkis, A. Fleischmann,  
T. Novikova, E. Khudobin, D. Torshin*

An approach to innovation process model  
development using subject-oriented  
methodology platform ..... 18

### *Mathematical methods and algorithms of business informatics*

*V. Gurvich*

A four-person chess-like game without Nash  
equilibria in pure stationary strategies.....31

*O. Babina*

A simulation model of a warehouse  
of an industrial enterprise for concrete production.....41

*E. Efimov, G. Lapitskaya*

Evaluation of information security  
effectiveness measures under uncertainty.....51

### *Data analysis and intelligence systems*

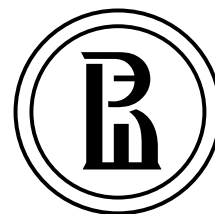
*L. Demidova*

An approach to evaluation of forecasting  
models quality using strictly binary trees  
and modified clonal selection algorithm .....58

*A. Beklaryan, A. Akopov*

Simulation of human crowd behavior based  
on intellectual dynamics of interacting agents.....69

№1(31)-2015



*Publisher:*

National Research University –  
Higher School of Economics

**Subscription index  
in the «Rospechat» catalogue –  
72315**

The journal is published quarterly

*The journal is included  
into the list of peer reviewed  
scientific editions established  
by the Supreme Certification  
Commission of the Ministry  
of Education and Science  
of the Russian Federation*

*Editor-in-Chief:*

**A. Golosov**

*Deputies Editor-in-Chief:*

**A. Gorbunov, D. Isaev**

*Scientific Editor:*

**N. Lychkina**

*Technical Editor:*

**V. Osipov**

*Design:*

**S. Borisova**

*Computer Making-up:*

**O. Bogdanovich**

*Website Administration:*

**D. Protsenko**

*Address:*

33, Kirpichnaya str., Moscow,  
105187, Russian Federation

Tel./fax: +7 (495) 771-32-38

<http://bijournal.hse.ru>

E-mail: [bijournal@hse.ru](mailto:bijournal@hse.ru)

*Circulation – 500 copies*

Printed in HSE Printing House  
3, Kochnovsky proezd, Moscow,  
Russian Federation

© National Research University –  
Higher School of Economics

# ABOUT THE JOURNAL

**B**usiness Informatics is a peer reviewed interdisciplinary academic journal published since 2007 by National Research University – Higher School of Economics (HSE), Moscow, Russian Federation. The journal is administered by Faculty of Business Informatics.

The mission of the journal is to develop business informatics as a new field within both information technologies and management. It provides dissemination of latest technical and methodological developments, promotes new competences and provides a framework for discussion in the field of application of modern IT solutions in business, management and economics.

The journal publishes papers in the areas of, but not limited to:

- ◆ Corporate information systems
- ◆ Information technologies in business
- ◆ Organizational and managerial problems of information systems development and implementation
- ◆ Mathematical modeling of economic and social processes
- ◆ Methods of information analysis
- ◆ Intellectual systems and knowledge management in business
- ◆ Information networks and telecommunications
- ◆ Software engineering
- ◆ Information security
- ◆ Electronic business
- ◆ Innovations and business in the sphere of information technologies
- ◆ Standardization, certification and quality
- ◆ Legislation in the field of business informatics
- ◆ Education in the field of business informatics.

Since 2010 the journal is included into the list of peer reviewed scientific editions established by the Supreme Certification Commission of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation.

The journal is published quarterly and distributed both in printed and electronic forms.

---

---

## EDITORIAL BOARD

### *EDITOR-IN-CHIEF*

**Dr. Alexey GOLOSOV** –

President of FORS Development Center, Russian Federation

### *DEPUTY EDITOR-IN-CHIEF*

**Dr. Alexey GORBUNOV** –

Senior Researcher, Institute of US and Canada Studies

**Dr. Dmitry ISAEV** –

Associate Professor, Department of Business Analytics, Faculty of Business Informatics, National Research University Higher School of Economics, Russian Federation

### *EDITORIAL BOARD*

**Prof. Habib ABDULRAB** –

Professor, Mathematical and Software Engineering Department, National Institute of Applied Sciences – Institut national des sciences appliquées de Rouen (INSA de Rouen), Rouen, France

**Dr. Sergey AVDOSHIN** –

Professor, Head of School of Software Engineering, Faculty of Computer Science, National Research University Higher School of Economics, Russian Federation

**Prof. Fuad ALESKEROV** –

Professor, Head of Department of Mathematics, Faculty of Economics, National Research University Higher School of Economics, Russian Federation

**Dr. Eduard BABKIN** –

Professor, Department of Information Systems and Technologies, Faculty of Business Informatics and Applied Mathematics (Nizhny Novgorod), National Research University Higher School of Economics, Russian Federation

**Dr. Alex BAYER** –

Head of KAFAN FX Information Services, New York, USA

**Prof. Alexander BARANOV** –

Professor, Head of Department of Information Security Management, Faculty of Business Informatics, National Research University Higher School of Economics, Russian Federation

**Prof. Jorg BECKER** –

Vice Rector, Professor, Director of European Research Center for Information Systems (ERCIS), University of Munster, Germany

**Prof. Vladimir BELOV** –

Professor, Department of Computational and Applied Mathematics, Faculty of Computer Engineering, Ryazan State Radio Engineering University, Russian Federation

**Dr. Andrey GRIBOV** –

Director General, CyberPlat Company, Russian Federation

**Prof. Alexander GROMOV** –

Professor, Head of Department of Modeling and Business Process Optimization, Faculty of Business Informatics, National Research University Higher School of Economics, Russian Federation

**Prof. Vladimir GURVICH** –

Invited Professor and Researcher, Rutgers Center for Operations Research, Rutgers, The State University of New Jersey, USA

**Prof. Laurence JACOBS** –

Professor, Medical School, University of Zurich, Switzerland

**Prof. Kurt SANDKUHL** –

Head of Department of Business Information Systems, Institute of Computer Science, Faculty of Computer Science and Electrical Engineering, University of Rostock, Germany

**Dr. Nikolay ILYIN** –

Deputy Head, Administration of Special Communication, Federal Security Guard, Russian Federation

**Prof. Valery KALYAGIN** –

Professor, Head of Department of Applied Mathematics and Informatics, Faculty of Business Informatics and Applied Mathematics (Nizhny Novgorod), National Research University Higher School of Economics, Russian Federation

**Dr. Maria KAMENNOVA** –

Director, BPM Logic, Russian Federation

**Prof. Sergey KUZNETSOV** –

Professor, Head of School of Data Analysis and Artificial Intelligence, Faculty of Computer Science, National Research University Higher School of Economics, Russian Federation

**Prof. Svetlana MALTSEVA** –

Professor, Head of Department of Innovation and Business in Information Technologies, Dean of Faculty of Business Informatics, National Research University Higher School of Economics, Russian Federation

**Dr. Peter MAJOR** –

Vice-chairman, Radiocommunication Advisory Group of International Telecommunication Union (ITU), vice-chairman of the UN Commission on Science and Technology for Development (CSTD), Geneva, Switzerland

**Prof. Boris MIRKIN** –

Professor, School of Data Analysis and Artificial Intelligence, Faculty of Computer Science, National Research University Higher School of Economics, Russian Federation

**Prof. Vadim MOTTL** –

Professor, Department of Information Security Management, Faculty of Cybernetics, Tula State University, Russian Federation

**Prof. Dmitry PALCHUNOV** –

Head of Department of General Informatics, Faculty of Information Technologies, Novosibirsk State University, Russian Federation

**Prof. Panagote (Panos) PARDALOS** –

Distinguished Professor and University of Florida Research Foundation Professor, Director of Center for Applied Optimization, Department of Industrial and Systems Engineering, University of Florida, USA

**Dr. Albert SILANTYEV** –

Professor, Department of Information Business Systems, Institute of Information Business Systems, National University of Science and Technology «MISIS», Russian Federation

**Dr. Victor TARATOUKHIN** –

Managing Director European Research Center for Information Systems (ERCIS) Competence Center ERP, Head of ERCIS Lab. Russia, University of Munster, Germany

**Prof. Mikhail ULYANOV** –

Professor, School of Software Engineering, Faculty of Computer Science, National Research University Higher School of Economics, Russian Federation

**Dr. Alexey SHALKOVSKY** –

Director of Institute of Information Technologies, National Research University Higher School of Economics, Russian Federation

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ИННОВАЦИОННОЙ ЭКОСИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ «ХИЩНИК-ЖЕРТВА»

## **В.П. РОМАНОВ**

*доктор технических наук, профессор кафедры информационных систем в экономике и менеджменте, факультет математической экономики и информатики, Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова*

*Адрес: 117997, Москва, Стремянный пер., д. 36  
E-mail: victorromanov1@gmail.com*

## **Б.А. АХМАДЕЕВ**

*аспирант кафедры информационных систем в экономике и менеджменте, факультет математической экономики и информатики, Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова*

*Адрес: 117997, Москва, Стремянный пер., д. 36  
E-mail: bulat.a@mail.ru*

В работе анализируется понятие и сущность процессов слияний и поглощений компаний, приводится аналитический обзор имеющейся в научной и специальной литературе информации об этих процессах. Выявлены мотивы и цели участников данных сделок, а также их виды. Рассмотрены наиболее значимые слияния и поглощения компаний в сфере информационных технологий за последнее десятилетие, показан синергетический эффект от этих процессов в их деятельности, проявляющийся в случае, когда цель поглощения — доступ к новым технологиям или погоня за талантливыми кадрами. Показаны последствия слияний и поглощений компаний с позиции процессов развития природных экосистем, проводятся аналогии с биологическими отношениями, имеющими характер поглощения типа «хищник-жертва». Выявлено, что объекты в экономических системах имеют схожее поведение с поведением объектов в биологических системах. Показано, что биологическая экосистема в определенном виде может иметь инновационный характер, формируясь за счет построения эффективных финансовых, информационных и других видов обратных связей между хозяйствующими субъектами. Анализируется понятие инновационной экосистемы и разбираются основные факторы, приводящие к ее росту. Предлагается авторская модель динамического развития инновационной экосистемы на основе модели Лотки-Вольтерры (модель «хищник-жертва»), где хищники представлены корпорациями, а жертвы — малыми инновационными предприятиями (МИП). Модель, реализованная в авторской компьютерной программе, при определенных параметрах системы дает монотонный экспоненциальный рост популяций. Сделаны выводы о том, что рост инновационной экосистемы возможен за счет правильного регулирования параметров налогообложения корпораций, дотаций малым инновационным предприятиям, регулированию внутривидовой конкуренции и коэффициента поглощения малых инновационных предприятий корпорациями.

**Ключевые слова:** слияние и поглощение, инновационная экосистема, модель «хищник-жертва», модель Лотки-Вольтерры, системная динамика.

**Цитирование:** Романов В.П., Ахмадеев Б.А. Моделирование инновационной экосистемы на основе модели «хищник-жертва» // Бизнес-информатика. 2015. № 1 (31). С. 7–17.

## 1. Введение

Одним из условий конкурентоспособности российских компаний на международных рынках, обеспечения высокого экономического роста, повышения качества жизни и реализации национальных приоритетов является эффективное использование результатов фундаментальных научных исследований и разработок в коммерческом секторе экономики. В этих условиях большое значение приобретает развитие инновационного потенциала экономики, определяемого совокупностью необходимых технических, производственных, организационных, маркетинговых и финансовых операций и обеспечивающего реализацию эффективных нововведений в экономике и социальной сфере. Развитие инновационной составляющей экономики является объектом приоритетного внимания со стороны органов управления. Основными направлениями политики Российской Федерации в области инновационного развития до 2020 г. (утверждены Распоряжением Правительства РФ от 8 декабря 2011 г. №2227-р) являются долгосрочное развитие субъектов инновационной деятельности, а также финансирование сектора фундаментальной и прикладной науки и поддержки коммерциализации разработок [1].

В инновационной экономике конкурентные преимущества во многом определяются инновациями и конкурентным применением знаний. Зарождение новых технологий и инновационных решений подразумевает воплощение идеи в жизнь в реальной экономической среде, где существуют как позитивные, так и негативные факторы, сказывающиеся на формировании инновации. Если прорывная технология сталкивается в своем развитии с чрезмерно враждебной средой, то ее развитие может остановиться вплоть до полного упадка. С другой стороны, умеренно враждебная конкурентная среда может дать развитие грандиозным идеям и технологиям, устранив в то же время слабые и бесперспективные решения.

В связи с этим важна роль благоприятной экосреды, под которой мы понимаем систему, включающую все живущие в какой-либо зоне объекты, а также их физическое окружение, функционирующие вместе как целое [4]. В частности, в работе [17] приводятся следующие условия благоприятной среды для успешной инкубации новых технологий:

- ◆ творческая предпринимательская среда;
- ◆ присутствие исследовательских институтов, ра-

ботающих в качестве механизмов взращивания;

- ◆ наличие высокопрофессиональной рабочей силы;
- ◆ поддержка НИОКР для малых предприятий;
- ◆ доступность венчурного капитала;
- ◆ стимулирующий предпринимательский климат;
- ◆ доступность недорогих зон для предпринимательской активности в области инноваций;
- ◆ доступ к различной информации;
- ◆ международная доступность.

Однако, крупные компании время от времени упускают из вида зарождающиеся инновационные технологии. Они не имеют возможности следить за всеми новыми технологиями и трендами, поэтому вынуждены искать иные методы инновационного развития. Одним из таких методов является поглощение малых компаний, имеющих инновационные технологии.

Многие ученые сходятся во мнении, что крупным корпорациям выгоднее поглотить инновационную компанию, чем самим инвестировать в научные исследования [7]. Развитие бизнеса во всех сферах одновременно может привести к распылению средств с малой результативностью. Когда речь идет о покупке другой компании, корпорации ждут, пока малое инновационное предприятие (МИП) принесет результаты, и только тогда осуществляют его поглощение.

В исследовании мы придаем особое значение рассмотрению процессов слияния и поглощения компаний. Результат исследования имеет рекомендательный характер для изменения существующих структур и связей.

## 2. Слияния и поглощения

В экономической литературе широко обсуждается вопрос о синергетическом эффекте процессов слияний и поглощений компаний, как о ключевой причине их проявления в экономической деятельности, а также о том, что технологические причины являются основополагающими в этих процессах [9].

Рассмотрим само понятие и виды слияний и поглощений. В настоящее время в российской юриспруденции понятийный аппарат слияния и поглощения разработан в основном только на доктринальном уровне. В иностранной литературе нет разграничения этих понятий. Известная аббревиатура M&A (merger & acquisition) переводится как «слияние и поглощение». Под термином «merger»



понимается поглощение путем приобретения ценных бумаг или основного капитала, слияние, объединение компаний. Под понятием «acquisition» понимается приобретение, завладение, поглощение компании [17].

Слияние и поглощение может быть категоризовано в группы по структуре экономических взаимоотношений и по характеру интеграции: горизонтальное, вертикальное, родовое и конгломератное. Также слияния и поглощения могут подразделяться на дружественные и недружественные, а по локальному признаку – на национальные и транснациональные [17].

Среди возможных причин и мотивов слияний и поглощений могут быть выделены следующие [17]:

- 1) возможность достижения синергетического эффекта;
- 2) стремление повысить качество и эффективность управления;
- 3) диверсификация бизнеса;
- 4) asset-stripping – покупка компании для последующей распродажи ее по частям с целью извлечения прибыли;
- 5) налоговые мотивы – поглощаемая компания может обладать существенными налоговыми льготами;
- 6) личные мотивы управляющих;
- 7) стремление к завоеванию большей доли рынка;
- 8) повышение эффективности производства;
- 9) завладение новыми технологиями, которыми владеет компания-цель;
- 10) охота за талантливыми кадрами.

Достижение синергетического эффекта, согласно многим исследованиям (например, [17]) оказывается одной из первых целей большинства компаний, проводящих операции по слияниям и поглощениям. Например, в работе [8] рассматривается пример слияния американских компаний Pharmacia&Upjohn и Monsanto. Обе компании вели активную работу на рынке рецепторных медикаментов в различных терапевтических областях, и их продукция была взаимодополняема. Для каждой компании целью слияния было завладение технологиями другой компании. Самый успешный продукт Monsanto (Celebrex) использовал новую технологическую платформу коксовых специфических ингибиторов, и данное слияние открыло доступ к этой технологии для Pharmacia&Upjohn. Аналогично, Pharmacia&Upjohn имела серьезные наработки в биотехнологиях, основанных на биопротеинах, которыми Monsanto до

слияния не владела. Результатом слияния явилось наличие необходимого количества наработок для лабораторных клинических исследований, также улучшились результаты НИОКР для результирующей компании с одновременным уменьшением времени, потраченного на исследования.

### 3. Примеры поглощений в бизнесе

В 2008 году компания Sun Microsystems поглотила разработчика СУБД с открытым исходным кодом MySQL, сумма сделки составила 1 млрд долларов США [11]. Sun с помощью MySQL получила возможность упрочить взаимоотношения с существующими клиентами и создать новые направления сотрудничества в создании удобных в применении и гибких систем СУБД с открытым кодом. В данном примере обоюдная коммерческая и технологическая выгода данного поглощения, учитывая технологические инновационные преимущества обеих компаний, воплотила собой успешный синергетический эффект.

20 апреля 2009 г. Oracle покупает Sun по цене 9,5 американских долларов за акцию. Сделка оценивалась приблизительно в 7,4 млрд долларов США [13]. Теперь Oracle может предлагать своим клиентам программное обеспечение, которое пишется на поддерживаемом ею языке (Java), которое запускается на сервере приложений от Oracle. Для Sun данный союз оказался также выгодным. Oracle увеличила свои инвестиции в НИОКР с 8% до 13% из всей выручки компании (для сравнения, высокотехнологичные компании, такие как IBM и HP, тратят на НИОКР 6% и 3% соответственно [12]).

Компания Google за последние два года потратила 17 млрд долл. США на поглощения, это сумма, превышающая сумму аналогичных показателей ее конкурентов, – Apple, Microsoft, Amazon, Facebook, Yahoo, – вместе взятых [15]. Google не гонится за компаниями, брэндами и патентами, а выкупает компании за довольно высокую цену, потому что она заинтересована в разработчиках и талантливых сотрудниках приобретаемых компаний [14]. Инновационная экосистема Google построена таким образом, что разработчики компании, а также сторонние разработчики могут размещать на площадке Google свои приложения для тестирования тысячами пользователей совершенно бесплатно. Приложения, которые находят большой спрос, оказываются первыми в списке Google для коммерциализации. То, что Google не смогла создать и раз-

работать, она покупает. Недаром девизом Google является «ubiquity first, revenues later» – «сначала вездесущность, доходы потом».

#### 4. Примеры поглощений в природе

Необходимо рассмотреть природные экосистемы, чтобы наглядно увидеть аналогии экономических систем с биологическими системами на примере отношений «хищник-жертва», являющихся самым распространенным явлением в природе. Пищевые отношения в природе между особями не только обеспечивают энергетические потребности организмов, но играют и другую важную роль – удерживают виды в сообществах, регулируют их численность и влияют на ход эволюции. Пищевые связи чрезвычайно разнообразны.

В работе [16] рассматриваются аналогии между банковской системой и природной экосистемой, состоящей из трех уровней: растения, которыми питаются травоядные животные, которыми в свою очередь питаются плотоядные (хищники). Здесь этим трем уровням соответствуют три уровня банковской системы соответственно: частные лица и фирмы, дочерние банки и головной банк. Если в природной экосистеме энергией обмена служит биомасса, то в банковской системе ею является капитал. В работе [16] моделирование данной экосистемы предлагается с помощью трехуровневой системы дифференциальных уравнений Лотки-Вольтерры. Система уравнений Лотки-Вольтерры будет рассмотрена нами далее для моделирования процессов слияний и поглощения компаний. В табл. 1 приводятся аналогии между биологическим и экономическим миром для продолжения нашего исследования.

Для нас наибольший интерес представляют именно типичные хищники в их взаимоотношениях с жертвами и с экосистемой в целом.

Если хищник питается крупными, активными жертвами, которые могут убежать, сопротивляться, прятаться, то в живых остаются те из них, кто делает это лучше других, т.е. имеет более зоркие глаза, чуткие уши, развитую нервную систему, мускульную силу. Таким образом, хищник ведет отбор на совершенствование жертв, уничтожая больных и слабых. В свою очередь, среди хищников тоже идет отбор на силу, ловкость и выносливость. Эволюционное следствие этих отношений – прогрессивное развитие обоих взаимодействующих видов – и хищника, и жертвы [3].

Таблица 1.

#### Аналогии между биологическими и экономическими системами

Биологические системы	Экономические системы
Типичные хищники, которые тратят много сил на то, чтобы выследить добычу, догнать ее и поймать. У них развито специальное охотничье поведение. Им необходимо много жертв в течение жизни. Обычно это сильные и активные животные [3].	Крупные корпорации, жертвами которых становятся более слабые компаниями, которые могут подпитывать более крупную и богатую компанию новыми инновационными идеями, талантливой командой и т.п.
Паразиты, которые всю жизнь проводят в одном или двух, реже – трех хозяевах. Они живут в условиях избытка пищи, которую не надо активно добывать, и используют хозяев как среду своего обитания. У них упрощено строение и ослаблены связи с внешним миром [3].	Компании, работающие на госзаказах или являющиеся постоянными подрядчиками более крупной компании. В РФ таким примером являются бюро переводов, которые прикрепляются к одному нотариусу и работают долгое время с ними в области нотариального заверения письменных переводов.
Животные-собиратели, которые тратят энергию на поиск семян или насекомых, т.е. мелкой добычи. Овладение найденным кормом для них не представляет труда. У них развита поисковая активность, но нет охотничьего поведения [3].	Наиболее типичным примером являются более независимые компании, ориентированные на массового потребителя (например, компании розничной торговли).

В экономических системах такого рода эволюция происходит по схожим принципам. Новая технология, появившись на рынке, попадает во враждебную среду и ведет борьбу за выживание. Это связано с тем, что на рынке зачастую присутствуют более старые и сильные технологии, поэтому новые технологии либо поглощаются старыми, либо умирают, не развившись в полной мере. Однако если новая технология оказывается более конкурентной, то она вытесняет старую. Таким образом, в экономическом мире проявляется закон естественного отбора.

Если же хищники питаются малоактивными, либо мелкими, не способными сопротивляться им видами, это приводит к другому эволюционному результату. Погибают те особи, которых хищник успевает заметить. Выигрывают менее заметные или чем-то неудобные для захвата жертвы. Так осуществляется естественный отбор на покровительственную окраску, твердые раковины, защитные шипы и иглы и другие орудия спасения от врагов. Эволюция видов идет в сторону специализации по этим признакам [3].

В экономическом мире такого рода защитные функции могут создаваться искусственно контролирующими органами государства, на чьей территории действуют эти компании. К ним, в частности, относятся:

- ◆ правовая защита малых инновационных предприятий (МИП);
- ◆ механизмы патентирования новых идей, способные в полной мере защитить реализацию нововведений на рынке;
- ◆ государственные гранты и инвестиции в МИПы;
- ◆ собственные методы защиты МИПов;
- ◆ правильно организованная инновационная экосистема;
- ◆ система демонстрации и развития развивающихся технологий;

Для развития нашей аналогии природных экосистем с экономическими системами рассмотрим концепцию инновационной экосистемы.

### 5. Что такое инновационная экосистема?

Биологическая экосистема – это сложный набор отношений между существующими в ней ресурсами, средой и живущими в ней сущностями, чьей целью является поддержание равновесного состояния. В биологической системе равновесное состояние образуется через правильное моделирование динамики движения энергии в операциях внутри экосистемы. В данном случае энергия является способом выражения отношений между парой хищник-жертва и растительным миром. Движение энергии – сложная функция, поэтому экосистема может быть рассмотрена только как единое целое, а не фрагментарное, т.к. каждый элемент системы имеет функциональное влияние на другие элементы [4].

В то же время в инновационной экосистеме происходит не движение энергии, а движение капитала и других экономических ресурсов в сложных взаимоотношениях между хозяйствующими субъектами. Экономическими ресурсами здесь выступают как материальные ресурсы (денежные фонды, снаряжение, движимые и недвижимые объекты и т.д.), так и человеческий капитал (студенты, навыки, кадры, исследователи и т.д., которые составляют институциональные единицы, участвующие в экосистеме) (рис. 1).

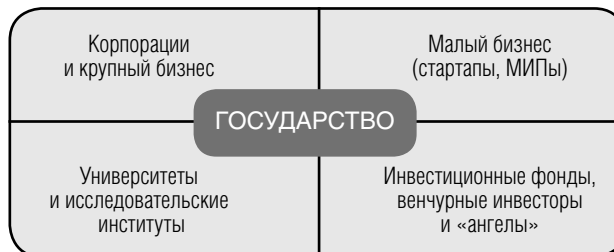


Рис. 1. Субъекты инновационной экосистемы

Инновационная экосистема представляет собой две различные экономики, первая из которых – **исследовательская экономика**, движимая средствами фундаментальной науки, а вторая – **коммерческая экономика**, движимая рыночными отношениями. Изначально эти два сектора слабо взаимосвязаны, потому что связь в данных отношениях осуществляется через инвестиции в НИОКР и фундаментальные научные исследования. Те, в свою очередь, образуются из налоговых поступлений в коммерческом секторе. Для инновационной экосистемы важно, чтобы исследования проходили не только по заказу государства, но также происходил естественный самопроизвольный прогресс в научно-техническом плане. То есть инвестиционные инициативы должны исходить из естественных источников инвестиций в коммерческом секторе экономики.

Инновационная экосистема считается здоровой в том случае, если ресурсы, инвестированные в исследования из государственных, частных или корпоративных источников, впоследствии вознаграждаются увеличением прибыли, благодаря реализации инновационных продуктов. В случае, когда оба сектора экономики – исследовательская и коммерческая – достигают равновесного состояния, инновационная экосистема считается здоровой [4]. Это можно выразить следующей формулой:

$$P = P_0(I_{\text{НИОКР}}) + \Delta P = P_0(1 - \alpha) + \Delta P, \quad (1)$$

где  $P_0$  – начальная прибыль до инвестиций в фундаментальные исследования;

$P$  – прибыль, скорректированная на инвестиции;

$P_0(I_{\text{НИОКР}}) = P_0(1 - \alpha)$ , где  $I_{\text{НИОКР}}$  определяет инвестиции коммерческого сектора в исследовательский;

$\Delta P$  – рост экономики за счет инновационной составляющей.

Таким образом, небольшая часть прибыли  $I_{\text{НИОКР}}$  реинвестируется для поддержания фундаментальных исследований. Результат в виде цикла с обратной связью показан на рис. 2.

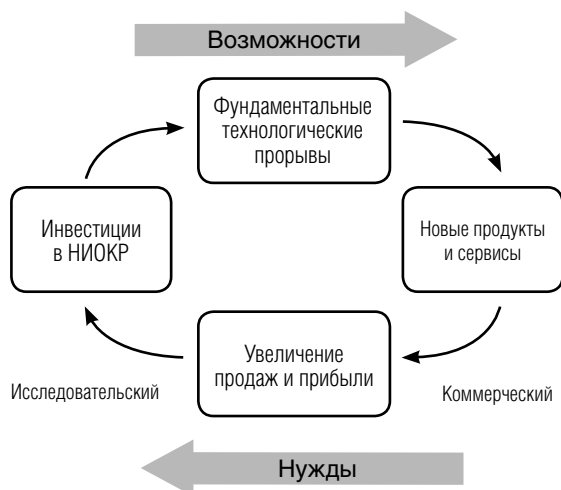


Рис. 2. Цикл возврата инвестиций в НИОКР через инновационные технологические прорывы

Когда рост прибыли за счет инновационных прорывов превышает начальные инвестиции в НИОКР, вместо равновесия в экосистеме происходит рост.

Для более подробного количественного объяснения данных процессов, мы обращаемся к модели экосистемы «хищник-жертва», основанной на системе дифференциальных уравнений Лотки-Вольтерры.

### 6. Модель Лотки-Вольтерры

Данная модель отражает схему взаимодействия двух видов типа «хищник-жертва», названную в честь ее авторов, которые предложили модельные уравнения независимо друг от друга.

В математической форме предложенная система имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= (\alpha - \beta y)x, \\ \frac{dy}{dt} &= (-\gamma + \delta x)y, \end{aligned} \tag{2}$$

где  $x$  – количество жертв;  $y$  – количество хищников;  $t$  – время;  $\alpha, \beta, \gamma, \delta$  – коэффициенты, отражающие взаимодействия между видами.

Решение системы уравнений предлагается инструментальным методом при помощи авторской программы имитации (рис. 3) где система находится в равновесном состоянии (параметры модели для равновесного состояния приведены в табл. 4).

Можно заметить, что динамика развития популяции хищников и жертв имеет колебательный характер в силу присутствия циклов с обратной связью, которые заставляют популяции колебаться вокруг набора заданных условий.

Система уравнений Лотки-Вольтерры находит применение не только в природе, но очень часто используется в экономических системах. Например, модель динамики развития популяции отношения городского населения к стране и отношения среднего дохода городского населения к средне-страновому рассмотрена в работе [17]. Модель выглядит следующим образом:

$$\dot{x}_i = x_i(-\alpha_i - \alpha_i + \alpha y_i), \dot{y}_i = y_i(\beta_i - \beta_i x_i),$$

где  $i$  – зона рассмотрения;  $x$  – население;  $y$  – средний доход;  $\alpha$  и  $\beta$  – динамические параметры.

Другим примером является работа [18], в которой исследуется конкуренция на фондовой бирже, где существуют два вида конкуренции: между компаниями, торгующимися на бирже через их цену, а также между инвесторами, охотящимися за компаниями. Автор в исследовании для моделирования этих процессов также берет за основу систему уравнений Лотки-Вольтерры.

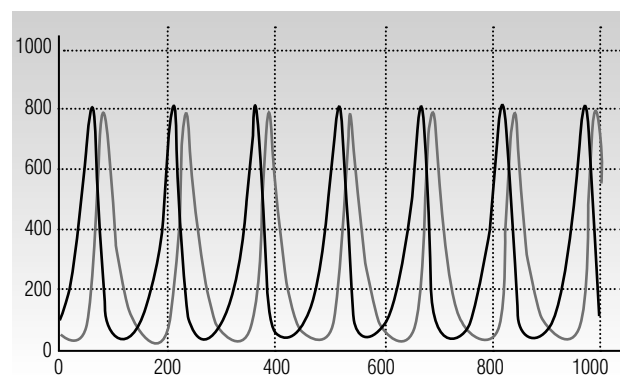


Рис. 3. Результат запуска модели хищник-жертва

### 7. Модель хищник-жертва в инновационной экосистеме

Базируясь на модели Лотки-Вольтерры, далее мы описываем процессы слияния и поглощения компаний, происходящие в рамках экономических экосистем, по аналогии с системой «хищник-жертва», где хищники – крупный бизнес, а жертвы – малый бизнес (стартапы, МИПы).

Модель Лотки-Вольтерры (2) была дополнена следующим образом:

1) теперь учитывается внутривидовая конкуренция (борьба за ресурсы между самими корпорациями и МИПами –  $\alpha x^2$  и  $\alpha y^2$  где происходит попарное взаимодействие) с соответствующим коэффициентом внутривидовой конкуренции:

$$\frac{\alpha x^2}{k_x} \text{ и } \frac{\delta y^2}{k_y};$$

2) государство может облагать налогом корпорации  $(1 - \tau)$  для пополнения бюджета страны;

3) добавляется переменная  $T$ , которая вычисляется через дополнительное дифференциальное уравнение;

4) бюджет  $(T)$  накапливается, благодаря налогам, собранным с корпораций  $(y \times \tau)$ ;

5) модель учитывает возможную государственную коррупцию или денежную инфляцию в виде утечки части денег из накопленного за счет налогов бюджета  $(1 - D - L)$ ;

6) часть бюджетных денег тратится на дотации МИПам

$$\left( \frac{\alpha x^2}{k_x + T \times D} \right),$$

а из бюджета убывают  $T(1 - D) + x \times \tau$ .

Математически данная модель выражена следующим образом:

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= (\alpha - \beta y)x - \frac{\alpha x^2}{k_x + T \times D} \\ \frac{dy}{dt} &= (1 - \tau) \left( (-\gamma + \delta x)y - \frac{\delta y^2}{k_y} \right) \\ \frac{dT}{dt} &= T(1 - D - L) + y \times \tau \end{aligned} \quad (3)$$

где  $k_x$  – коэффициент внутривидовой конкуренции МИПов;

$k_y$  – аналогический коэффициент для корпораций;

$x$  – количество МИПов;

$y$  – количество корпораций;

$t$  – время;

$\alpha$  – коэффициент рождаемости МИПов;

$\beta$  – коэффициент поглощения МИПов корпорациями;

$\gamma$  – коэффициент смертности корпораций;

$\delta$  – коэффициент рождаемости корпораций;

$\tau$  – доля налогообложения корпораций;

$T$  – собранные налоги за все периоды (рост экономики);

$D$  – доля налогов, уходящих на помощь МИПам (дотации);

$L$  – часть налогов, которая теряется из казны (коррупция и инфляция).

С целью изучения параметров модели были проанализированы официальные статистические данные ОЭСР по рождаемости и смертности компаний, выявлению корреляций между динамикой банкротств и созданием новых компаний по Великобритании. В табл. 2 представлены коэффициенты рождаемости и смертности по странам ОЭСР за 2010 г.

Таблица 2.

Коэффициенты рождаемости и смертности компаний по странам за 2010 г.\*

Страны	Коэффициент рождаемости	Коэффициент смертности
Финляндия	0,025	8
Румыния	0,06	13,5
Нидерланды	0,065	4
Болгария	0,07	4
Испания	0,085	12
Словения	0,09	9
Италия	0,09	9,5
Португалия	0,1	
Франция	0,013	14,5
Дания	0,14	13
Венгрия	14	13,7
Словакия	18	
США	10	11,5
Австралия	11	14
Великобритания	11,5	11,5
Корея	14	13
<b>Среднее значение</b>	<b>10,25</b>	<b>10,8</b>

\*Источник: статистический сборник ОЭСР

Как можно увидеть из табл. 2, среднее значение коэффициента рождения и смертности примерно одинаково (10,25 и 10,8 соответственно), что говорит о сохранении баланса в экономической системе: новые компании образуются примерно с той же скоростью, с которой другие ликвидируются.

Для определения корреляции данные временные ряды проанализированы в пакете SPSS Statistics методом корреляции Пирсона.



Рис. 4. Динамика банкротств и рождаемости новых компаний в Великобритании  
\*Источник: статистический сборник ОЭСР

Таблица 3.

**Корреляция Пирсона для рядов рождаемости и банкротства компаний**

Корреляции			
		Банкротство	Зарождение
Банкротство	Корреляция Пирсона	1	-,255
	Знч.(1-сторон)		,095
	N	28	28
Зарождение	Корреляция Пирсона	-,255	1
	Знч.(1-сторон)	,095	
	N	28	28

С вероятностью 90% можно заключить, что между динамикой банкротств предприятий и динамикой их рождаемости существует отрицательная взаимосвязь. На этом примере можно предположить, что динамика рождения и смертности компаний будет обратозависимой, а также иметь колебательный характер, что аналогично динамике эволюции популяций в системе «хищник-жертва» в ее равновесном состоянии.

Необходимо отметить, что постоянный корпоративный налог на доходы компаний в Великобритании равен 26%, что примерно соответствует ставке налога и других развитых странах, варьирующейся от 20 до 30%.

Математическая модель (3) была реализована в авторской компьютерной программе с возможностью изменения параметров и вывода результатов в виде графиков динамики популяций. Основываясь на статистических данных, описанных выше, были подобраны значения параметров модели, близкие к реальным. В табл. 4 представлены параметры для различных состояний: равновесие, постепенный спад, полное вымирание и экспоненциальный рост.

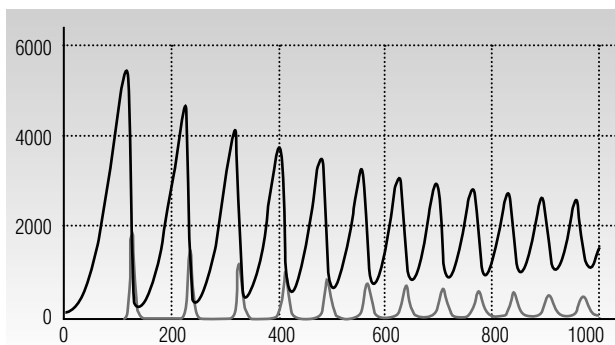


Рис. 5. Постепенный спад обеих популяций

При определенных параметрах уравнения, заданных в программе, происходит постепенный спад обеих популяций (рис. 5) или полное их вымирание на определенном этапе (рис. 6). Значения коэффициентов для различных типов состояний системы приведены в табл. 4. На рис. 5 представлен тип развития системы «постепенный спад», происходящий из-за недостаточного финансирования стартапов дотациями (дотационная ставка ( $D$ ) = 0,001).

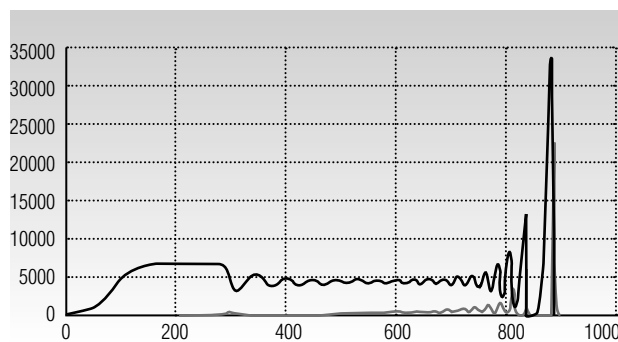


Рис. 6. Полное вымирание обеих популяций

Тип развития системы «полное вымирание», представленный на рис. 6, происходит из-за чрезмерно высокой ставки корпоративного налога ( $\tau = 0,45$ ), что значительно выше средней налоговой ставки в развитых странах.

Таблица 4.

**Коэффициенты параметров модели для различных типов состояний**

Тип развития системы	$x_{нач}$	$y_{нач}$	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	$\delta$	$k_x$	$k_y$	$\tau$	$D$	$L$
Равновесное состояние (рис. 4)	50	100	0,05	0,0002	0,05	1	6800	450000	0	0	0
Постепенный спад (рис. 5)	50	100	0,05	0,0002	0,05	1	6800	450000	0,229	0,001	0,3
Полное вымирание (рис. 6)	50	100	0,05	0,0002	0,05	1	6800	450000	0,45	0,02	0,03
Экспоненциальный рост (рис. 7)	50	100	0,09	0,00002	0,055	0,8	68000	45000	0,016	0,039	0,001

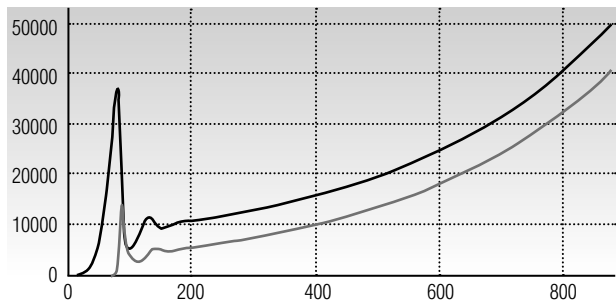


Рис. 7. Рост обеих популяций

Однако, в результате подбора показателей нам удалось добиться экспоненциального роста обеих популяций, как показано на рис. 7.

Монотонный экспоненциальный рост достигается за счет выбора определенного значения параметра, определяющего уровень налогов, собираемых с корпораций ( $\tau = 0,016$ ), которые впоследствии будут отчислены в пользу стартапов (данный показатель ниже реального значения), а также соответствующего параметра, определяющего уровень субвенций стартапам на каждом шаге ( $D = 0,039$ ). Также необходимо отметить, что значение параметра рождаемости стартапов было приведено к близкому к реальному значению ( $0,09$ ), значение параметра «поглощения» стартапов корпорациями ( $\beta$  было уменьшено до значения  $0,00002$ , уровни конкуренции стартапов и корпораций были приближены к общему значению ( $68000$  и  $45000$  соот-

ветственно). Исследование в области устойчивости процесса в координатах, соответствующих этим параметрам, предполагается выполнить и описать в последующих публикациях.

## 8. Заключение

Как видно из результатов исследования, данная модель при определенных параметрах на некотором этапе приходит в монотонный экспоненциальный рост обеих популяций. Данный результат был невозможен в рамках изначальной системы уравнений Лотки-Вольтерры. В данном случае, как мы видим из рис. 7, сама экосистема растет настолько, чтобы вмещать в себя экспоненциально растущие популяции корпораций и МИПов.

Данная модель может быть применена для моделирования реальных инновационных экосистем, которые на сегодняшний день существуют во всех передовых странах. Следующим этапом изучения является более детальное исследование процессов налогообложения крупного бизнеса на примере развитых стран в пользу субвенций МИПам, стартапам и бизнес-инкубаторам. Как показало исследование, при определенных параметрах, заданных как по отношению к налогам с крупного бизнеса, так и к дотациям малому бизнесу, инновационная экосистема может дать рост обоим участникам системы, так и экосистемы в целом. ■

## Литература

1. Стратегия инновационного развития Российской Федерации на период до 2020 года (Распоряжение Правительства РФ от 8 декабря 2011 г. №2227-р «Об утверждении Стратегии инновационного развития Российской Федерации на период до 2020 года»).
2. Кузнецова И.А., Гостева С.Ю., Грачева Г.А. Методология и практика статистического измерения инновационной деятельности в экономике России: современные тенденции // Вопросы статистики. 2008. №5. С. 30–46.
3. Экология. Учебник для 10 (11) классов / Под ред. Н.М.Черновой. 11-е изд., испр. М.: Дрофа, 2007. 304 с.
4. Jackson D.J. What is an innovation ecosystem? // National Science Foundation, Arlington, VA. [Электронный ресурс]: [http://erc-assoc.org/sites/default/files/topics/policy\\_studies/DJackson\\_Innovation%20Ecosystem\\_03-15-11.pdf](http://erc-assoc.org/sites/default/files/topics/policy_studies/DJackson_Innovation%20Ecosystem_03-15-11.pdf) (дата обращения: 20.05.2014).
5. Carson R. Improve venture capital returns with IP portfolio management. Ezine Articles. [Электронный ресурс]: <http://ezinearticles.com/?Improve-Venture-Capital>Returns-With-IP-Portfolio-Management&id=1420039> (дата обращения: 25.05.2014).
6. Романов В.П., Лелчук А.В. Мультиагентные системы в экономике. М.: РЭУ им. Г.В.Плеханова», 2013. 87 с.
7. Ahmadian A. System dynamics and technological innovation system // Chalmers University of Technology. Department of Energy and Environment, Division of Environmental Systems Analysis. Göteborg, Sweden, 2008. Report No. 2008:15 [Электронный ресурс]: <http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/74728.pdf> (дата обращения: 21.05.2014);
8. Bena J., Li K. Corporate innovations and mergers and acquisitions // Sauder School of Business, University of British Columbia [Электронный ресурс]: [http://finance.sauder.ubc.ca/~kaili/bl\\_JF.pdf](http://finance.sauder.ubc.ca/~kaili/bl_JF.pdf) (дата обращения: 22.05.2014).

9. Сырой С. Sun и MySQL: Военная хитрость или брак по любви? [Электронный ресурс]: <http://www.x-drivers.ru/articles/analytics/26/1.html> (дата обращения: 01.06.2014).
10. Furrier J., Vellante D. Analysis: Is Oracle better off after Sun acquisition? [Электронный ресурс]: <http://www.forbes.com/sites/siliconangle/2013/07/09/analysis-is-oracle-better-off-after-sun-acquisition/> (дата обращения: 05.05.2014).
11. Зыкин В. Чем хороша Sun для Oracle? // [Электронный ресурс]: <http://www.x-drivers.ru/articles/analytics/56/2.html> (дата обращения: 15.05.2014).
12. Stunt V. Why Google is buying a seemingly crazy collection of companies // CBC News, Feb. 2014 [Электронный ресурс]: <http://www.cbc.ca/news/technology/why-google-is-buying-a-seemingly-crazy-collection-of-companies-1.2537110> (дата обращения: 16.05.2014).
13. Levy A., Womack B. Google outspends top five rivals combined in deals push // Bloomberg, Jan 15, 2014. [Электронный ресурс]: <http://www.bloomberg.com/news/2014-01-15/google-outspends-top-five-rivals-combined-in-deals-push.html> (дата обращения: 24.05.2014).
14. Bloomberg 2013 Annual. Global financial advisory mergers & acquisitions rankings 2013. [Электронный ресурс]: <http://www.bloomberg.com/professional/content/uploads/sites/2/2014/01/M-and-A-2013.pdf> (дата обращения: 03.06.2014).
15. Бегаева А.А. Корпоративные слияния и поглощения: проблемы и перспективы правового регулирования / Отв. ред. Н.И. Михайлов. М.: Инфотропик Медиа, 2010. 132 с.
16. Comes C.-A. Banking system: Three level Lotka-Volterra model // Procedia Economics and Finance. 2012, no. 3. P. 251–255.
17. Kamann D.J., Nijkamp P. Technogenesis: incubation and diffusion / Serie Research Memoranda. Amsterdam: University Amsterdam, 1988.
18. Modis T. Technological forecasting at the stock market // Technological Forecasting and Social Change. 1999, no. 62. P. 173–202.

---

## INNOVATION ECOSYSTEM MODELLING BASED ON «PREDATOR-PREY» MODEL

### **Victor ROMANOV**

*Professor, Department of Information Systems in Economics and Management,  
Faculty of Mathematical Economics and Informatics, Plekhanov Russian University of Economics  
Address: 36, Stremyanny lane, Moscow, 117997, Russian Federation  
E-mail: victorromanov1@gmail.com*

### **Bulat AKHMADEEV**

*Post-graduate student, Department of Information Systems in Economics and Management,  
Faculty of Mathematical Economics and Informatics, Plekhanov Russian University of Economics  
Address: 36, Stremyanny lane, Moscow, 117997, Russian Federation  
E-mail: bulat.a@mail.ru*

*This paper provides insights into a concept and essence of corporate merger & acquisition processes, as well as an analytical review of these processes in research and professional literature. Drivers and purposes of parties to these transactions, as well as their types have been identified. The most significant corporate mergers and acquisitions in the IT sector over the last decade have been considered. A synergetic effect in their operations resulting from these processes has been shown; such effect appears when an acquisition is aimed to get access to new technologies or head-hunting. Corporate merger & acquisition implications have been demonstrated from the perspective of natural ecosystem*



development, analogies with biological relationships – «predator-prey» mergers have been drawn. Objects in economic and biological systems are found out to behave alike. It has been demonstrated that a biological ecosystem may be innovative to a certain extent, when it is being formed by means of establishing effective financial, informational and other kinds of feedback links between economic entities. The concept of innovative ecosystem has been analyzed, and its major growth drivers have been investigated. Author's own model of innovative ecosystem dynamic development based on the Lotka–Volterra model (the «predator-prey» model) has been suggested, where predators refer to corporations and preys – to small-scale innovative enterprises (SIE). This model has been implemented in author's software program, and under certain system parameters it shows monotonic exponential growth of populations. Conclusions have been made that innovative ecosystem growth can be achieved thanks to proper regulation of corporate taxation parameters and SIE subsidies, as well as regulation of intraspecific competition and corporation/SIE acquisition ratio.

**Key words:** merger and acquisition, innovation ecosystem, «predator-prey» model, Lotka-Volterra model, system dynamics.

**Citation:** Romanov V.P., Akhmadeev B.A. (2015) Modelirovanie innovacionnoj jekosistemy na osnove modeli «hishhnik-zhertva» [Innovation ecosystem modelling based on «predator-prey» model]. *Business Informatics*, no. 1 (31), pp. 7–17 (in Russian).

#### References

1. *Strategija innovacionnogo razvitija Rossijskoj Federacii na period do 2020 goda* [Strategy of innovation development of the Russian Federation for the period until 2020] (Statement of RF Government, 8 December 2011, No. №2227-р «About the Strategy of the Russian Federation innovation development for the period until 2020»). (in Russian)
2. Kuznetsova I.A., Gosteva S.Yu., Gracheva G.A. (2008) Metodologija i praktika statisticheskogo izmerenija innovacionnoj dejatel'nosti v jekonomike Rossii: sovremennye tendencii [Methodology and practice of statistical measurement of innovation activity in Russian economy: modern tendencies]. Moscow: *Voprosy statistiki*, no. 5, pp. 30–46. (in Russian)
3. Chernova N.M., ed. (2007) *Jekologija. Uchebnik dlja 10 (11) klassov* [Ecology. Textbook for 10 (11) years]. Moscow: Drofa. (in Russian)
4. Jackson D.J. (2014) *What is an innovation ecosystem?* National Science Foundation, Arlington, VA. Available at: [http://erc-assoc.org/sites/default/files/topics/policy\\_studies/DJackson\\_Innovation%20Ecosystem\\_03-15-11.pdf](http://erc-assoc.org/sites/default/files/topics/policy_studies/DJackson_Innovation%20Ecosystem_03-15-11.pdf) (accessed 20 May 2014).
5. Carson R. (2014) *Improve venture capital returns with IP portfolio management*. Ezine Articles. Available at: <http://ezinearticles.com/?Improve-Venture-Capital-Returns-With-IP-Portfolio-Management&id=1420039> (accessed 25 May 2014).
6. Romanov V.P., Leščuk A.V. (2013) *Mul'tiagentnye sistemy v jekonomike* [Multi-agent systems in economics]. Moscow: Plekhanov Russian University of Economics. (in Russian)
7. Ahmadian A. (2008) *System dynamics and technological innovation system*. Göteborg: Chalmers University of Technology. Department of Energy and Environment, Division of Environmental Systems Analysis. Report No. 2008:15. Available at: <http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/74728.pdf> (accessed 21 May 2014).
8. Bena J., Li K. (2014) *Corporate innovations and mergers and acquisitions*. Sauder School of Business, University of British Columbia. Available at: [http://finance.sauder.ubc.ca/~kaili/bl\\_JF.pdf](http://finance.sauder.ubc.ca/~kaili/bl_JF.pdf) (accessed 22 May 2014).
9. Syroj S. (2014) Sun i MySQL: Voennaja hitrost' ili brak po ljubvi? [Sun and MySQL: military art or union of hearts?]. Available at: <http://www.x-drivers.ru/articles/analytics/26/1.html> (accessed 01 June 2014). (in Russian)
10. Furrier J., Vellante D. (2014) Analysis: Is Oracle better off after Sun acquisition? Available at: <http://www.forbes.com/sites/siliconangle/2013/07/09/analysis-is-oracle-better-off-after-sun-acquisition/> (accessed 05 May 2014).
11. Zykin V. (2014) Chem horosha Sun dlja Oracle? [What is good in Sun for Oracle?]. Available at: <http://www.x-drivers.ru/articles/analytics/56/2.html> (accessed 15 May 2014). (in Russian)
12. Stunt V. (2014) Why Google is buying a seemingly crazy collection of companies. *CBC News*, Feb. 2014 (electronic journal). Available at: <http://www.cbc.ca/news/technology/why-google-is-buying-a-seemingly-crazy-collection-of-companies-1.2537110> (accessed 16 May 2014).
13. Levy A., Womack B. (2014) *Google outspends top five rivals combined in deals push*. Bloomberg. Jan 15, 2014. Available at: <http://www.bloomberg.com/news/2014-01-15/google-outspends-top-five-rivals-combined-in-deals-push.html> (accessed 24 May 2014).
14. Bloomberg Annual (2013). *Global financial advisory mergers & acquisitions rankings 2013*. Available at: <http://www.bloomberg.com/professional/content/uploads/sites/2/2014/01/M-and-A-2013.pdf> (accessed 03 June 2014).
15. Begaeva A.A. (2010) *Korporativnye slijanija i pogloshhenija: problemy i perspektivy pravovogo regulirovanija* [Corporate mergers and acquisitions: problems and prospects of legal regulation]. Edited by N.I. Mihajlov. Moscow: Infotropik Media. (in Russian)
16. Comes C.-A. (2012). Banking system: Three level Lotka-Volterra model. *Procedia Economics and Finance*, no. 3, pp. 251–255.
17. Kamann D.J., Nijkamp P. (1988). *Technogenesis: incubation and diffusion*. Serie Research Memoranda. Amsterdam: University Amsterdam.
18. Modis T. (1999). Technological forecasting at the stock market. *Technological Forecasting and Social Change*, no. 62, pp. 173–202.

# ПОДХОД К ПОСТРОЕНИЮ МОДЕЛИ ИННОВАЦИОННОГО ПРОЦЕССА НА ПЛАТФОРМЕ СУБЪЕКТНО-ОРИЕНТИРОВАННОЙ МЕТОДОЛОГИИ

## **А.И. ГРОМОВ**

кандидат химических наук, профессор кафедры моделирования  
и оптимизации бизнес-процессов, факультет бизнес-информатики,  
Национальный исследовательский университет  
«Высшая школа экономики»

Адрес: 101000, г. Москва, ул. Мясницкая, д. 20  
E-mail: agromov@hse.ru

## **Ю.А. БИЛИНКИС**

преподаватель кафедры моделирования и оптимизации бизнес-процессов,  
факультет бизнес-информатики, Национальный исследовательский  
университет «Высшая школа экономики»

Адрес: 101000, г. Москва, ул. Мясницкая, д. 20  
E-mail: ystavenko@hse.ru

## **А. ФЛЯЙШМАН**

Owner, Interaktiv Unternehmensberatung

Адрес: 16, Burgfriedenstraße, Pfaffenhofen, 85276, Germany  
E-mail: albert.fleischmann@interaktiv.expert

## **Т.В. НОВИКОВА**

преподаватель кафедры моделирования и оптимизации бизнес-процессов,  
факультет бизнес-информатики, Национальный исследовательский  
университет «Высшая школа экономики»

Адрес: 101000, г. Москва, ул. Мясницкая, д. 20  
E-mail: tvnovikova@hse.ru

## **Е.И. ХУДОБИН**

Генеральный директор, компания «Центр эффективных организаций»

Адрес: 115280, Москва, ул. Ленинская Слобода, д. 19, стр. 6  
E-mail: eugenex@yandex.ru

## **Д.В. ТОРШИН**

директор по инвестициям, группа компаний «АйТи»

Адрес: 115280, Москва, ул. Ленинская Слобода, д. 19, стр. 6  
E-mail: dtorshin@it.ru

В работе рассматривается возможность структурирования инновационной деятельности, влекущая за собой формирование инновационного процесса и способов управления в изменяющихся внешних и внутренних условиях. Анализируются работы, посвященные задаче возникновения инноваций в процессах управления знаниями и моделям инновационного процесса, основанных на знании и обучении. В действительности организации сталкиваются с проблемами, спровоцированными устаревшими концепциями коллективной деятельности, обусловленной геополитическими и экономическими проблемами, что побуждает их искать способы объединения в сообщества экспертов не только собственных сотрудников, но и клиентов, партнеров и других лиц, способных к коллективной творческой деятельности. В связи с этим предложен новый подход для определения инновационного процесса как «ad-hoc процесса», реализуемого в методологии субъектно-ориентированного управления деятельностью (S-BPM). Новый подход предложен на основе выделения особенностей инновационного процесса, в связи с которыми определена методология моделирования и определены требования к автоматизации инновационного процесса с учетом метода имитационного моделирования и особенностей реализации в РФ.

Работа основана на обследовании российских компаний за последние 20 лет, в которых были выявлены процессные недостатки, стандартные практически для всех компаний. На основе данного исследования сформулированы особенности инновационного процесса, характерные для российских компаний.

В результате выработан альтернативный подход к анализу и управлению бизнес-процессами, основанный не на дискретных характеристиках, а на анализе реального контента (т.е. сущностного содержания в реальном времени) околупроцессного окружения.

**Ключевые слова:** инновация, инновационный процесс, эксперт, субъектно-ориентированное управление процессами.

**Цитирование:** Громов А.И., Билинкис Ю.А., Фляйшман А., Новикова Т.В., Худобин Е.И., Торшин Д.В. Подход к построению модели инновационного процесса на платформе субъектно-ориентированной методологии // Бизнес-информатика. 2015. № 1 (31). С. 18–30.

## 1. Возникновение инноваций в процессах (краткий обзор)

Во второй половине 1980-х усиление конкуренции и сокращение жизненного цикла товаров привели к необходимости более тесной взаимосвязи НИОКР с другими стадиями инновационного процесса. В своей работе С.Клайн и Н.Розенберг [1] обратили внимание на то, что создание инноваций по своей природе является сложным, неясным, неструктурированным процессом, и поэтому гладкие, четко структурированные линейные модели искажают их смысл. Они создали цепную модель, основанную на обратных связях между подразделениями и внешними организациями, и впервые обратили внимание на *управление знаниями*. Однако, они не были в этом пионерами: еще в конце 1960-х годов в Советском Союзе сформировалась методология научной организации труда (НОТ), которая стала основой для дальнейших работ в области управления инновациями.

Акцент на управлении знаниями только усилился после появления модели *интегрированных бизнес-процессов*, которая завершила переход от рассмотрения инноваций как последовательного процесса к параллельному процессу, распределенному в

межфункциональных командах. Японская модель дала толчок к интеграции различных подразделений предприятия вокруг *инновационного процесса* и последующему изучению социальных взаимодействий в организации со всеми источниками знаний: потребителями, поставщиками и заинтересованными сторонами. Это позволило снизить неопределенность и риски, а значит повысить качество инновационного процесса.

Требование взаимодействия со всеми источниками знаний в рамках инновационного процесса является не таким простым, как кажется на первый взгляд, поскольку зачастую эти источники неизвестны. Неявные, скрытые знания, неразрывно связанные с индивидуальным опытом, стали основой для нового поколения моделей инновационного процесса — *моделей, основанных на знаниях и обучении* [2]. Чем быстрее предприятие способно получать неявные знания и обучаться, тем более инновационным оно является, тем быстрее оно способно реагировать на рыночные изменения, представляя свои инновационные продукты и услуги. Обладая такой возможностью, предприятие сокращает свои издержки на начальных стадиях инновационного процесса и доводит до стадии разработки только наиболее удачные новации.

На знаниях, которые пронизывают как внутрикорпоративные, так и межфирменные процессы, основана *интеграционная и сетевая модель*, где инновация рассматривается как *распределенный сетевой процесс*. Эта интерпретация делает больший упор на вертикальных отношениях (например, стратегические альянсы с поставщиками и клиентами) и сотрудничество с конкурентами, поддерживая модель открытых инноваций [3]. Кроме того, технология изменений меняется сама с помощью информатизации инноваций [4].

Компании часто принимают тот или иной вариант инновационной модели и затем адаптируют ее для своих нужд. Например, С.Уйлрайт и К.Кларк [5] предложили модель для управления портфелем проектов, отбрасывая неприемлемые идеи, иначе проводя оценку на ранних стадиях жизненного цикла инновации. Эта модель носит название «*Воронка*». Основное внимание в модели уделяется процессу поиска и отбора идей, но при этом предполагается, что эти идеи генерируются и поступают в виде потока. Основная идея в этой модели – расширение воронки для увеличения количества идей создания новых продуктов и процессов, с привлечением к генерированию инноваций большего числа сотрудников, а также сужение горлышка воронки для выбора наиболее привлекательных идей.

Эволюцией модели «Воронка» можно считать *модель отбора Купера* или «*Ворота*», в которой основное внимание сосредотачивается на отборе идей [6].

Большинство из описанных моделей предполагают, что в компаниях настолько развито рациональное мышление, что они последовательно применяют инновационный процесс со всеми стадиями от НИОКР до производства инноваций. С.Махди [7] приводит доказательства так называемой «ограниченной рациональности фирмы», которая означает, что рациональное поведение возможно только в случае, если имеются достаточные знания. Если знаний и опыта недостаточно, то зачастую компаниям приходится прибегать к «нерациональным» методам проб и ошибок. Таким образом, предписывающие бизнес-модели не могут эффективно применяться к таким компаниям. Вместо этого, большинству компаний необходимо вести себя «ограниченно рациональным образом», в соответствии с их собственным конкретным опытом.

Все пять поколений моделей инновационного процесса рассматривают его как изолированный отдельный процесс. Тем не менее, инновации зачастую внедряются в бизнес-процессы организации

в соответствии со стратегией развития компании и корпоративной культурой, что приводит к выводу, что инновационный процесс должен являться мета-процессом, включенным во все бизнес-процессы организации. Например, в отличие от моделей, предлагаемых инновационным менеджментом, в моделях менеджмента знаний зачастую вообще отсутствует этап производства инноваций. Инновационная деятельность понимается не как последовательность единичных актов внедрения какого-либо новшества, а как система, непрерывно производящая знания и порождающая инновации. Поскольку носителем и создателем знаний является человек, развитие менеджмента знаний привело к увеличению ценности человеческого потенциала и выделению в отдельное направление теории интеллектуального потенциала.

Несмотря на большое количество разработанных моделей, их эффективность остается под вопросом, из-за небольшого количества эмпирических данных, а также разнообразия и непредсказуемости инновационных процессов. Например, в недавнем обзоре эмпирической литературы С.Махди показывает, что большинство из пяти поколений моделей инновационного процесса являются *детерминированными* [7]. Это приводит к тому, что большинство компаний используют последовательные упрощенные модели или создают свои собственные на основании своих целей и имеющихся ресурсов. Например, Р.Купер [6] определяет семь различных промышленных образцов инноваций с выраженными различиями в процедурах их поддержки. Практика показывает, что невозможно создать одну единственную модель, которая стала бы универсальной и потом могла бы копироваться компаниями в виде лучшей практики.

## 2. Цель и задачи исследования

Цель исследования состоит в том, чтобы предложить модель построения инновационного процесса в российской организации, который соответствовал бы факторам развития: бизнес-процессам, модели управления и взаимодействию с изменяющейся внешней средой.

Для достижения этой цели необходимо решить следующие задачи:

- 1) выявить особенности инновационного процесса в рамках концепции бизнес-процессов;
- 2) выбрать методологию моделирования инновационного процесса;

3) выявить требования к моделированию и автоматизации инновационного процесса;

4) верифицировать модель методом имитационного моделирования, с учетом особенностей реализации в РФ.

Решение этих задач могло бы быть возможным, если бы инновационные процессы могли бы быть выделены из существующих процессов управления в российских реалиях. Однако, практика управленческого консалтинга демонстрирует весьма сложную картину идентификации основных процессов управления. В частности, практически все обследуемые за последние 20 лет компании обладали следующими процессными недостатками:

1) отсутствие «сквозных» процессов, т.е. процессов, детерминированных относительно стратегических целей;

2) описанные процессы искусственно фрагментарны, т.е. отражают структурное деление организации, а не процессное управление;

3) описанные процессы не соответствуют реально исполняемому, описания содержат множество логических ошибок;

4) даже автоматизированные (частично) процессы обладают значительной избыточностью в операциях, т.к. копируют существующие или предшествующие «бумажные» регламенты;

5) требуемые процессные компетенции, как правило, не анализируются и не контролируются.

Список можно продолжить, но и этих пяти пунктов достаточно, чтобы ни о какой идентификации инновационных процессов не могло быть и речи.

### 3. Особенности инновационного процесса и методология моделирования

Если все же предположить, что инновационный процесс существует на российских предприятиях, вернее существует некоторая деятельность, которая в итоге может привести к возникновению инновации, то необходимо идентифицировать признаки этой активности и затем попытаться структурировать ее в виде модели.

Первой особенностью инновационного процесса является его слабая структурированность. Инновационный процесс, являясь эволюционирующим в каждой конкретной организации, можно представить в виде ad-hoc набора действий, которые представляют собой разовые задачи, сформулированные одним сотрудником другому в форме предположения или для поддержки цикла инноваций.

Такой набор действий или «ad-hoc процесс» может быть прекращен сразу же после выполнения задачи или может вызвать последующую цепочку ad-hoc действий. С помощью подобного типа процессов, как правило, происходит обеспечение устойчивого проактивного процессного управления в изменяющейся среде. И.Нонака и Х.Такеучи [8] считают, что ключевым фактором распространения знаний в японских компаниях является создание временных команд, в которых сотрудники трудятся над определенной задачей и свободно обмениваются идеями.

В российских компаниях сотрудники также свободно обмениваются идеями, правда далеко не всегда относительно перспективных инноваций. Фактически именно этот, казалось бы, не относящийся к делу факт можно использовать для выявления центров обсуждения идей, имеющих инновационную привлекательность. Однако, это будет обсуждено несколько ниже.

Вторая особенность состоит в спонтанном характере взаимодействий субъектов инновационного процесса. Инновационные процессы возникают, как правило, в результате творческого обсуждения идеи в неформальной обстановке и перераспределения ролей и ответственности на основании интеллектуального вклада каждого, что предоставляет работникам значительную свободу в рамках их зоны ответственности. Они могут самостоятельно выбирать те или иные решения в пределах своей компетенции и исторического опыта. Поэтому ad-hoc процессы формируются в качестве низовых исполняемых бизнес-процессов, непосредственно инициируемых новаторами.

### 4. Методология идентификации и моделирования инновационного процесса

Большинство систем в качестве статистики о параметрах выполнения бизнес-процессов предоставляют данные об интенсивности (число экземпляров в период времени), продолжительности (время от запуска до завершения) и нагрузке на отдельных специалистов (число и продолжительность выполненных заданий). Все это – некоторые объективные явные характеристики исполнения процесса. Они дают количественную оценку и косвенно указывают на проблемные места в ходе процесса. Однако процесс также обладает неявным окружением, таким как обмен электронными сообщениями между соответствующими исполнителями, создание вспомогательных неофициальных, неформальных документов, запро-

сы к базам данных и вспомогательной информации. Данная информация также представляет собой знания о процессе и должна быть принята во внимание при анализе и мониторинге исполнения.

Таким образом, мы подошли к альтернативному подходу к анализу и управлению бизнес-процессами, не основанному на дискретных характеристиках, дающих лишь «сухое» представление об исполнении процесса. Это новый подход, в основе которого лежит анализ реального контента (т.е. сущностного содержания в реальном времени), околопроцессного окружения, которое содержит «живую» информацию о процессе и должно позволить координатору или владельцу процесса максимально полно и быстро понять ход выполнения процесса, а значит — вовремя отреагировать и управлять им.

Элементы базы знаний организации, представленные в словесном (или даже графическом) виде, могут быть обработаны некоторыми программными продуктами и проиндексированы, чтобы впоследствии представить структурированный каркас деятельности организации, сложенный из основных словесных единиц, характеризующих процесс. Весь объем «информационного сырья», хранящийся на серверах компании может (хотя и не гарантированно) служить основой для принятия грамотных управленческих решений, позволяющих добиваться оперативных и стратегических целей.

Инновацию с точки зрения управления знаниями можно определить как новое знание, приводящее к улучшению процесса или продукта, или услуги. В нескольких исследованиях [9] было показано, как изменение энтропии информационного потока в бизнес-процессе отражает флуктуации от требуемого целеположения. С точки зрения теоремы Шеннона, выделенные лексемы можно рассмотреть в качестве условного алфавита. Последовательность словоформ в описании или статистике исполнения процесса в терминах энтропийного подхода представляет собой сообщение. Рассуждая о процессе в данном контексте, можно заметить, что происходящие в узлах процесса события, проблемы и нестыковки непременно отразятся на процессном окружении, выраженном в единицах принятого нами условного алфавита.

Это означает, что, исчислив и приняв за эталон некоторое «нормальное», среднее значение энтропии для стабильно исполняющегося процесса, мы можем вычислить реальное значение энтропии в узле и сравнить эти значения. Иными словами, в управлении бизнес-процессом появляется еще один

индикатор, который, в зависимости от использования, может нести интегрированную оценку инновационного состояния процесса с промежуточной градуировкой, или точечную индикацию состояния процесса в конкретном узле исполнения. Привлекательность такого рассмотрения заключается в его приближенности к реальному времени возникновения флуктуации, в отличие от других методологий типа PPM в методологии ARIS.

В качестве источника информации можно рассматривать электронную почту. Электронная почтовая сеть, в сущности, является направленной схемой с узлами и ссылками, отображающими пользователей и сообщения от одних пользователей другим. Каждому электронному письму присвоена отметка о времени, а также другие атрибуты, включая отправителя, получателя, тему сообщения и его содержание. После того, как для каждого термина построена его употребительность во времени, можно исследовать флуктуации в его употреблении. Если термин является не свойственным накопленному корпоративному словарю сотрудника, то появление этого термина является отклонением от нормального функционирования сотрудника в рамках устоявшихся бизнес-процессов (рис. 1).

На основании семантического анализатора можно построить семантическую сеть употребления конкретной сущности, на основании которой сделать вывод о том, является ли термин просто ненормальным исключением («мусором»), потенциальным риском («нежелательное поведение») или потенциальной инновацией («новой идеей»), то есть построить его информационное окружение (рис. 2).

На основании анализа информационного потока в организации с более чем 1000 сотрудников были получены численные оценки коэффициента энтропии на основе выделенной онтологии деятельности. При этом в 80% случаев речь шла о банальном использовании сетевых ресурсов организации в личных целях (спорт, кулинарные рецепты и т.п.), однако, в оставшихся вариантах обсуждения касались вопросов совершенствования деятельности и развития, что в итоге могло привести к инновационным решениям.

Характер воздействия организационной структуры на эффективность деятельности организации, скорость и эффективность отклика на новые возможности существенно зависят от коммуникационных связей в организации. С помощью графа коммуникаций можно обнаружить не только информационное, но и коммуникационное окружение термина. Существуют два типа коммуникационных

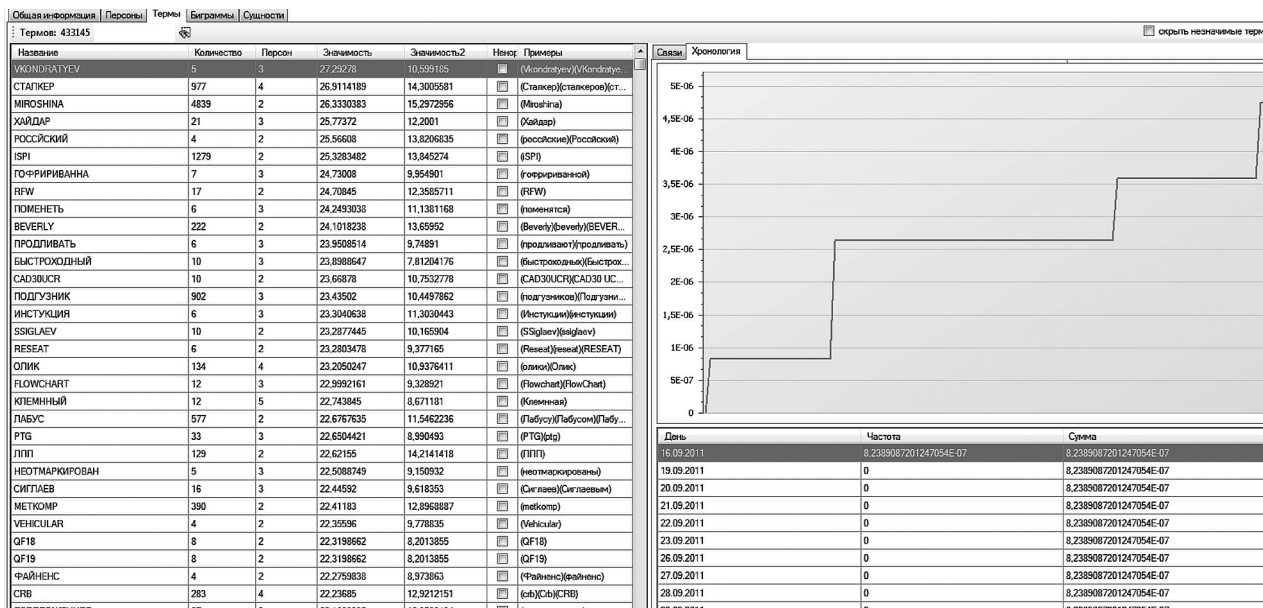


Рис. 1. Динамика употребительности термина

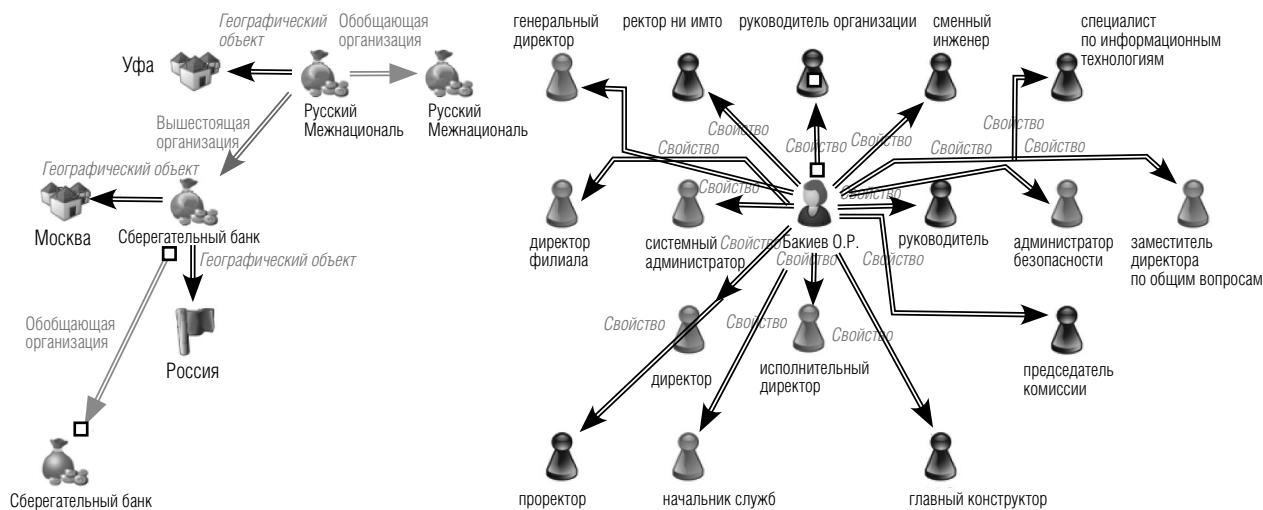


Рис. 2. Информационное окружение термина

связей: одноступенчатая коммуникационная связь (связь между двумя людьми) и многоступенчатая коммуникационная связь (непрямая связь для вербальной коммуникации, т.е. связь, которая осуществляется через одного или более посредников). Все организации имеют вертикальные и горизонтальные многоступенчатые и одноступенчатые коммуникационные связи. Сеть коммуникационных связей определяется иерархией и структурой повседневной деятельности в рамках бизнес-процессов. В инновационном процессе особое внимание необходимо уделить горизонтальным коммуникационным связям, которые пересекают границы департаментов для создания межфункциональных контактов. На-

пример, когда появляется новая идея, образуются связи между выдвинувшими ее людьми. Эти связи можно определить по динамике употребления инновационных терминов.

В этом случае, если термин является инновацией, то строится инновационное сообщество, которое самоорганизуется и включается в инновационный процесс (рис. 3).

Когда инновация проходит оценку, то связи между выдвинувшими ее людьми и источниками финансирования будут ключевыми. Когда важно адаптировать технологию к специфическим запросам потребителей, ключевыми становятся связи между

потребителями и технологами. Когда развивается новый продукт, связи между технологиями, маркетингом, службой продаж и всеми вспомогательными функциями будут ключевыми, поскольку все эти функции должны быть согласованы для эффективного проектирования продукта. Подобно этому, когда несколько различных единиц в компании обслуживают одних и тех же потребителей, связи между ними будут очень важны для достижения синергетического эффекта. Сообщество (организация) с более быстрой интенсивностью и масштабом сети коммуникационных связей будет более быстро и эффективно реагировать на изменения в технологиях и на рынках. Организации, создающие инновации в подобных самоорганизующихся сообществах, основанных на межфункциональных связях, намного результативнее, чем организации, создающие инновации в специальных отделах. При этом успешное выведение на рынок нового продукта или услуги является нелинейным процессом, включающим в себя множество циклических междисциплинарных взаимодействий между его участниками [10].

На каждой стадии жизненного цикла инноваций над инновацией работает сообщество экспертов с определенной специализацией в необходимых для

данной стадии области знаний. На основе этих сообществ экспертов формируется внутрикорпоративная экспертная сеть.

Более формальный процесс подразумевает работу с инновациями в процессе изменений, которые сотрудники заносят в определенную базу знаний. Каждая инновация представляет проект с определенным жизненным циклом и обязательным атрибутом – целью. После выделения инноваций группе участников может быть предложено структурировать обсуждение и последующие действия в форме модельного процесса. При этом наиболее удобной средой, как показывают исследования А.Фляйшмана [11] и В.Шмидта, оказывается методология *субъектно-ориентированного подхода S-VRM*. Сущность этого подхода можно изложить как предоставление свободы принятия решений группе сотрудников, выполняющих определенный процесс с четко сформулированной и ими осознанной целью. Сотрудники сами выбирают и производят отдельные операции процесса в той последовательности, которая представляется им оптимальной. Они устанавливают (прописывают) взаимодействия друг с другом в специальной среде с целью координации своих действий для достижения тре-

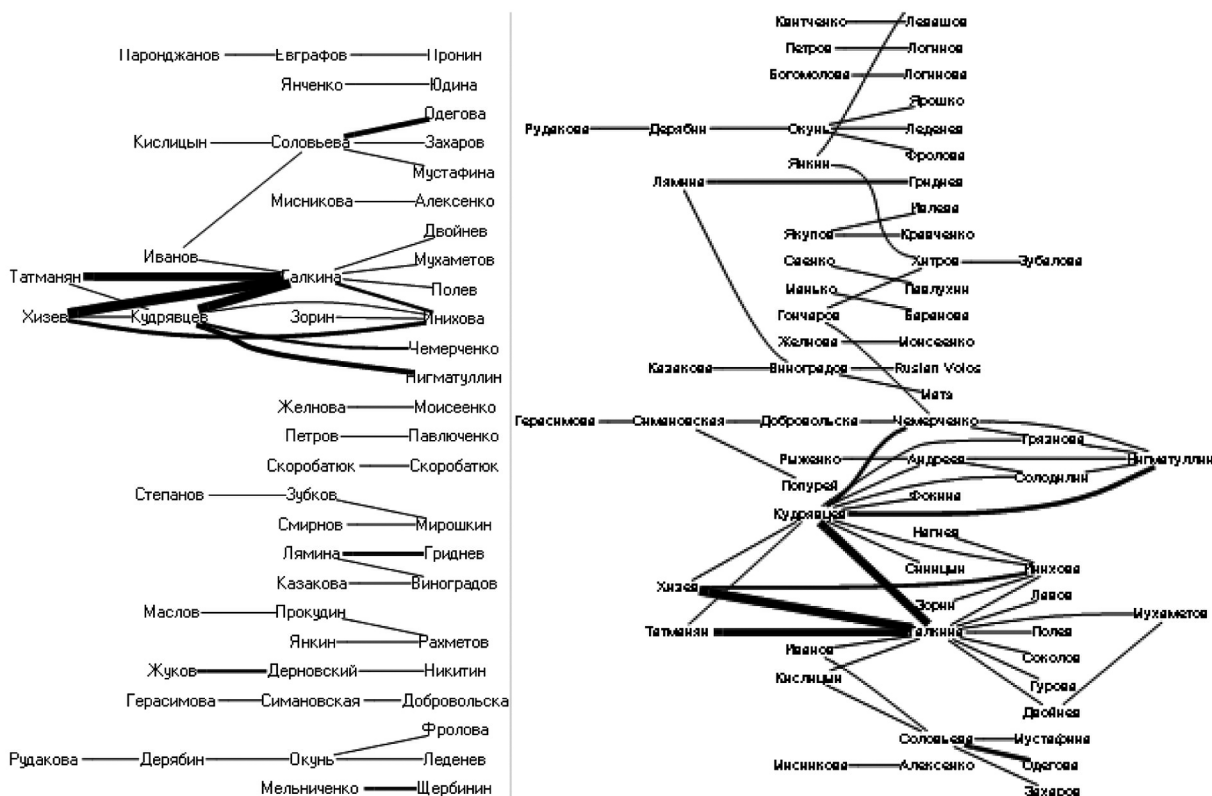


Рис. 3. Коммуникационное окружение термина



буемого результата. В результате сотрудники имеют сгенерированную систему управления потоком работ (workflow), ориентированную на оптимальное для данного момента достижение цели.

Первой стадией процесса является поиск и оценка инновации. В ее рамках новатор создает идею и осуществляет поиск экспертов для ее оценки, а в случае положительной оценки – направляет идею для дальнейшей проработки. На второй стадии происходит разработка инновации, в результате чего появляется опытный образец новшества. Если эксперты принимают решение об освоении, то опытный образец поступает на следующую стадию – внедрение инновации. В случае успешного внедрения и положительной оценки экспертов происходит распространение и рутинизация инновации, которая в результате освоения превращается в «традицию». Как только эксперты принимают решение о дальнейшей неэффективности использования инновации, они направляют запрос на ее ликвидацию. Таким образом на каждой стадии жизненного процесса инновации происходит тесное взаимодействие с экспертами, что позволяет компании выявить наиболее эффективные и востребованные инновации и не тратить силы, время и средства на новации, кажущиеся значительными на стадии идеи, но не приносящие эффекта в дальнейшем.

Каждую стадию процесса можно представить в виде четырехфазной структуры:

1) фаза инициации:

а. для каждого эксперта создается профайл на основании той информации о нем, которая хранится в организации: артефакты, для которых он был автором (электронные письма, документы и т.д.), проекты, в которых принимал участие, резюме, дополнительная информация;

б. описание инновации подается на вход процесса в виде текста;

2) фаза идентификации экспертов:

а. подбираются подходящие кандидаты для создания экспертного сообщества для работы над инновацией, на основании сопоставления описания инновации и экспертного профайла кандидата;

3) фаза создания экспертного сообщества – обсуждение с экспертами их участия в проекте на основании уровня их вовлеченности и предпочтений;

4) реализация проекта.

Процесс описан с точки зрения конкретного участника данного процесса (субъекта). В рассматриваемом инновационном процессе можно выделить двух субъектов – инициатора и исполнителя, которыми может быть любой сотрудник организации (роли). Структурированное описание взаимодействия между субъектами, в совокупности с последовательностью действий каждого отдельного субъекта, дает полное представление о процессе (рис. 4). Исполнитель является множественным субъектом: это означает, что процесс исполнителя могут параллельно выполнять столько сотрудников, сколько включено в сообщество. Иначе говоря, создается столько экземпляров процесса исполнителя, сколько всего исполнителей приняло приглашение на вступление в сообщество (в идеале, это число должно быть равно числу экспертов). Инициатор – это сотрудник, обнаруживший потенциальную новацию и иницирующий ad-hoc процесс. Совместная работа предполагает, что исполнители (эксперты) решают задачи в рамках ad-hoc процесса, при этом сообщество постоянно обновляется при появлении задач, которые не могут быть решены включенными в него экспертами. На разных этапах жизненного цикла инноваций инициаторами будут являться разные сотрудники.

На рис. 5 и 6 показаны действия инициатора и исполнителя ad-hoc процесса. После оценки инновации инициатор производит поиск экспертов и от-

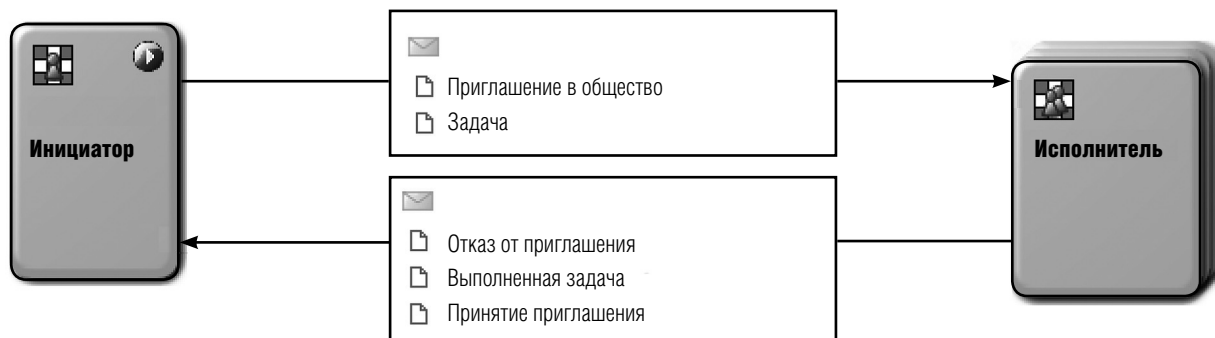


Рис. 4. Взаимодействие субъектов инновационного ad-hoc процесса

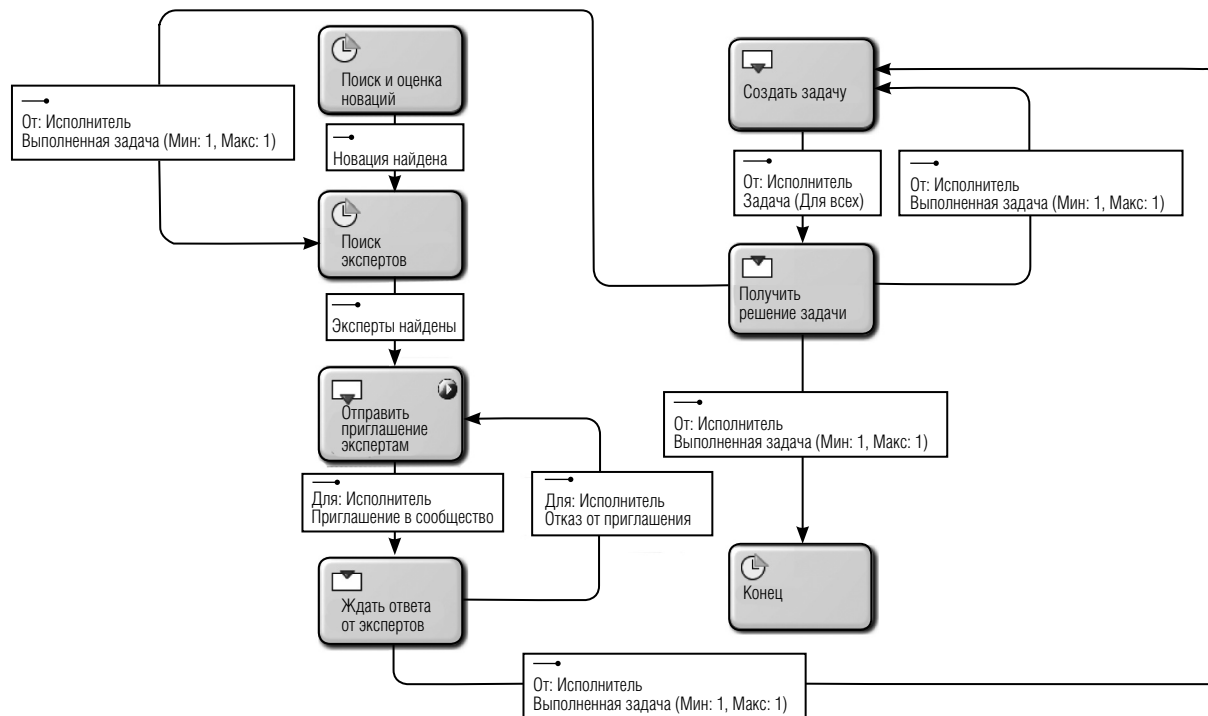


Рис. 5. Действия инициатора ad-нос процесса

правляет им приглашение для создания экспертного сообщества. После получения положительного ответа от эксперта этот эксперт автоматически включается в сообщество и ожидает поступления задачи. После решения задачи он отправляет решение инициатору и ожидает следующей задачи. Если эксперты не могут выполнить задачу, то инициатор снова проводит поиск экспертов.

Таким образом, происходит построение постоянно обновляемой экспертной сети и решение ad-нос задач в рамках инновационного процесса.

Теория управления знаниями и самоорганизующейся организации с субъектно-ориентированным подходом имеют много общего. Предоставляя инициативу работникам - пользователям системы, им одновременно предоставляется целый набор инструментов для инициативного выполнения своей работы. Вместе с тем, ЕСМ-система содержит необходимые средства для мониторинга всех действий пользователей, регистрации действий, сообщений и результатов, а также их анализ как неструктурированной информации. Более того, анализ записанных спонтанных бизнес-процессов, возникших в процессе работы, позволяет на основе теорий процессов как случайных ориентированных графов выделить наиболее оптимальные процессы, вскрыть проблемы, обеспечить максимальную про-

изводительность труда и гибкость, гарантирующую адаптируемость к быстроменяющимся требованиям рынка.

## 5. Требования к моделированию и автоматизации инновационного процесса

Для построения вышеописанного ad-нос процесса необходимо выделить требования к нему и реализовать эти требования.

### 5.1. Использование знаний экспертов

В первую очередь, для эффективного производства инноваций (создание нового знания, приобретение имеющегося и сохранения знания) необходима специализация сотрудников в определенных областях знаний. Знания, особенно зависящие от контекста, а также неявные знания, полученные в результате опыта, как правило, уникальны. Это подразумевает, что эксперты неизбежно являются узкими специалистами, тогда как «мастера на все руки» не имеют глубоких знаний. Соответственно, одними из субъектов процесса должны являться эксперты, на основе списков экспертов формируется внутрикорпоративная экспертная сеть.

Для эффективного инновационного процесса особенно важным условием является использо-

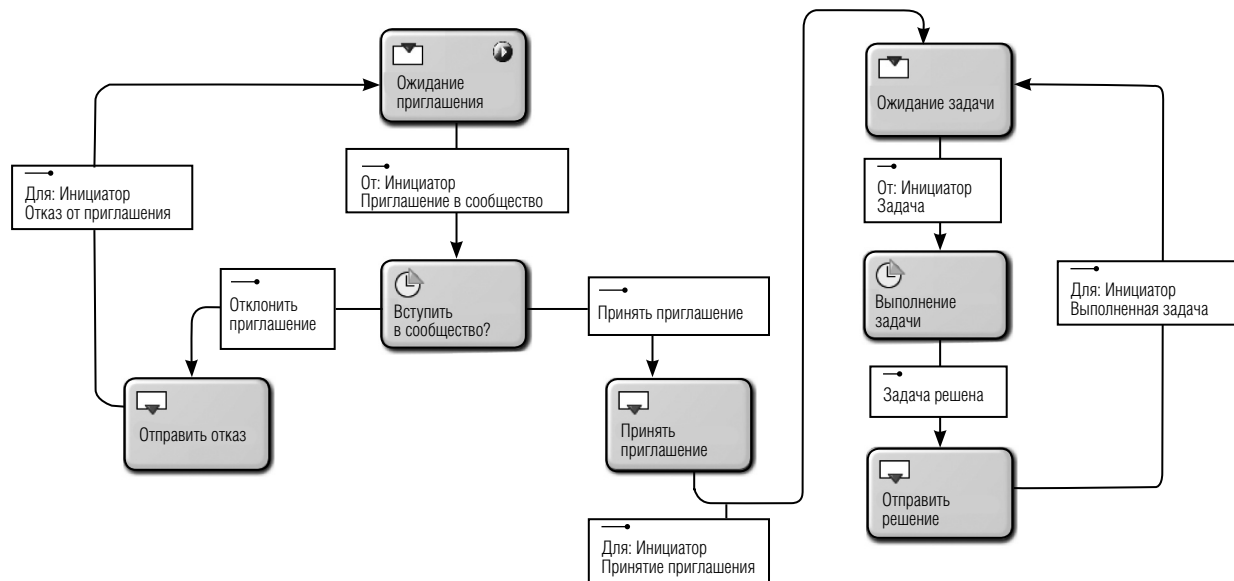


Рис. 6. Действия исполнителя

вание накопленного интеллектуального капитала всех сотрудников организации внутри инновационного проекта, а также взаимодействие с экспертами, что требует тесных коммуникаций между ними. Кроме того, помимо сотрудников предприятия, в качестве экспертов также должны выступать потребители и поставщики, для изучения тенденций рынка и требований конечных пользователей.

Поиск экспертов осуществляется на основе обработки текстового контента, образующегося в корпоративной сети (включая архив электронной почты и массивы других видов текстовых сообщений) и характеристик внутрикорпоративных и внешних информационных потоков. Списки экспертов образуются в терминах корпоративной службы каталогов (например, Microsoft Active Directory, LDAP).

## 5.2. Изменение корпоративной культуры компании в области инноваций

Компании не добьются постоянного успеха на рынке, если они внедряют инновации случайным, нескоординированным образом, растрачивая ограниченные ресурсы на неэффективные действия. В частности Карилло и Геймон [12] обнаружили, что компании не должны инвестировать в изменения внутрифирменных процессов до тех пор, пока у них нет достаточного количества необходимых для этого знаний. Однако «научение до действия» обычно недооценивается, поэтому компании склонны

мало инвестировать в развитие «поглощающей способности», то есть способности организации использовать накопленные знания [13]. Развитие этой способности включает в себя развитие доступа к внешним знаниям, что требует культуры распространения знаний, а также трансформации и внедрения полученных знаний с целью усиления основных компетенций.

Адаптивные способности самообучающейся организации по сравнению с организацией обычного типа намного выше. Это обусловлено тем, что самообучающаяся организация управляется скорее посредством создания определенной внутренней среды, благоприятной для зарождения инноваций, чем посредством директивных предписаний. Принципы совершенствования вводятся в повседневную житейскую практику организации на уровне миссии и ценностей, культивируются системное мышление и творчество, обеспечиваются информационная открытость и толерантность к ошибкам. В результате работники самообучающейся организации не пассивно встречают инновации, а являются их активными проводниками и создателями. Каждый сотрудник организации размышляет о возможных улучшениях на своем участке работы, будь то продукция или процессы, внешние или внутренние взаимодействия.

В рамках самообучающейся организации инновационный процесс осмысливается как постоянный внутриорганизационный творческий поиск с высокой нелинейностью и непредсказанностью. Это

означает, что инновационный процесс невозможно полностью алгоритмизировать и прописать в инструкциях. В связи с этим появилась необходимость в поиске параметров, которые служили бы направляющими для инновационных потоков в организации. Эти параметры были найдены в таких категориях как общее видение, миссия и ценности компании. Будучи заданными, они позволяют определить направление развития организации и направление инновационной активности ее сотрудников.

### 5.3. Оценка инновационных идей на ранних стадиях процесса

Оценка идей должна быть внедрена как можно раньше в инновационном процессе с привлечением экспертов, что многократно снижает риски пропуска на следующую стадию неперспективной идеи. Это реализуется с помощью установления контрольных точек в каждой стадии жизненного цикла инноваций.

### 5.4. Межфункциональное взаимодействие

Потенциал всей организации к созданию и выводу на рынок инноваций значительно выше, чем у организаций, создающих инновации в специ-

альных отделах. Таким образом, на каждой стадии жизненного цикла инноваций в результате должны появляться команды, выполняющие параллельные действия для увеличения скорости разработки, причем эти команды должны быть межфункциональными.

## 6. Выводы

В статье сделан обзор становления идеи инновационного процесса от понимания его как последовательного процесса (от НИОКР до распространения инноваций), до интерпретации инновационного процесса как универсального средства развития организации и инструмента преобразования организацией внешней среды (рынка) за счет использования интеллектуального капитала как сотрудников, так и внешних по отношению к организации субъектов. Описана вся сложность и неопределенность, присущая инновационному процессу, учитывающему обратные связи, а также внутреннюю и внешнюю среду организации.

В итоге предлагаемый подход к построению инновационного процесса позволяет использовать знания экспертов для оценки инноваций на каждой стадии ее жизненного цикла, устраняя коммуникационные барьеры между его участниками. ■

## Литература

1. Kline S.J., Rosenberg N. An overview of innovation // The positive sum strategy: Harnessing technology for economic growth / Edited by R.Landau, N.Rosenberg. Washington: National Academy Press, 1986.
2. Grant R. Toward a knowledge-based theory of the firm // Strategic Management Journal. 1996. No. 17 (winter special issue). P. 109–122.
3. Чесбро Г. Открытые инновации. Создание прибыльных технологий / Пер. с англ. М.: Поколение, 2007.
4. Trott P. Innovation management and new product development. Harlow, England: Pearson Education Limited, 2005.
5. Wheelwright S.C., Clark K.B. Revolutionizing product development: Quantum leaps in speed, efficiency and quality. NY: The Free Press, 1992.
6. Cooper R.G. Winning at new products. Accelerating the process from idea to launch. Cambridge, MA: Perseus Publishing, 2001.
7. Mahdi S. Search strategy in product innovation process: theory and evidence from the evolution of agrochemical lead discovery process. DPhil Thesis, Unpublished. SPRU, University of Sussex, UK, 2002.
8. Нонака И., Takeuchi X. Компания – создатель знания. Зарождение и развитие инноваций в японских фирмах / Пер. с англ. М.: Олимп-Бизнес, 2003.
9. Romanov D.A., Ponfilenok M., Kazantsev N. Potential innovations (new ideas/trends) detection in information network // International Journal of Future Computer and Communication. 2013. Vol. 2. No. 1. P. 63–66.
10. Berkhout G., Van Der Duin P. New ways of innovation: an application of the cyclic innovation model to the mobile telecom industry// International Journal of Technology Management. 2007. Vol. 40, No. 4. P. 294–309.
11. Fleischmann A. What is S-BPM? S-BPM ONE – Setting the stage for subject-oriented business process management // Communications in Computer and Information Science. Heidelberg: Springer Berlin. 2010.

12. Carrillo J.E., Gaimon C. Improving manufacturing performance through process change and knowledge creation // Management Science. 2000. No. 46 (2). P. 265–288.
13. Cohen W.M., Levinthal D.A. Fortune favors the prepared firm // Management Science. 1994. No. 40 (2). P. 227–251.
14. Оппенлендер К. Технический прогресс. М.: Прогресс, 1981.
15. Gromoff A.I., Chebotarev V.G., Bilinkis J.A., Evina K.Y. An approach to agility in enterprise innovation // S-BPM ONE – Learning by Doing – Doing by Learning: Third International Conference S-BPM ONE, 2011. Vol. 4. Issue 213. NY: Springer, 2011. P. 271–280.
16. Чеботарев В.Г., Громов А.И. Технология инновационной деятельности предприятия // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2011. № 3. С. 3–9.

---

## AN APPROACH TO INNOVATION PROCESS MODEL DEVELOPMENT USING SUBJECT-ORIENTED METHODOLOGY PLATFORM

### **Alexander GROMOFF**

*Professor, Department of Business Processes Modeling and Optimization,  
Faculty of Business Informatics, National Research University Higher School of Economics  
Address: 20, Myasnitckaya str., Moscow, 101000, Russian Federation  
E-mail: agromov@hse.ru*

### **Julia BILINKIS**

*Lecturer, Department of Business Processes Modeling and Optimization,  
Faculty of Business Informatics, National Research University Higher School of Economics  
Address: 20, Myasnitckaya str., Moscow, 101000, Russian Federation  
E-mail: ystavenko@hse.ru*

### **Albert FLEISCHMANN**

*Owner, Interaktiv Unternehmensberatung  
Address: 16, Burgfriedenstraße, Pfaffenhofen, 85276, Germany  
E-mail: albert.fleischmann@interaktiv.expert*

### **Tatiana NOVIKOVA**

*Lecturer, Department of Business Processes Modeling and Optimization,  
Faculty of Business Informatics, National Research University Higher School of Economics  
Address: 20, Myasnitckaya str., Moscow, 101000, Russian Federation  
E-mail: tvnovikova@hse.ru*

### **Eugene KHUDOBIN**

*Director, Center of Efficient Organizations  
Address: 19, build, 6, Leninskaya Sloboda Street, Moscow, 115280, Russian Federation  
E-mail: eugenex@yandex.ru*

### **Dmitry TORSHIN**

*Investment Director, IT Group  
Address: 19, build, 6, Leninskaya Sloboda Street, Moscow, 115280, Russian Federation  
E-mail: dtorshin@it.ru*

This paper examines the possibility of structuring innovation activities that entails formation of innovation process and management techniques in evolving external and internal environment. It reviews studies focusing on innovation generation in knowledge management processes and innovation process models based on knowledge and learning. Actually organizations have been facing challenges instigated by obsolete collective activity concepts caused by geopolitical and economic issues that impel them to identify ways to involve not only their own employees in expert communities, but also customers, partners and other persons capable to participate in collective creative activities. In this context a new approach has been suggested to determine the innovation process as an ad-hoc process to be implemented in the subject-oriented business process management methodology (S-BPM). The new approach implies identification of innovation process peculiarities that will determine a modeling methodology and requirements for innovation process automation with due regard to a simulation modeling method and Russian business environment specifics.

The study relies on a survey of Russian companies over the recent 20 years, where process drawbacks had been detected, that were basically typical for all companies. The review findings have enabled to identify innovation process peculiarities specific to Russian companies.

As a result an alternative approach to business process analysis and management has been elaborated: it involves analysis of real content (i.e. substantive content in real time) of a process environment rather than analysis of discrete characteristics.

**Key words:** innovation, innovation process, expert, subject-oriented process management.

**Citation:** Gromoff A.I., Bilinkis J.A., Fleischmann A., Novikova T.V., Khudobin E.I., Torshin D.V. (2015) Podhod k postroeniju modeli innovacionnogo processa na platforme sub'ektno-orientirovannoj metodologii [An approach to innovation process model development using subject-orientated methodology platform]. *Business Informatics*, no. 1 (31), pp. 18–30 (in Russian).

#### References

1. Kline S.J., Rosenberg N. (1986) An overview of innovation // The positive sum strategy: *Harnessing technology for economic growth* / Edited by R.Landau, N.Rosenberg. Washington: National Academy Press.
2. Grant R. (1996) Toward a knowledge-based theory of the firm. *Strategic Management Journal*, no. 17 (winter special issue), pp. 109–122.
3. Chesbro G. (2007) *Otkrytye innovacii. Sozdanie pribyl'nyh tehnologij* [Open innovations. Development of profitable technologies]. Moscow: Pokolenie. (in Russian)
4. Trott P. (2005) *Innovation management and new product development*. Harlow, England: Pearson Education Limited.
5. Wheelwright S.C., Clark K.B. (1992) *Revolutionizing product development: Quantum leaps in speed, efficiency and quality*. NY: The Free Press.
6. Cooper R.G. (2001) *Winning at new products. Accelerating the process from idea to launch*. Cambridge, MA: Perseus Publishing.
7. Mahdi S. (2002) *Search strategy in product innovation process: theory and evidence from the evolution of agrochemical lead discovery process*. DPhil Thesis, Unpublished. SPRU, University of Sussex, UK.
8. Nonaka I., Takeuchi H. (2003) *Kompanija – sozdatel' znaniya. Zarozhdenie i razvitie innovacij v japonskih firmah* [A company as a knowledge creator. Initiation and development of innovations in Japanese firms]. Moscow: Olymp-Business. (in Russian)
9. Romanov D.A., Ponfilenok M., Kazantsev N. (2013) Potential innovations (new ideas/trends) detection in information network. *International Journal of Future Computer and Communication*, vol. 2, no. 1, pp. 63–66.
10. Berkhout G., Van Der Duin P. (2007) New ways of innovation: an application of the cyclic innovation model to the mobile telecom industry. *International Journal of Technology Management*, vol. 40, no. 4, pp. 294–309.
11. Fleischmann A. (2010) *What is S-BPM? S-BPM ONE – Setting the stage for subject-oriented business process management*. *Communications in Computer and Information Science*. Heidelberg: Springer Berlin.
12. Carrillo J.E., Gaimon C. (2000) Improving manufacturing performance through process change and knowledge creation. *Management Science*, no. 46 (2), pp. 265–288.
13. Cohen W.M., Levinthal D.A. (1994) Fortune favors the prepared firm. *Management Science*, no. 40 (2), pp. 227–251.
14. Oppenlender K. *Tehnicheskij progress* [Technical progress]. Moscow: Progress. (in Russian)
15. Gromoff A.I., Chebotarev V.G., Bilinkis J.A., Evina K.Y. (2011) An approach to agility in enterprise innovation. *S-BPM ONE – Learning by Doing – Doing by Learning: Third International Conference S-BPM ONE, 2011*. Vol. 4, no. 213, pp. 271–280.
16. Chebotarev V.G., Gromoff A.I. (2011) Tehnologija innovacionnoj dejatel'nosti predpriyatija [Technology of innovative activity of an enterprise]. *Information Technologies in Design and Manufacturing*, no. 3, pp. 3–9.

# A FOUR-PERSON CHESS-LIKE GAME WITHOUT NASH EQUILIBRIA IN PURE STATIONARY STRATEGIES

**Vladimir GURVICH**

*Professor of Applied Mathematics and Computer Science,  
Rutgers Center for Operations Research,  
Business School, Rutgers, the State University of New Jersey, USA  
Address: 100, Rockefeller Road, Piscataway, NJ, 08854, USA  
E-mail: gurvich@rutcor.rutgers.edu, vladimir.gurvich@gmail.com*

*In this paper we give an example of a finite positional game with perfect information and without moves of chance (a chess-like game) that has no Nash equilibria in pure stationary strategies. In this example the number  $n$  of players is 4, the number  $p$  of terminals is 5; furthermore, there is only one directed cycle.*

*On the other hand, it is known that a chess-like game has a Nash equilibrium (NE) in pure stationary strategies if: (A)  $n \leq 2$ ; or (B)  $p \leq 3$  and (C) any infinite play is worse than each terminal for every player; or (D) each of  $n$  players controls a unique position; or (E) there exist no directed cycles.*

*It remains open whether a NE-free chess-like game (with at least one directed cycle) may exist in each of the following four cases: (A')  $n = 3$ ; (B')  $2 \leq p \leq 4$ ; (C')  $n > 2$ ,  $p > 3$ , and condition (C) holds; (D') each of  $n$  players controls at most 2 positions.*

*In our example  $n = 4$ ,  $p = 5$ , condition (C) does not hold, and there is a player controlling 3 positions.*

**Key words:** positional game, stochastic game, chess-like game, perfect information, move of chance, Nash equilibrium, terminal position, directed cycle.

**Citation:** Gurvich V.A. (2015) A four-person chess-like game without Nash equilibria in pure stationary strategies. *Business Informatics*, no. 1 (31), pp. 31–40.

## 1. Introduction

Zermelo gave his seminal talk on solvability of chess in pure strategies [40] as early as in 1912. Later, König [29] and Kalman [28] strengthen this result showing that in any two-person zero-sum chess-like game there exist pure stationary uniformly optimal strategies producing a subgame perfect saddle point.

Let us note that the same position can appear several times in the game of chess, or in other words, the corresponding (directed) graph has (directed) cycles.

A chess-like game is a finite  $n$ -person positional game with perfect information and without moves of chance. The set of its  $q = p + 1$  outcomes  $A = \{a_1, \dots, a_p, c\}$  consists of  $p$  terminals, from which there is no move; furthermore all infinite plays are assumed to be equivalent and to form a unique special outcome  $c$ .

The following assumption will play an important role:

◆ (C): Any infinite play is worse than any terminal for each player.

In 1950, Nash introduced his fundamental concept of equilibrium for  $n$ -person games [35, 36]. After this, it

became natural to ask, whether one can extend the above solvability results to the  $n$ -person chess-like games, replacing the concept of a saddle point by the more general concept of Nash equilibrium (NE), assuming (C) or not; or in other words,

♦ ( $Q$ ): Whether a chess-like game has a NE in pure stationary strategies?

♦ ( $Q_C$ ): Whether a chess-like game satisfying (C) has a NE in pure stationary strategies?

Obviously, the positive answer to ( $Q$ ) would imply the positive answer to ( $Q_C$ ). Yet, in this paper, we answer ( $Q$ ) in the negative, while ( $Q_C$ ) remains still open.

**Remark 1.** Both questions ( $Q$ ) and ( $Q_C$ ) appear in Table 1 of [3]. This table contains 16 pairs of questions exactly one of which requires (C) in each pair; 30 questions (15 pairs) are answered in [3]. Among the 30 answers, 22 are negative and 8 are positive, but interestingly, no answer ever depends on (C), that is, in each of these 15 pairs either both answers are negative, or both are positive. Our questions ( $Q$ ) and ( $Q_C$ ) form the 16th pair; ( $Q$ ) will be answered in the negative in this paper, while ( $Q_C$ ) remains open. Yet, taking the above observations into account, we second [26] and conjecture that the answer to ( $Q_C$ ) is the same as to ( $Q$ ), that is, negative. However, the example for ( $Q_C$ ) might be larger than our example for ( $Q$ ) and more difficult to find out.

In Section 3 we will construct a NE-free chess-like game with four players,  $n = 4$ , and five terminals,  $p = 5$ , or in other words, six outcomes,  $q = 6$ . Furthermore, the corresponding directed graph has a unique directed cycle.

In Section 3 of [7] it was shown that a chess-like game has a NE when  $n \leq 2$ ; see also Section 12 of [9] and Section 5 below. This result is based on an old criterion of Nash-solvability for the two-person game forms [20]. In Section 4 of [7] it was also shown that a chess-like game has a NE whenever condition (C) holds and  $p \leq 2$ . In [10] this result was strengthened: the bound  $p \leq 2$  was replaced by  $p \leq 3$ . It remains still open whether a NE-free chess-like game exists (i) for  $n = 3$ , or (ii) for  $2 \leq p \leq 4$ , or (iii) for some  $n$  and  $p$  provided (C) holds.

**Remark 2.** It was shown in [15] that for each  $\epsilon > 0$ , a subgame perfect  $\epsilon$ -NE in pure but history dependent strategies exists, even for the  $n$ -person backgammon-like games, in which positions of chance are allowed. Moreover, it was shown in [14, 15] that for the chess-like games, the above result holds even for  $\epsilon = 0$ , that is, a standard NE exists too.

Yet, our example shows that pure stationary strategies may be insufficient to ensure the existence of a NE in any  $n$ -person chess-like game, when  $n \geq 4$ ; not to mention the existence of a subgame perfect NE. For the latter case counterexamples, satisfying (C) with  $n = 2$  and  $n = 3$ , were obtained earlier [7, 1, 3].

## 2. Main definitions

The backgammon-like and chess-like games are finite positional  $n$ -person games with perfect information, which can and, respectively, cannot have random moves.

More precisely, such a game is modeled by a finite directed graph (digraph)  $G = (V, E)$ , whose vertices are partitioned into  $n + 2$  subsets:  $V = V_1 \cup \dots \cup V_n \cup V_T \cup V_R$ . A vertex  $v \in V_i$  is interpreted as a position controlled by the player  $i \in I = \{1, \dots, n\}$ , while  $v \in V_R$  is a position of chance, with a given probabilistic distribution on the outgoing edges. Furthermore, a directed edge  $(v, v')$  is interpreted as a move from the position  $v$  to  $v'$ . Then,  $v \in V_T = \{a_1, \dots, a_p\}$  is a terminal, from which there is no move. We also fix an initial position  $v_0 \in V \setminus V_T$ .

A game is called chess-like if it has no positions of chance,  $V_R = \emptyset$ .

The digraph  $G$  may have directed cycles (dicycles). Recall that a position may appear several times in a backgammon or chess play. We assume that all dicycles of  $G$  form a unique outcome  $c$  of the game. Thus, the set of outcomes is  $A = \{a_1, \dots, a_p; c\}$ .

**Remark 3.** In [9] a different approach was suggested (for  $n = 2$ ): each dicycle was treated as a separate outcome. Anyway, our main example contains only one dicycle.

To each player  $i \in I$  and outcome  $a \in A$  we assign a payoff (called in the literature also a reward, utility, or profit)  $u(i, a)$  of the player  $i \in I$  in case the outcome  $a \in A$  is realized. The corresponding mapping  $u: I \times A \rightarrow \mathbb{R}$  is called the payoff (reward, utility, or profit) function.

Since our main result is negative and related to chess-like games, we could restrict ourselves and the players to their strict preferences, instead of the real-valued payoffs. The preference of a player  $i \in I$  is a complete order  $o_i$  over  $A$ . The notation  $a \succ_{o_i} a'$  and  $a \succcurlyeq_{o_i} a'$  mean that  $i$  prefers  $a$  to  $a'$  strictly and, respectively, not strictly. Note that the latter takes place if and only if  $a = a'$ . Furthermore, let  $o = (o_1, \dots, o_n)$  denote a preference profile.

A backgammon-like game in the positional form is the quadruple  $(G, D, o, v_0)$ , where  $G = (V, E)$  is a digraph,



$D: V = V_1 \cup \dots \cup V_n \cup V_T \cup V_R$  is a partition of the positions,  $o = (o_1, \dots, o_n)$  is a *preference profile*, and  $v_0$  is a fixed initial position. The triplet  $(G, D, v_0)$  is called a *positional game form*.

To define the *normal form* (of a chess-like game) let us introduce the concept of strategies. A (*pure and stationary*) *strategy* of a player  $i \in I$  is a mapping that assigns a move  $(v, v')$  to each position  $v \in V_i$ . (In this paper we restrict ourselves and the players to their pure and stationary strategies, so mixed and history dependent strategies will not be mentioned or even introduced.)

A set of  $n$  strategies  $s = \{s^i, i \in I\}$  is called a *strategy profile* or a *situation*. Each situation uniquely defines a *play*  $P(s)$  that begins in  $v_0$  and either ends in a terminal  $a \in V_T$  or cycles. In the latter case  $P(s)$  looks like a «lasso»: it consists of an initial part and a dicycle repeated infinitely. This is so, because each (pure stationary) strategy assigns the same move whenever a position is repeated and, hence, each situation  $s$  uniquely defines a move  $(v, v')$  in each non-terminal position  $v \in V \setminus V_T$ . Thus, we obtain a *game form*, that is, a mapping  $g: S \rightarrow A$ , where  $S = S_1 \times \dots \times S_n$  is the direct product of the sets  $S_i = \{s^i_1, \dots, s^i_k\}$  of strategies of all players  $i \in I$ . The *normal form* of a chess-like game  $(G, D, o, v_0)$  is defined as the pair  $(g, o)$ .

For the backgammon-like games each strategy profile  $s$  uniquely determines a Markov chain, which assigns to each outcome  $a \in A$  (that is, a terminal or an infinite play) a well defined limit probability  $p(s, a)$ . The payoff  $u(i, s)$  of a player  $i \in I$  in this situation  $s$  is defined as the expectation of the corresponding payoffs

$$u(i, s) = \sum_{a \in A} p(s, a) u(i, a).$$

A situation  $s \in S$  is called a *Nash equilibrium* (NE) if for each player  $i \in I$  and for each situation  $s'$  that may differ from  $s$  only in the coordinate  $i$ , the inequalities  $u(i, s) \geq u(i, s')$  and  $g(s) \succcurlyeq_{o_i} g(s')$  hold in case of the backgammon- and chess-like games, respectively; in other words, if no player  $i \in I$  can profit replacing his/her strategy  $s^i$  in  $s$  by a new strategy  $s'^i$ , provided the  $n - 1$  remaining players keep their strategies unchanged. Note that, since the preference  $o_i$  is strict, two situations  $s$  and  $s'$  are equally good for the player  $i$  if and only if the corresponding two outcomes coincide, that is,  $g(s) =_{o_i} g(s')$  if and only if  $g(s) = g(s')$ .

### 3. The main example

The positional and normal forms of the game announced in the title of the paper are presented below by the figure and table, respectively.

### 4. Open ends

In the above example there are four players,  $n = 4$ , five terminals,  $p = 5$ , and the digraph contains only one dicycle. As we already mentioned, the following results concerning Nash-solvability are known: Every two-person chess-like game has a NE; see Section 3 of [7], Section 12 of [9], and/or Section 5 below. It was also shown in [7] that a chess-like game has a NE whenever condition (C) holds and  $p \leq 2$ . In [10] this result was strengthened: the bound  $p \leq 2$  was replaced by  $p \leq 3$ .

Thus, the following three questions remain open: whether a chess-like game is Nash-solvable (i) when  $n = 3$ , or (ii) when  $2 \leq p \leq 4$ , or (iii) for any  $n \geq 3$  and  $p \geq 4$  provided condition (C) holds. It was conjectured in [26] that the answer to (iii) is negative. The corresponding example, if it exists, would strengthen simultaneously the example of Section 3 and the main example of [26]; see *Figure 1* and *Table 1* there.

Finally, it follows from the main result of [7] that an  $n$ -person chess-like game is Nash-solvable whenever each player controls a unique position. In the above example, the players 1, 2, 3, 4 control 2, 3, 2, 1 positions, respectively. It remains open, if there is a chess-like NE-free game in which each player controls, say, at most two positions.

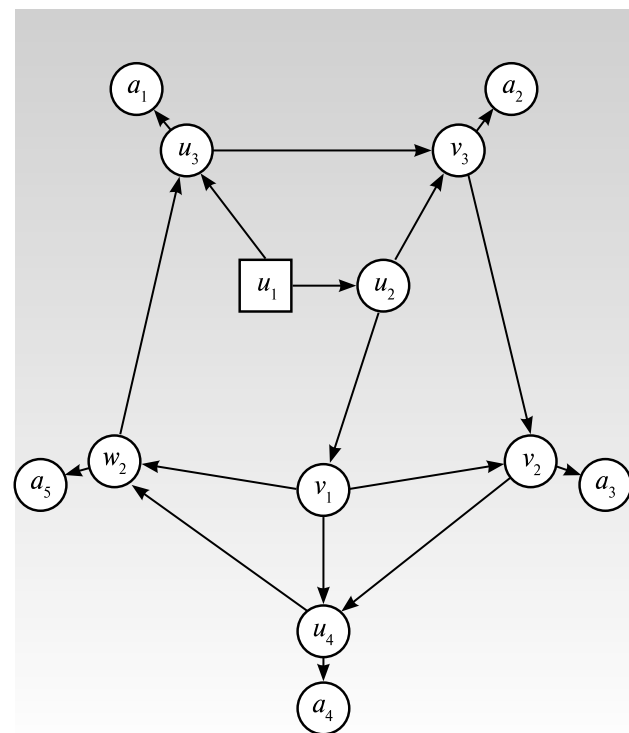


Fig. 1. The main example in the positional form

Table 1.

The main example in the normal form

		$s_1^4$								$s_2^4$							
		$s_1^2$	$s_2^2$	$s_3^2$	$s_4^2$	$s_5^2$	$s_6^2$	$s_7^2$	$s_8^2$	$s_1^2$	$s_2^2$	$s_3^2$	$s_4^2$	$s_5^2$	$s_6^2$	$s_7^2$	$s_8^2$
$s_1^3$	$s_1^1$	$c^4$	$c^4$	$a_3^2$	$a_3^{23}$	$a_5^2$	$a_5^2$	$a_3^2$	$a_3^{23}$	$a_4^2$	$a_4^{23}$	$a_3^1$	$a_3^3$	$a_4^{24}$	$a_4^{234}$	$a_3^1$	$a_3^3$
	$s_2^1$	$c^4$	$c^4$	$a_3^{23}$	$a_3^{23}$	$a_5^2$	$a_5^2$	$a_3^{23}$	$a_3^{23}$	$a_4^{23}$	$a_4^{23}$	$a_3^{13}$	$a_3^3$	$a_4^{234}$	$a_4^{234}$	$a_3^{13}$	$a_3^3$
	$s_3^1$	$c^4$	$c^4$	$a_3^{23}$	$a_3^{23}$	$a_5^2$	$a_5^2$	$a_5^{12}$	$a_3^{23}$	$a_4^2$	$a_4^{23}$	$a_4^{24}$	$a_3^3$	$a_4^{24}$	$a_4^{234}$	$a_4^{24}$	$a_3^3$
	$s_4^1$	$c^4$	$c^4$	$a_3^{23}$	$a_3^{23}$	$a_5^2$	$a_5^2$	$a_3^{23}$	$a_3^{23}$	$a_4^{23}$	$a_4^{23}$	$a_3^{13}$	$a_3^3$	$a_4^{234}$	$a_4^{234}$	$a_3^{13}$	$a_3^3$
	$s_5^1$	$c^4$	$c^4$	$a_3^{23}$	$a_3^{23}$	$a_5^2$	$a_5^2$	$a_5^{12}$	$a_3^{23}$	$a_4^{23}$	$a_4^{23}$	$a_3^{13}$	$a_3^3$	$a_5^{12}$	$a_4^{234}$	$a_5^{12}$	$a_3^3$
	$s_6^1$	$c^4$	$c^4$	$a_3^{23}$	$a_3^{23}$	$a_5^2$	$a_5^2$	$a_3^{23}$	$a_3^{23}$	$a_4^{23}$	$a_4^{23}$	$a_3^{13}$	$a_3^3$	$a_4^{234}$	$a_4^{234}$	$a_3^{13}$	$a_3^3$
$s_2^3$	$s_1^1$	$a_1^3$	$a_1^3$	$a_3^{23}$	$a_3^{23}$	$a_5^{12}$	$a_5^{12}$	$a_3^2$	$a_3^{23}$	$a_4^{24}$	$a_4^{234}$	$a_3^1$	$a_3^3$	$a_4^{24}$	$a_4^{234}$	$a_3^1$	$a_3^3$
	$s_2^1$	$a_1^3$	$a_1^3$	$a_1^1$	$a_1^1$	$a_1^3$	$a_1^3$	$a_1^1$	$a_1^1$	$a_1^1$	$a_1^1$	$a_1^1$	$a_1^1$	$a_1^1$	$a_1^1$	$a_1^1$	$a_1^1$
	$s_3^1$	$a_1^3$	$a_1^3$	$a_1^1$	$a_3^{23}$	$a_5^{12}$	$a_5^{12}$	$a_5^{12}$	$a_3^{23}$	$a_4^{24}$	$a_4^{234}$	$a_4^{24}$	$a_3^3$	$a_4^{24}$	$a_4^{234}$	$a_4^{24}$	$a_3^3$
	$s_4^1$	$a_1^3$	$a_1^3$	$a_1^1$	$a_1^1$	$a_1^3$	$a_1^3$	$a_1^1$	$a_1^1$	$a_1^1$	$a_1^1$	$a_1^1$	$a_1^1$	$a_1^1$	$a_1^1$	$a_1^1$	$a_1^1$
	$s_5^1$	$a_1^3$	$a_1^3$	$a_1^1$	$a_3^{23}$	$a_5^{12}$	$a_5^{12}$	$a_5^{12}$	$a_3^{23}$	$a_1^1$	$a_4^{234}$	$a_1^1$	$a_3^{23}$	$a_5^{12}$	$a_4^{234}$	$a_5^{12}$	$a_3^{23}$
	$s_6^1$	$a_1^3$	$a_1^3$	$a_1^1$	$a_1^1$	$a_1^3$	$a_1^3$	$a_1^1$	$a_1^1$	$a_1^1$	$a_1^1$	$a_1^1$	$a_1^1$	$a_1^1$	$a_1^1$	$a_1^1$	$a_1^1$
$s_3^3$	$s_1^1$	$a_2^{23}$	$a_2^{23}$	$a_3^1$	$a_2^2$	$a_5^{12}$	$a_2^{23}$	$a_3^1$	$a_2^2$	$a_4^{124}$	$a_2^2$	$a_3^1$	$a_2^2$	$a_4^{124}$	$a_2^2$	$a_3^1$	$a_2^2$
	$s_2^1$	$a_2^3$	$a_2^3$	$a_2^3$	$a_2^3$	$a_2^3$	$a_2^3$	$a_2^3$	$a_2^3$	$a_2^3$	$a_2^3$	$a_2^3$	$a_2^3$	$a_2^3$	$a_2^3$	$a_2^3$	$a_2^3$
	$s_3^1$	$a_2^{23}$	$a_2^{23}$	$a_2^{23}$	$a_2^2$	$a_5^1$	$a_2^{23}$	$a_5^1$	$a_2^2$	$a_4^{14}$	$a_2^2$	$a_4^{14}$	$a_2^2$	$a_4^{14}$	$a_2^2$	$a_4^{14}$	$a_2^2$
	$s_4^1$	$a_2^3$	$a_2^3$	$a_2^3$	$a_2^3$	$a_2^3$	$a_2^3$	$a_2^3$	$a_2^3$	$a_2^3$	$a_2^3$	$a_2^3$	$a_2^3$	$a_2^3$	$a_2^3$	$a_2^3$	$a_2^3$
	$s_5^1$	$a_2^{23}$	$a_2^{23}$	$a_2^{23}$	$a_2^2$	$a_5^1$	$a_2^{23}$	$a_5^1$	$a_2^2$	$a_2^{23}$	$a_2^2$	$a_2^{23}$	$a_2^2$	$a_5^1$	$a_2^2$	$a_5^1$	$a_2^2$
	$s_6^1$	$a_2^3$	$a_2^3$	$a_2^3$	$a_2^3$	$a_2^3$	$a_2^3$	$a_2^3$	$a_2^3$	$a_2^3$	$a_2^3$	$a_2^3$	$a_2^3$	$a_2^3$	$a_2^3$	$a_2^3$	$a_2^3$
$s_4^3$	$s_1^1$	$a_1^3$	$a_2^{23}$	$a_3^2$	$a_2^2$	$a_5^{12}$	$a_2^{23}$	$a_3^2$	$a_2^2$	$a_4^{24}$	$a_2^2$	$a_3^1$	$a_2^2$	$a_4^{24}$	$a_2^2$	$a_3^1$	$a_2^2$
	$s_2^1$	$a_1^3$	$a_1^{13}$	$a_1^1$	$a_1^1$	$a_1^3$	$a_1^{13}$	$a_1^1$	$a_1^1$	$a_1^1$	$a_1^1$	$a_1^1$	$a_1^1$	$a_1^1$	$a_1^1$	$a_1^1$	$a_1^1$
	$s_3^1$	$a_1^3$	$a_2^{23}$	$a_1^1$	$a_2^2$	$a_5^{12}$	$a_2^{23}$	$a_5^{12}$	$a_2^2$	$a_4^4$	$a_2^2$	$a_4^4$	$a_2^2$	$a_4^4$	$a_2^2$	$a_4^4$	$a_2^2$
	$s_4^1$	$a_1^3$	$a_1^{13}$	$a_1^1$	$a_1^1$	$a_1^3$	$a_1^{13}$	$a_1^1$	$a_1^1$	$a_1^1$	$a_1^1$	$a_1^1$	$a_1^1$	$a_1^1$	$a_1^1$	$a_1^1$	$a_1^1$
	$s_5^1$	$a_1^3$	$a_2^{23}$	$a_1^1$	$a_2^2$	$a_5^{12}$	$a_2^{23}$	$a_5^{12}$	$a_2^2$	$a_1^1$	$a_2^2$	$a_1^1$	$a_2^2$	$a_5^{12}$	$a_2^2$	$a_5^{12}$	$a_2^2$
	$s_6^1$	$a_1^3$	$a_1^{13}$	$a_1^1$	$a_1^1$	$a_1^3$	$a_1^{13}$	$a_1^1$	$a_1^1$	$a_1^1$	$a_1^1$	$a_1^1$	$a_1^1$	$a_1^1$	$a_1^1$	$a_1^1$	$a_1^1$

Four players  $I = \{1, 2, 3, 4\}$  make decisions in eight non-terminal positions  $u_1, v_1; u_2, v_2, w_2; u_3, v_3$ , and  $u_4$ , respectively. The subscript is the number of the player who controls the corresponding position.

The initial position is  $u_1$ . There are five terminal positions  $a_j, j \in J = \{1, 2, 3, 4, 5\}$ .

There is a unique dicycle  $c$  and, thus, the set of outcomes is  $A = \{a_1, a_2, a_3, a_4, a_5; c\}$ .

The game has no NE whenever the preferences  $o_i$  of the players  $i \in I$  over the set of outcomes  $A$  agree with the following partial orders:

$$O_1 : a_2 \succ_{o_1} a_4 \succ_{o_1} a_3 \succ_{o_1} a_1 \succ_{o_1} a_5;$$

$$O_2 : \min_{o_2}(a_1, c) \succ_{o_2} a_3 \succ_{o_2} \max_{o_2}(a_4, a_5) \succ_{o_2} \min_{o_2}(a_4, a_5) \succ_{o_2} a_2;$$

$$O_3 : \min_{o_3}(a_5, c) \succ_{o_3} a_1 \succ_{o_3} a_2 \succ_{o_3} \max_{o_3}(a_3, a_4);$$

$$O_4 : \min_{o_4}(a_1, a_2, a_3, a_5) \succ_{o_4} a_4 \succ_{o_4} c.$$

The game form  $g: S \rightarrow A$ , in which  $S = S_1 \times S_2 \times S_3 \times S_4$  and  $A = \{a_1, a_2, a_3, a_4, a_5; c\}$ , is given by the four-dimensional table of size  $6 \times 8 \times 4 \times 2$ .

Player 1 has six strategies:

$$s_1^1: (u_1, u_2), (v_1, v_2), s_2^1: (u_1, u_3), (v_1, v_2),$$

$$s_3^1: (u_1, u_2), (v_1, u_4), s_4^1: (u_1, u_3), (v_1, u_4),$$

$$s_5^1: (u_1, u_2), (v_1, w_2), s_6^1: (u_1, u_3), (v_1, w_2);$$

player 2 has eight strategies:

$$s_1^2: (u_2, v_1), (v_2, u_4), (w_2, u_3), s_2^2: (u_2, v_3), (v_2, u_4), (w_2, u_3),$$

$$s_3^2: (u_2, v_1), (v_2, a_3), (w_2, u_3), s_4^2: (u_2, v_3), (v_2, a_3), (w_2, u_3),$$

$$s_5^2: (u_2, v_1), (v_2, u_4), (w_2, a_5), s_6^2: (u_2, v_3), (v_2, u_4), (w_2, a_5),$$

$$s_7^2: (u_2, v_1), (v_2, a_3), (w_2, a_5), s_8^2: (u_2, v_3), (v_2, a_3), (w_2, a_5);$$

player 3 has four strategies:

$$s_1^3: (u_3, v_3), (v_3, v_2), s_2^3: (u_3, a_1), (v_3, v_2),$$

$$s_3^3: (u_3, v_3), (v_3, a_2), s_4^3: (u_3, a_1), (v_3, a_2);$$

finally, player 4 has two strategies:  $s_1^4: (u_4, w_2), s_2^4: (u_4, a_4)$ ,

It is not difficult (although time consuming) to verify that the game has no NE for any preference profile specified above.

For every situation

$$s = (s_{i_1}^1, s_{i_2}^2, s_{i_3}^3, s_{i_4}^4) \in S_1 \times S_2 \times S_3 \times S_4$$

the outcome  $g(s)$ , which is either a terminal  $a_j$  or the dicycle  $c$ , is shown in the entry  $(l_1, l_2, l_3, l_4)$  of the table. The upper indices indicate the players who can improve the situation  $s$ . Thus, a situation  $s$  is a NE if and only if the corresponding outcome has no upper indices. Since the table contains no such situation, the considered game has no NE.

### 5. Two-person chess-like games are Nash-solvable

The proof can be found in [7] (and also in [9]; see the last section of each paper); yet, since the proof is very short, we will repeat it here for convenience of the reader. It is based on the following important property of the two-person game forms, which seems not to be extendable for  $n > 2$ .

A two-person game form  $g$  is called (i) *Nash-solvable*, (ii) *zero-sum-solvable*, and (iii)  $\pm 1$ -*solvable* if the corresponding game  $(g, u)$  has at least one NE (i) for every payoff  $u = (u_1, u_2)$ ; (ii) for every payoff  $u = (u_1, u_2)$  such that  $u_1(a) + u_2(a) = 0$  for each outcome  $a \in A$ ; (iii) for every payoff  $u = (u_1, u_2)$  such that  $u_1(a) + u_2(a) = 0$  for each outcome  $a \in A$  and both  $u_1$  and  $u_2$  take only values  $+1$  or  $-1$ .

In fact, all three above properties of a game form are equivalent. For (ii) and (iii) this was shown in 1970 by

Edmonds and Fulkerson [12] and independently in [19]. Then, the list was extended by statement (i) in [20]; see also [21], where it also was shown that a similar statement fails for the three-person game forms.

Thus, it is sufficient to prove  $\pm 1$ -solvability, rather than Nash-solvability, of the two-person chess-like games. Hence, we can assume that each outcome  $a \in A = V_T \cup \{c\}$  is either winning for player 1 and losing for player 2, or vice versa. Without any loss of generality, assume that  $c$  is winning for 1.

Then, let  $V_T = V_T^1 \cup V_T^2$  be the partition of all terminals into outcomes winning for players 1 and 2, respectively. Furthermore, let  $V^2 \subseteq V$  denote the set of all positions from which player 2 can enforce  $V_T^2$ ; in particular,  $V_T^2 \subseteq V^2$ . Finally, let us set  $V^1 = V \setminus V^2$ ; in particular,  $V_T^1 \subseteq V^1$ . By the above definitions, in every position  $v \in V_1 \cap V^1$  player 1 can stay out of  $V^2$ , that is, (s)he has a move  $(v, v')$  such that  $v' \in V^1$ . Let us fix a strategy  $s_0^1$  that chooses such a move in each position  $v \in V_1 \cap V^1$  and any move in  $v \in V_1 \cap V^2$ . Then, for any  $s^2 \in S_2$ , the outcome  $g(s_0^1, s^2)$  is winning for player 1 whenever the initial position  $v_0$  is in  $V^1$ . Indeed, either  $g(s_0^1, s^2) \in V_T^1$ , or  $g(s_0^1, s^2) = c$ ; in both cases player 1 wins. Thus, player 1 wins when  $v_0 \in V^1$  and player 2 wins when  $v_0 \in V^2$ ; in each case a saddle point exists.

## 6. Related results on Nash-solvability

In the next two subsections we recall two large families of games with perfect information that are known to be Nash-solvable in pure stationary uniformly optimal strategies.

### 6.1. Acyclic $n$ -person backgammon-like games with perfect information

In 1950 Nash introduced his concept of equilibrium for the normal form  $n$ -person games [35, 36]. Soon after, Kuhn [30, 31] and Gale [16] suggested the so-called backward induction procedure and proved that any finite acyclic chess-like game with perfect information has a NE in pure stationary strategies; moreover, the obtained NE is *subgame perfect*, that is, the same strategy profile is a NE with respect to any initial position. The authors restricted themselves to the chess-like games on finite arborescence (directed trees) but, in fact, backward induction can be easily extended to the backgammon-like games on the finite digraphs without dicycles. Yet, acyclicity is a crucial assumption and cannot be waved.

For any integer  $k \geq 2$  let us introduce a digraph  $G_k$  that consists of  $k$  terminals  $a_1, \dots, a_k$ , the directed

$k$ -cycle  $C_k$  on the  $k$  non-terminal vertices  $v_1, \dots, v_k$ , and the perfect matching  $(v_j, a_j)$ ,  $j = 1, \dots, k$  between these vertices and the terminals.

The existence of a subgame perfect NE fails already for  $k = 2$  [1]. Let players 1 and 2 control vertices  $v_1$  and  $v_2$  and have the preferences,  $(c > a_1 > a_2)$  and  $(a_1 > a_2 > c)$ , respectively. It is easy to verify that a NE exists for any given initial position,  $v_1$  or  $v_2$ , but no strategy profile is a NE with respect to both simultaneously. Let us notice that the preferences are not opposite (both players prefer  $a_1$  to  $a_2$ ), while  $c$  is the worst outcome for player 2 and the best one for 1.

A similar example exists even if in addition we require (C): the dicycle is worse than each terminal for both players. Consider digraph  $G_6$  in which players 1 and 2 control the odd and even positions  $(a_1, a_3, a_5$  and  $a_2, a_4, a_6)$  respectively. It was shown in [3] that there exists no subgame perfect NE whenever

$$\begin{aligned} O_1: a_6 >_{o_1} a_5 >_{o_1} a_2 >_{o_1} a_1 >_{o_1} a_3 >_{o_1} a_4 >_{o_1} c; \\ O_2: \{a_3 >_{o_2} a_2 >_{o_2} a_6 >_{o_2} a_4 >_{o_2} a_5 >_{o_2} c \\ \text{and } a_6 >_{o_2} a_1 >_{o_2} c\}. \end{aligned}$$

Let us note that there exists no such example for  $G_4$ . Yet, for a three-person game, the following similar example was constructed in [37] and [7], independently; see also [14] and [3].

The players 1, 2, 3 control, respectively, the positions  $v_1, v_2, v_3$  of  $G_3$  and have the preferences:

$$\begin{aligned} O_1: a_2 >_{o_1} a_1 >_{o_1} a_3 >_{o_1} c; \\ O_2: a_3 >_{o_2} a_2 >_{o_2} a_1 >_{o_2} c; \\ O_3: a_1 >_{o_3} a_3 >_{o_3} a_2 >_{o_3} c. \end{aligned}$$

In other words, for all players:  $c$  is the worst outcome, in accordance with (C), it is better if the previous player terminates the play, still better to terminate himself, and it is the best if the next player terminates.

In [6], these results were strengthened as follows. It was demonstrated that a subgame perfect NE may fail to exist not only in the pure but even in the mixed strategies. The corresponding examples are based on the same positional game forms,  $G_6$  for  $n = 2$  and  $G_3$  for  $n = 3$ , but the above preference profiles are replaced by some carefully chosen payoffs, which agree with the corresponding preferences.

The above examples imply that, for any  $n \geq 2$ , an  $n$ -person *backgammon-like* game, even with a fixed initial position, may have no NE. Given a chess-like game  $(G = (V, E), D, o)$ , in which no initial position is fixed yet, add to it a new position  $v_0$  and the move  $(v_0, v)$  from  $v_0$  to each non-terminal position  $v \in V \setminus V_T$ . Furthermore, assign to  $(v_0, v)$  a non-negative probability  $p_v \geq 0$  such

that  $\sum_{v \in V} p_v = 1$ . Denote by  $(G', D, o, v_0)$  the obtained backgammon-like game form, in which  $v_0$  is the initial position; see Fig. 1 in [3]. It was shown in [3] that

- ◆ (i) if  $s$  is a subgame perfect NE in  $(G, D, o)$  then  $s$  is a NE in  $(G', D, o, v_0)$  for any  $p_v$ ;
- ◆ (ii) if  $s$  is a NE in  $(G', D, o, v_0)$  and  $p_v > 0 \forall v \in V \setminus V_T$ , then  $s$  is a subgame perfect NE in  $(G, D, o)$ .

These results imply that Nash-solvability of  $(G', D, v_0)$  is equivalent with subgame perfect Nash-solvability of  $(G, D)$ . As we know, the latter property may fail for  $G = G_k$  for any  $n \geq 2$ . Thus, for any  $n \geq 2$ , an  $n$ -person backgammon-like game  $(G'_k, D, v_0, o)$ , in which  $v_0$  is a unique position of chance, may have no NE.

### 6.2. Two-person zero-sum games with perfect information

According to the previous subsection, in the presence of dicycles, backward induction fails, in general. Yet, it can be modified (and thus saved) in case of the two-person zero-sum games (that is, when  $I = \{1, 2\}$  and  $u(1, a) + u(2, a) = 0$  for any outcome  $a \in A$ , or when two preferences  $o_1$  and  $o_2$  of the players 1 and 2 over  $A$  are opposite).

For example, the recent paper [18] shows how to solve by backward induction a two-person zero-sum game that is «acyclic», but the players can pass; in other words, the corresponding digraph contains a loop at each vertex, but no other dicycles.

A general linear time algorithm solving any two-person zero-sum chess-like game, by a modified backward induction, was suggested in [2] and independently in [3]. In contrast, no polynomial algorithm is known for the two-person zero-sum backgammon-like games [11]. However, it is well-known that subgame perfect saddle points in stationary strategies exist in this case and even in much more general cases considered below.

In fact, studying two-person zero-sum chess-like games began long before the backward induction was suggested in early fifties by [30, 31, 16]. Zermelo gave his seminal talk on solvability of chess in pure strategies [40] as early as in 1912. Later, König [29] and Kalman [28] strengthen this result showing that there exist pure stationary uniformly optimal strategies producing a subgame perfect saddle point, in any two-person zero-sum chess-like game.

The chess-like and backgammon-like games, considered in this note, by the definition, are «transition free». There is a much more general class: *stochastic games with perfect information* in which a *transition payoff*  $r_i(u, v)$  is defined for every move  $(u, v)$  and for each play-

er  $i \in I$ . Gillette, in his seminal paper [17], introduced the *mean (or average)* effective payoff for these games and proved the existence of subgame perfect saddle point in the uniformly optimal stationary strategies for the two-person zero-sum case. The proof is pretty complicated. It is based on the Tauberian theory and, in particular, on the Hardy-Littlewood theorem [27]. (In [17], the conditions of this theorem were not accurately verified and the flaw was corrected in twelve years by Liggett and Lippman in [32].)

Stochastic games with perfect information can be viewed as *backgammon-like* games with transition payoffs. More precisely, these two classes are polynomially equivalent [4]. Interestingly, the corresponding two-person zero-sum *chess-like* games (with transition payoffs but without random moves) so-called *cyclic mean-payoff games*, appeared only 20-30 years later, introduced for the complete bipartite digraphs by Moulin [33, 34], for any bipartite digraphs by Ehrenfeucht and Mycielski [13], and for arbitrary digraphs by Gurvich, Karzanov, and Khachiyan [25]. Again, the existence of a saddle point in the pure stationary uniformly optimal strategies was proven for the two-person zero-sum case.

This result cannot be extended to the non-zero-sum case. In [22], a cyclic mean payoff two-person NE-free game was constructed on the complete bipartite  $3 \times 3$  digraph with symmetric payoffs. (The corresponding normal form game is a  $27 \times 27$  bimatrix.) It was shown in [23] that this example is, in a sense, minimal, namely,

a NE always exists for the games on the complete  $(2 \times l)$  bipartite digraphs.

A general family of the so-called *k-total effective payoffs* was recently introduced in [5] for any nonnegative integer  $k$  such that the 0-total one is the mean effective payoff, while the 1-total one is the total effective payoff introduced earlier by Thuijsman and Vrieze in [38, 39]. The existence of a saddle point in uniformly optimal pure stationary strategies for the two-person zero-sum chess-like games with the  $k$ -total effective payoff was proven for all  $k$  in [5]. If this result can be extended to the backgammon-like games is an open problem. Yet, for  $k \leq 1$  the answer is positive. As was already mentioned, for  $k = 0$  it was proven long ago. For  $k = 1$  the result was first obtained in [38, 39], see also [5].

However, it cannot be extended to the non-zero-sum case. In particular, a NE (in pure stationary strategies) may fail to exist already in a two-person chess-like game. For  $k = 0$  the example was given in [22]. Furthermore, in [5], a simple embedding of the  $(k-1)$ -total payoff games into the  $k$ -total ones was constructed. Thus, the example of [22] works for all  $k$ .

**Acknowledgements:** The main example was constructed by a computing code written by Vladimir Oudalov.

The author is also thankful to Konrad Borys, Khaled Elbassioni, and Gabor Rudolf who tried to get such an example at RUTCOR in 2000-2004, to Endre Boros for helpful discussions, and to the anonymous reviewer for many improvements. ■

## References

1. Andersson D., Gurvich V., and Hansen T. (2010) On acyclicity of games with cycles. *Discrete Applied Mathematics*, vol. 158, no 10, pp. 1049-1063.
2. Andersson D., Hansen K.A., Miltersen P.B., Sorensen T.B. (2008) *Deterministic graphical games, revisited*. Paper presented at «Computability in Europe», 15–20 June, 2008, Athens, Greece.
3. Boros E., Elbassioni K., Gurvich V., Makino K. (2012) On Nash equilibria and improvement cycles in pure positional strategies for Chess-like and Backgammon-like  $n$ -person games. *Discrete Mathematics*, vol. 312, no 4, pp. 772-788.
4. Boros E., Elbassioni K., Gurvich V., Makino K. (2013) On canonical forms for zero-sum stochastic mean payoff games. *Dynamic Games and Applications*, vol. 3, pp. 128-161.
5. Boros E., Elbassioni K., Gurvich V., Makino K. (2014) *Nested family of cyclic games with k-total effective rewards*. Working paper RRR/06/2014, Piscataway: RUTCOR.
6. Boros E., Gurvich V., Yamangil E. (2013) Chess-like games may have no uniform Nash equilibria even in mixed strategies. *Hindawi* (electronic journal) vol. 2013, Game Theory, pp. 1–10. Available at: <http://www.hindawi.com/journals/gt/2013/534875/> (accessed 22 April 2013).
7. Boros E., Gurvich V. (2003) On Nash-solvability in pure strategies of finite games with perfect information which may have cycles. *Mathematical Social Sciences*, vol. 46, pp. 207-241.
8. Boros E., Gurvich V. (2009) *Why Chess and Backgammon can be solved in pure positional uniformly optimal strategies*. Working paper RRR/21/2009, Piscataway: RUTCOR.
9. Boros E., Gurvich V., Makino K., Wei S. (2011) Nash-solvable two-person symmetric cycle game forms. *Discrete Applied Mathematics*, vol. 159, pp. 1461-1487.
10. Boros E., Rand R. (2009) *Terminal games with three terminals have proper Nash equilibria in pure positional strategies*. Working paper RRR/22/2009, Piscataway: RUTCOR.

11. Condon A. (1992) The complexity of stochastic games. *Information and Computation*, vol. 96, pp. 203-224.
12. Edmonds J., Fulkerson D.R. (1970) Bottleneck extrema. *Journal of Combinatorial Theory*, vol. 8, pp. 299-306.
13. Ehrenfeucht A., Mycielski J. (1979) Positional strategies for mean payoff games. *International Journal of Game Theory*, vol. 8, pp. 109-113.
14. Kuipers J., Flesch J., Shoenmakers J.G., Vrieze O.J. (2009) Pure subgame-perfect equilibria in free transition games. *European Journal of Operational Research*, vol. 199, pp. 442-447.
15. Flesch J., Kuipers J., Shoenmakers G., Vrieze O.J. (2010) Subgame perfection in positive recursive games with perfect information. *Mathematics of Operations Research*, vol. 35, no 1, pp. 742-755.
16. Gale D. (1953) A theory of N-person games with perfect information. *Proceedings of National Academy of Sciences of the USA*, vol. 39, pp. 496-501.
17. Gillette D. (1957) Stochastic games with zero stop probabilities. *Annals of Mathematics Studies*, vol. 39, pp. 179-187.
18. Gol'berg A., Gurvich V., Andrade D., Borys K., Rudolf G. (2014) Combinatorial games modeling seki in GO. *Discrete Mathematics*, vol. 329, pp. 1-32.
19. Gurvich V. (1973) To theory of multi-step games. *USSR Computational Mathematics and Mathematical Physics*, vol. 13, no 6, pp. 143-161.
20. Gurvich V. (1975) Solution of positional games in pure strategies. *USSR Computational Mathematics and Mathematical Physics*, vol. 15, no 2, pp. 74-87.
21. Gurvich V. (1989) Equilibrium in pure strategies. *Soviet Mathematics - Doklady*, vol. 38, no 3, pp. 597-602.
22. Gurvich V. (1988) A stochastic game with complete information and without equilibrium situations in pure stationary strategies. *Russian Mathematical Surveys*, vol. 43, no 2, pp. 171-172.
23. Gurvich V. (1990) A theorem on the existence of equilibrium situations in pure stationary strategies for ergodic extensions of  $(2 \times k)$  bimatrix games. *Russian Mathematical Surveys*, vol. 45, no 4, pp. 170-172.
24. Gurvich V. (1990) Saddle point in pure strategies. *Russian Academy of Sciences, Doklady Mathematics*, vol. 42, no 2, pp. 497-501.
25. Gurvich V., Karzanov A., Khachiyan L. (1988) Cyclic games and an algorithm to find minimax cycle means in directed graphs, *USSR Computational Mathematics and Mathematical Physics*, vol. 28, no 5, pp. 85-91.
26. Gurvich V., Oudalov V. (2014) On Nash-solvability in pure stationary strategies of the deterministic n-person games with perfect information and mean or total effective cost. *Discrete Applied Mathematics*, vol. 167, pp. 131-143.
27. Hardy G. H., Littlewood J. E. (1931) Notes on the theory of series (XVI): two Tauberian theorems. *Journal of London Mathematical Society*, vol. 6, pp. 281-286.
28. Kalmar L. (1928-1929) Zur Theorie der abstrakten Spiele. *Acta Scientiarum Mathematicarum, Szeged*, vol. 4, pp. 65-85.
29. König D. (1927) Über eine Schlussweise aus dem Endlichen ins Unendliche. *Acta Scientiarum Mathematicarum, Szeged*, vol. 3, pp. 121-130.
30. Kuhn H. (1953) Extensive games. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, vol. 36, pp. 286-295.
31. Kuhn H. (1953) Extensive games and the problem of information. *Contributions to the theory of games*, vol. 2, pp. 193-216.
32. Lippman S.A. (1969) Stochastic games with perfect information and timeaverage payoff. *Society for Industrial and Applied Mathematics (SIAM) Review*, vol. 11, pp. 604-607.
33. Moulin H. (1976) *Prolongement des jeux a deux joueurs de somme nulle (PhD Thesis)*, Paris, University of Paris 1. Published in Bulletin de la Societe Mathematique de France, Supplementaire Memoire No.45.
34. Moulin H. (1976) Extension of two-person zero-sum games, *Journal of Mathematical Analysis and Applications*, vol. 55, no 2, pp. 490-508.
35. Nash J. (1950) Equilibrium points in n-person games. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, vol. 36, no 1, pp. 48-49.
36. Nash J. (1951) Non-cooperative games. *Annals of Mathematics*, vol. 54, no 2, pp. 286-295.
37. Solan E., Vieille N. (2003) Deterministic multi-player Dynkin games. *Journal of Mathematical Economics*, vol. 39, pp. 911-929.
38. Thuijsman F., Vrieze O.J. (1987) The bad match, a total reward stochastic game. *Operations Research Spektrum*, vol. 9, pp. 93-99.
39. Thuijsman F., Vrieze O.J. (1998) Total reward stochastic games and sensitive average reward strategies. *Journal of Optimization Theory and Applications*, vol. 98, pp. 175-196.
40. Zermelo E. (1913) Über eine Anwendung der Mengenlehre auf die Theorie des Schachspiels. *Proceedings of the 5th International Congress of Mathematicians, 1912, Cambridge England*, vol. 2, pp. 501-504.

## ИГРА ЧЕТЫРЕХ ЛИЦ С ПОЛНОЙ ИНФОРМАЦИЕЙ И БЕЗ СЛУЧАЙНЫХ ХОДОВ, НЕ ИМЕЮЩАЯ СИТУАЦИЙ РАВНОВЕСИЯ НЭША В ЧИСТЫХ СТАЦИОНАРНЫХ СТРАТЕГИЯХ

**В.А. ГУРВИЧ**

Профессор прикладной математики и информатики, Центр исследования операций,  
Ратгерс, Университет Штата Нью-Джерси, США

Адрес: 100, Rockefeller Road, Piscataway, NJ, 08854, USA

E-mail: gurvich@rutcor.rutgers.edu, vladimir.gurvich@gmail.com

В статье рассматривается пример конечной позиционной игры с полной информацией и без случайных ходов (так называемая игра шахматного типа), которая не имеет равновесий Нэша в чистых стационарных стратегиях. В этом примере число игроков  $n$  равно 4, число терминальных позиций  $p$  равно 5; при этом граф игры имеет всего один ориентированный цикл.

С другой стороны, известно, что игра шахматного типа имеет равновесие Нэша в чистых стационарных стратегиях, если выполнено хотя бы одно из следующих трех условий: либо (A)  $n \leq 2$ ; либо (B)  $p \leq 3$  и (C) любой игрок предпочитает любую терминальную позицию любой бесконечной партии; либо (D) каждый из  $n$  игроков контролирует всего одну позицию; либо (E) граф не имеет ориентированных циклов.

Остается открытым вопрос, существует ли игра шахматного типа, имеющая хотя бы один ориентированный цикл и не имеющая равновесий Нэша в следующих четырех случаях: (A')  $n = 3$ ; (B')  $2 \leq p \leq 4$ ; (C')  $n > 2$ ,  $p > 3$  и условие (C) выполняется; (D') каждый из  $n$  игроков контролирует не более двух позиций.

В нашем примере  $n = 4$ ,  $p = 5$ , условие (C) не выполнено и один из игроков контролирует три позиции.

**Ключевые слова:** позиционная игра, стохастическая игра, игра шахматного типа, полная информация, случайный ход, равновесие Нэша, терминал, ориентированный цикл.

**Цитирование:** Gurvich V.A. A four-person chess-like game without Nash equilibria in pure stationary strategies // *Business Informatics*. 2015. No. 1 (31). P. 31–40.

### Литература

- Andersson D., Gurvich V., Hansen T. On acyclicity of games with cycles // *Discrete Applied Mathematics*. 2010. Vol. 158, No. 10. P. 1049–1063.
- Andersson D., Hansen K.A., Miltersen P.B., Sorensen T.B. Deterministic graphical games, revisited // Paper presented at «Computability in Europe», 15–20 June 2008, Athens, Greece. P. 15–20.
- Boros E., Elbassioni K., Gurvich V., Makino K. On Nash equilibria and improvement cycles in pure positional strategies for Chess-like and Backgammon-like  $n$ -person games // *Discrete Mathematics*. 2012. Vol. 312, No. 4. P. 772–788.
- Boros E., Elbassioni K., Gurvich V., Makino K. On canonical forms for zero-sum stochastic mean payoff games // *Dynamic Games and Applications*. 2013. Vol. 3. P. 128–161.
- Boros E., Elbassioni K., Gurvich V., Makino K. Nested family of cyclic games with  $k$ -total effective rewards // Working paper RRR/06/2014. Piscataway: RUTCOR, 2014.
- Boros E., Gurvich V., Yamangil E. Chess-like games may have no uniform Nash equilibria even in mixed strategies // *Hindawi (electronic journal)*. 2013. Vol. 2013, Game Theory. P. 1–10. [Электронный ресурс]: <http://www.hindawi.com/journals/gt/2013/534875/> (дата обращения 22.04.2013).
- Boros E., Gurvich V. On Nash-solvability in pure strategies of finite games with perfect information which may have cycles // *Mathematical Social Sciences*. 2003. Vol. 46. P. 207–241.
- Boros E., Gurvich V. Why Chess and Backgammon can be solved in pure positional uniformly optimal strategies // Working paper RRR/21/2009. Piscataway: RUTCOR, 2009.
- Boros E., Gurvich V., Makino K., Wey S. Nash-solvable two-person symmetric cycle game forms // *Discrete Applied Mathematics*. 2007. Vol. 159. P. 1461–1487.
- Boros E., Rand R. Terminal games with three terminals have proper Nash equilibria in pure positional strategies // Working paper RRR/22/2009. Piscataway: RUTCOR, 2009.
- Condon A. The complexity of stochastic games // *Information and Computation*. 1992. Vol. 96. P. 203–224.
- Edmonds J., Fulkerson D.R. Bottleneck extrema // *Journal of Combinatorial Theory*. 1970. Vol. 8. P. 299–306.
- Ehrenfeucht A., Mycielski J. Positional strategies for mean payoff games // *International Journal of Game Theory*. 1979. Vol. 8. P. 109–113.

14. Kuipers J., Flesch J., Shoenmakers J.G., Vrieze O.J. Pure subgame-perfect equilibria in free transition games // *European Journal of Operational Research*. 2009. Vol. 199. P. 442–447.
15. Flesch J., Kuipers J., Shoenmakers G., Vrieze O.J. Subgame perfection in positive recursive games with perfect information // *Mathematics of Operations Research*. 2010. Vol. 35, No. 1. P. 742–755.
16. Gale D. A theory of N-person games with perfect information // *Proceedings of National Academy of Sciences of the USA*. 1953. Vol. 39. P. 496–501.
17. Gillette D. Stochastic games with zero stop probabilities // *Annals of Mathematics Studies*. 1957. Vol. 39. P.179–187.
18. Gol'berg A., Gurvich V., Andrade D., Borys K., Rudolf G. Combinatorial games modeling seki in GO // *Discrete Mathematics*. 2014. Vol. 329. P. 1–32.
19. Gurvich V. To theory of multi-step games // *USSR Computational Mathematics and Mathematical Physics*. 1973. Vol. 13, No. 6. P. 143–161.
20. Gurvich V. Solution of positional games in pure strategies // *USSR Computational Mathematics and Mathematical Physics*. 1975. Vol. 15, No. 2. P. 74–87.
21. Gurvich V. Equilibrium in pure strategies // *Soviet Mathematics – Doklady*. 1989. Vol. 38, No. 3. P. 597–602.
22. Gurvich V. A stochastic game with complete information and without equilibrium situations in pure stationary strategies // *Russian Mathematical Surveys*. 1988. Vol. 43, No. 2. P. 171–172.
23. Gurvich V. A theorem on the existence of equilibrium situations in pure stationary strategies for ergodic extensions of  $(2 \times k)$  bimatrix games // *Russian Mathematical Surveys*. 1990. Vol.45, No. 4. P. 170–172.
24. Gurvich V. Saddle point in pure strategies // *Russian Academy of Sciences – Doklady Mathematics*. 1990. Vol. 42, No. 2. P. 497–501.
25. Gurvich V., Karzanov A., Khachiyan L. Cyclic games and an algorithm to find minimax cycle means in directed graphs // *USSR Computational Mathematics and Mathematical Physics*. 1988. Vol. 28, No. 5. P. 85–91.
26. Gurvich V., Oudalov V. On Nash-solvability in pure stationary strategies of the deterministic n-person games with perfect information and mean or total effective cost // *Discrete Applied Mathematics*. 2014. Vol. 167. P. 131–143.
27. Hardy G.H., Littlewood J.E. Notes on the theory of series (XVI): two Tauberian theorems // *Journal of London Mathematical Society*. 1931. Vol. 6. P. 281–286.
28. Kalmar L. Zur Theorie der abstrakten Spiele // *Acta Scientiarum Mathematicarum, Szeged*. 1928–1929. Vol. 4. P. 65–85.
29. König D. Über eine Schlussweise aus dem Endlichen ins Unendliche // *Acta Scientiarum Mathematicarum, Szeged*. 1927. Vol. 3. P. 121–130.
30. Kuhn H. Extensive games // *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*. 1950. Vol. 36. P. 286–295.
31. Kuhn H. Extensive games and the problem of information // *Contributions to the Theory of Games*. 1953. Vol. 2. P. 193–216.
32. Liggett T.M., Lippman S.A. Stochastic games with perfect information and timeaverage payoff // *Society for Industrial and Applied Mathematics (SIAM) Review*. 1969. Vol. 11. P. 604–607.
33. Moulin H. Prolongement des jeux a deux joueurs de somme nulle (PhD Thesis). Paris, University of Paris 1 // Published in *Bulletin de la Societe Mathematique de France, Supplémentaire Memoire*. No. 45. 1976.
34. Moulin H. Extension of two-person zero-sum games // *Journal of Mathematical Analysis and Applications*. 1976. Vol. 55, No. 2. P. 490–508.
35. Nash J. Equilibrium points in n-person games // *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*. 1950. Vol. 36, No. 1. P. 48–49.
36. Nash J. Non-cooperative games // *Annals of Mathematics*. 1951. Vol. 54, No. 2. P. 286–295.
37. Solan E., Vieille N. Deterministic multi-player Dynkin games // *Journal of Mathematical Economics*. 2003. Vol. 39. P. 911–929.
38. Thuijsman F., Vrieze O.J. The bad match, a total reward stochastic game // *Operations Research Spektrum*. 1987. Vol. 9. P. 93–99.
39. Thuijsman F., Vrieze O.J. Total reward stochastic games and sensitive average reward strategies // *Journal of Optimization Theory and Applications*. 1998. Vol. 98. P. 175–196.
40. Zermelo E. Über eine anwendung der mengenlehre auf die theorie des schachspiels // *Proceedings of the 5th International Congress of Mathematicians, 1912, Cambridge, England*. 1913. Vol. 2. P. 501–504.



# ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ СКЛАДА ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ ПО ПРОИЗВОДСТВУ БЕТОНА

**О.И. БАБИНА**

старший преподаватель кафедры экономики и управления бизнес-процессами,  
Институт управления бизнес-процессами и экономики,  
Сибирский федеральный университет

Адрес: 660074, г. Красноярск, ул. Киренского, д. 26а

E-mail: babina62@yahoo.com

Имитационное моделирование является современным инструментом для решения задач планирования и управления работы складской системы. Суть имитационного моделирования заключается в разработке компьютерной программы и проведения на ней серии экспериментов, позволяющих определять оптимальные сценарии работы склада. В последние десять лет на Западе получила развитие и применение так называемая концепция оптимизации имитационного моделирования (*simulation optimization*), на базе которой разработаны пакеты оптимизации, интегрированные в системы имитационного моделирования и позволяющие пользователям автоматически находить оптимальные решения. В связи с этим стали появляться так называемые оптимизационные имитационные модели. Оптимизационную имитационную модель можно определить как процесс нахождения наилучшего набора входных переменных модели без участия пользователя в оценке каждого варианта решения. Основной целью построения оптимизационной имитационной модели является получение максимума информации о работе моделируемой системы, что является предпосылкой для успешного решения задач минимизации используемых на складе ресурсов.

В статье рассмотрен практический пример построения оптимизационной и имитационной моделей склада промышленного предприятия по производству бетона. Моделируются процессы функционирования складской системы в программной среде *ExtendSim* и оптимизируется прибыль предприятия с использованием эволюционного алгоритма. Модель оптимизации выполнена с помощью блока *Optimizer*, интегрированного в *ExtendSim*. Целью моделирования является исследование влияния параметров стратегий управления запасами на показатели работы склада, а также максимизация прибыли предприятия от продажи продукции. В работе приводится описание процесса построения модели и полученных результатов моделирования. Имитационная оптимизационная модель в планировании деятельности склада позволяет повысить точность учета материалов и складских операций, сократить уровень складских запасов, уменьшить затраты на хранение материалов, увеличить производительность труда на складе, а также анализировать количественные показатели работы склада.

**Ключевые слова:** промышленное предприятие, склад, имитационное моделирование, дискретно-событийное моделирование, оптимизация, эволюционный алгоритм, пакет *ExtendSim*.

**Цитирование:** Бабина О.И. Имитационная модель склада промышленного предприятия по производству бетона // Бизнес-информатика. 2015. № 1 (31). С. 41–50.

## 1. Введение

В настоящее время имитационное моделирование является общепризнанным методом исследования сложных динамических систем. Оно широко применяется в различных областях науки, бизнеса и производства. Весьма часто имитационные модели создаются при проектиро-

вании новых или реконструкции существующих производственных и логистических систем.

Одной из важнейших функций производственных и логистических систем является управление запасами, которое предусматривает нахождение оптимального уровня запаса при минимизации совокупных затрат на создание и поддержание запаса-

са [1]. Последствия неоптимальных запасов могут быть значительными. Например, избыток товара приводит к увеличению расходов на хранение и к «замораживанию» капитала предприятия. Недостаток товара, в свою очередь, приводит к уменьшению продаж, снижению уровня сервиса, снижению степени удовлетворенности клиентов, снижению прибыли предприятия. Все эти факторы негативно сказываются на выполнении большинства операций складской системы предприятия.

В данной статье рассмотрен пример построения оптимизационной имитационной модели складской системы, направленной на оптимизацию прибыли предприятия от продажи продукции. Приводится описание как имитационной оптимизационной модели склада промышленного предприятия по производству бетона, так и результатов, полученных путем проведения экспериментов с этой моделью. Имитационная модель реализована в системе имитационного моделирования ExtendSim, а модель оптимизации выполнена с помощью блока Optimizer, интегрированного в ExtendSim.

## 2. Постановка задачи моделирования

На рассматриваемом предприятии было принято решение о необходимости проведения исследования, направленного на ликвидацию неоптимальных материальных запасов, уменьшение общих складских расходов, а также сокращение очередей в пунктах обработки материальных потоков на складе. Поставленную задачу возможно решить с помощью метода имитационного моделирования и оптимизации. Процесс, отображаемый в разрабатываемой оптимизационной имитационной модели, должен удовлетворять следующим двум условиям: запасов должно хватать для обеспечения непрерывного производственного процесса, а раз-

мер запасов должен быть минимальным для снижения расходов на хранение.

Цель моделирования состоит в исследовании влияния параметров стратегий управления запасами на показатели работы склада, а также максимизации прибыли предприятия от продажи продукции. Основные задачи моделирования:

- ◆ минимизировать запасы сырья и готовой продукции на складе;
- ◆ сократить дефицит, связанный с недостатком в отдельные моменты времени того или иного вида сырья;
- ◆ сократить расходы на формирование и содержание запасов на складе;
- ◆ сократить очереди в пунктах обработки материального потока на складе;
- ◆ прогнозировать месячный спрос на складе по каждой позиции на сырьевые материалы;
- ◆ подготовить ежемесячные рекомендации по корректировке планов закупки на сырьевые материалы;
- ◆ максимизировать прибыль предприятия от продажи готовой продукции.

## 3. Концептуальная модель склада

Графически структуру склада промышленного предприятия по производству бетона можно представить с помощью топологической схемы (рис. 1), состоящей из множества логистических территорий, называемых зонами: «Зона приемки», «Зона разгрузки транспортного средства», «Зона хранения», «Зона комплектации» и «Зона отгрузки материала и готовой продукции».

В качестве формы существования материального потока складской системы обычно рассматривают запасы. Основу процесса обработки материального потока на складе составляет технологический процесс, то есть комплекс последовательно выпол-



Рис. 1. Графическая модель склада

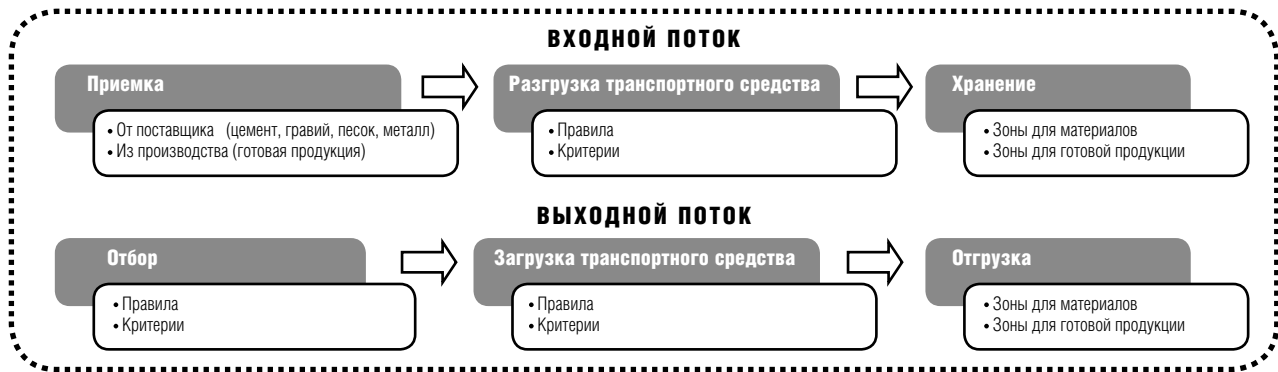


Рис. 2. Технологические процессы склада

няемых операций, связанных с приемкой сырья, разгрузкой транспортного средства, хранением, отбором, загрузкой транспортного средства и отгрузкой материала со склада [1]. От того, насколько эффективно будут выполняться эти операции, зависит также уровень логистического сервиса, предоставляемого клиентам, а, следовательно, и уровень конкурентоспособности предприятия на рынке строительных материалов. Порядок выполнения операций технологического процесса на складе показан на рис. 2.

*Описание входного потока на складе*

Основные сырьевые материалы (цемент, гравий, песок и металл) для производства бетона поступают на склад. Спрос на них задается ежедневно. Вначале проверяется условие, может ли этот спрос быть удовлетворен. Если запас позволяет обслужить спрос, то

величина запаса уменьшается на величину спроса. После этого проверяется условие, не достигнут ли пороговый уровень запаса. Если пороговый уровень достигнут, то формируется новый заказ в размере заданной величины. Если спрос на сырье превышает запас, то записываются данные о дефиците и формируется заказ на сырье в размере заданной величины.

Концептуальная модель склада представлена на рис. 3, где  $Q_i$  – очереди в пунктах обработки материального потока,  $S_j$  – пункты обработки материального потока,  $V_k$  – зоны хранения материалов и готовой продукции. На складе сырье проходит следующие основные технологические операции: приемка материала кладовщиком ( $S_1$ ), транспортировка материалов к месту разгрузки ( $S_2, S_3, S_4, S_5$ ), разгрузка сырья ( $S_6, S_7, S_8, S_9, S_{10}, S_{11}$ ), хранение ( $V_1, V_2, V_3, V_4$ ), отгрузка материала со склада в производство ( $S_{12}, S_{13}, S_{14}, S_{15}$ ).

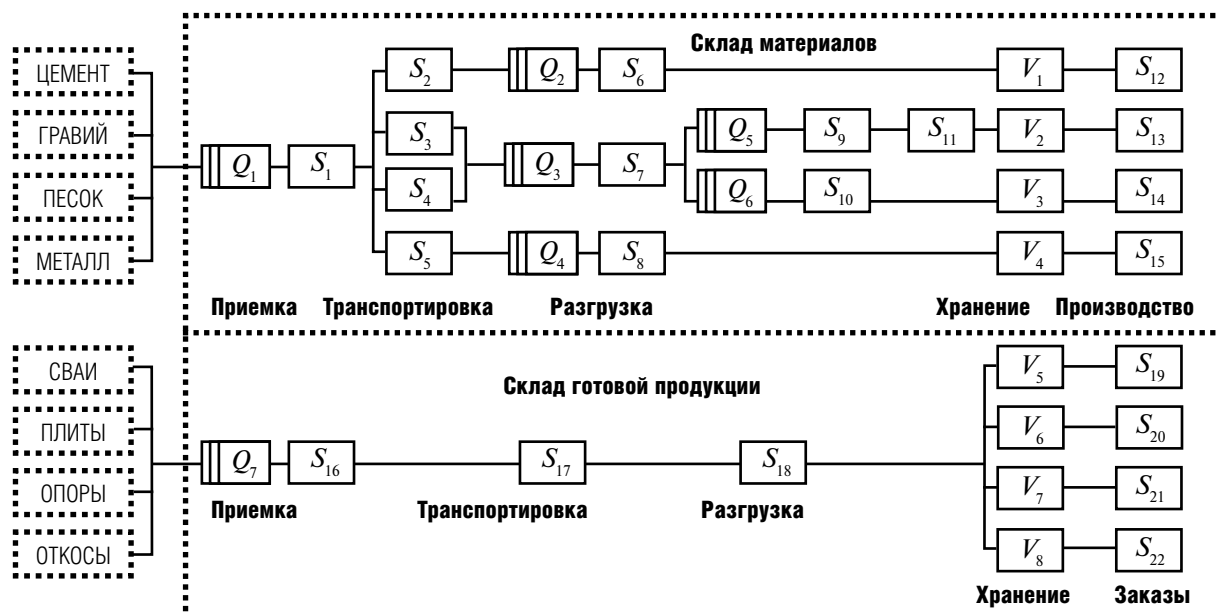


Рис. 3. Алгоритм работы имитационной модели склада

Разгрузка основных сырьевых материалов происходит по-разному: разгрузка цемента происходит при помощи вакуумного насоса ( $S_6$ ); разгрузка гравия осуществляется сначала при помощи бульдозера ( $S_7$ ), который загружает сырье в специальную емкость, где происходит его разрыхление ( $S_9$ ), после чего с помощью ленточного конвейера ( $S_{11}$ ), гравий отправляется на производство и/или на склад хранения; разгрузка песка ( $S_{10}$ ) – ленточный конвейер для песка) аналогична разгрузке гравия, за исключением работы буроразрыхлительной машины; металл, поступающий на склад в пучках или бухтах, разгружается при помощи крана и бригады рабочих ( $S_8$ ). Склад цемента ( $V_1$ ) состоит из металлической емкости, называемой силосной бочкой, с вместимостью 500 т. Склад инертных материалов (гравия и песка –  $V_2, V_3$ ) бетонного завода состоит из отдельных цистерн объемом по 300 т каждая. Вместимость склада металла ( $V_4$ ) составляет 200 т, а готовой продукции ( $V_5, V_6, V_7, V_8$ ) – 600 т.

*Описание выходного потока на складе*

Гравий ( $S_{13}$ ) и песок ( $S_{14}$ ) из склада инертных материалов поступают по ленточному транспортеру в бункерное отделение бетоносмесительного цеха. Цемент ( $S_{12}$ ) с помощью вакуумного насоса подается в бетоносмесительный цех. Металл ( $S_{15}$ ) загружается в транспортное средство и направляется в арматурный цех для производства каркасных изделий. Из арматурного цеха готовые каркасные изделия поступают в формовочный цех, где происходит изготовление продукции из готовой бетонной смеси. Бетонная смесь производится на базе четырех основных компонентов с учетом норм, замешиваемых в определенной пропорции: цемента, гравия, песка и воды. Соотношение компонентов в бетонной смеси по весу примерно такое: цемент – 1

часть, гравий – 4 части, песок – 2 части и вода. Произведенная продукция (опоры, откосы, сваи, плиты) после окончания цикла производства поступает на склад промежуточного хранения, а затем уже доставляется на склад хранения готовой продукции ( $V_5, V_6, V_7, V_8$ ) предварительно пройдя пункт приемки ( $S_{16}$ ) транспортировку к месту разгрузки ( $S_{17}$ ) и разгрузку транспортного средства ( $S_{14}$ ).

Имитационную модель можно представить в виде «черного ящика» (рис. 4), в котором множество входных данных преобразуется во множество выходных показателей функционирования моделируемой системы [2].

**4. Предположения в имитационной модели**

В имитационной модели делаются следующие предположения:

- 1) Для упрощения процесса моделирования склада в качестве основных сырьевых компонентов рассматриваются только щебень, песок, гравий и металл, причем не учитываются их марки.
- 2) На складе моделируются только основные технологические операции: приемка, разгрузка транспортного средства, хранение, отбор материала, загрузка транспортного средства и отгрузка материала со склада.
- 3) В модели точно определена вместимость каждой зоны склада.
- 4) Для упрощения процесса моделирования на производственном участке в качестве производимой продукции рассматриваются четыре основных видов изделий (опоры, откосы, сваи и плиты).
- 5) Стадии производственного процесса не моделируются в работе подробно.

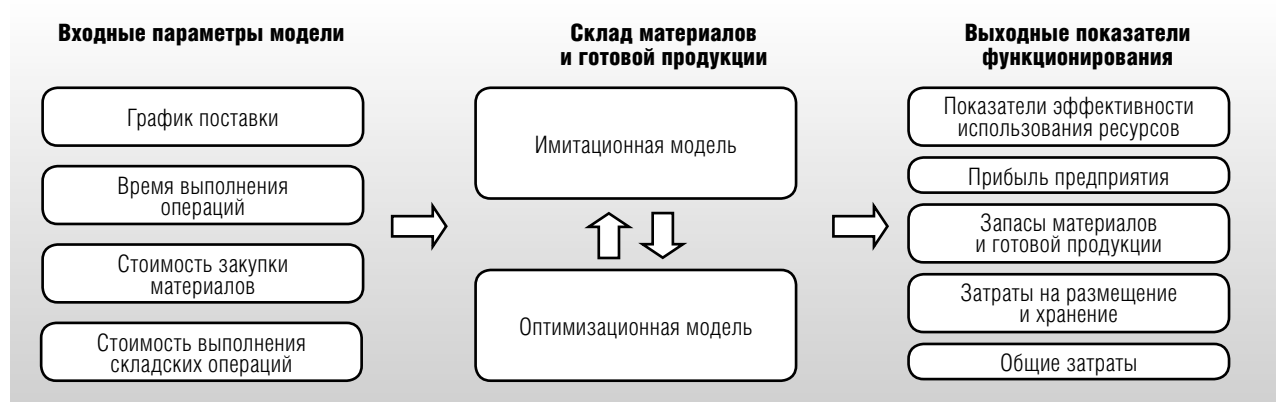


Рис. 4. Модель склада предприятия в форме «черного ящика»

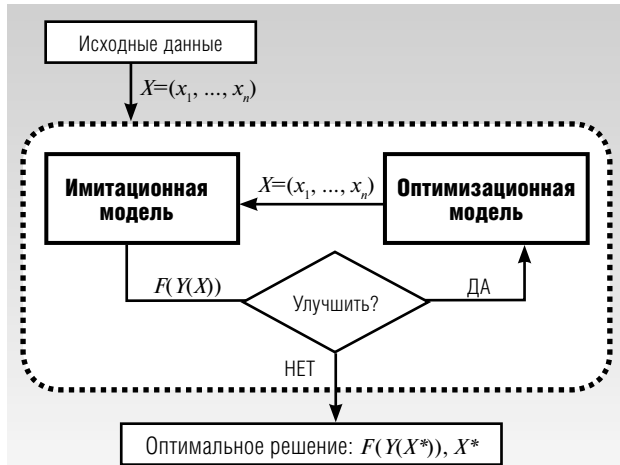


Рис. 5. Алгоритм взаимодействия оптимизационной и имитационной моделей

### 5. Оптимизационная и имитационная модели

Алгоритм взаимодействия оптимизационной и имитационной моделей представлен на рис. 5. Оптимизация заключается в последовательном выполнении нескольких прогонов модели с различными значениями параметров и нахождении оптимальных для данной задачи значений, при которых целевая функция достигает своего экстремума [3, 4, 5]. Процесс оптимизации включает в себя следующие шаги: задание допустимых значений переменных (вектор  $X$ ) и выполнение прогона модели, получение вектора выходных показателей модели  $Y(X)$  расчет и анализ значений целевой функции (величина  $F(Y(X))$ ), изменение значений оптимизационных переменных в соответствии с алгоритмом оптимизации. Эти шаги повторяются до тех пор, пока целевая функция не достигнет своего экстремума (максимума) [6, 7].

### 6. Целевая функция оптимизационной модели

В оптимизационной задаче максимизируется прибыль предприятия от продажи продукции  $F(Y(X))$ . Прибыль вычисляется как разница между выручкой от реализации продукции и затратами на производство и реализацию продукции. Выручка от реализации продукции находится суммарно от продажи всей произведенной продукции (опоры, откосы, сваи, плиты). В состав общих затрат по созданию и поддержанию запасов на складе входят: стоимость закупки материала, включая доставку материала на склад; общая стоимость операций по

заказу и приемке материалов на складе; затраты на хранение сырья и готовой продукции; затраты на размещение готовой продукции на складе. Издержки по хранению запасов, в свою очередь, включают в себя: основную и дополнительную заработную плату работников склада и сотрудников отдела снабжения, связанных с работой склада; плату за основные фонды склада; текущие расходы на содержание склада; расходы на оплату управленческого персонала; затраты на работы, проводимые с хранимыми материалами.

*Индексные обозначения оптимизационной модели:*

$s$  – индекс зоны хранения на складе,  $s = 1, \dots, S, S = 6$ ;

$p$  – индекс хранимого материала на складе,

$p = 1, \dots, P, P = 4$ ;

$p_r$  – индекс хранимой готовой продукции на складе,

$p_r = 1, \dots, P_r, P_r = 4$ ;

$p_a$  – индекс проданной готовой продукции на складе,

$p_a = 1, \dots, P_a, P_a = 4$ ;

$v$  – индекс поставщика,  $v = 1, \dots, V, V = 4$ .

*Нормативные коэффициенты затрат и стоимости:*

$c_{p_a}$  – стоимость единицы готовой продукции  $p_a$ ;

$c_{pv}$  – затраты, связанные с закупкой и доставкой от поставщика  $v$  на склад материала  $p$ ;

$c_{ps}^p$  – затраты, связанные со стоимостью операций по разгрузке материала  $p$  в зону хранения  $s$  склада;

$c_{ps}^x$  – затраты, связанные с хранением тонны материала  $p$  на складе в зоне хранения  $s$ ;

$c_{ps}^o$  – затраты, связанные со стоимостью операций по отгрузке материала  $p$  из зоны хранения  $s$  склада в бетоносмесительный узел;

$c_{p_a s}$  – затраты, связанные со стоимостью операций по разгрузке готовой продукции  $p_a$  в зону хранения  $s$  склада;

$c_{p_a s}^x$  – затраты, связанные со стоимостью операций по хранению готовой продукции  $p_a$  в зону хранения  $s$  склада.

*Объемные показатели функционирования систем:*

$y_{p_a}$  – количество единиц проданной готовой продукции  $p_a$ ;

$y_{pv}$  – количество тонн материала  $p$ , привезенного от поставщика  $v$ ;

$y_{ps}$  – количество тонн материала  $p$ , разгруженного в зону  $s$  склада;

$y_{ps}^x$  – количество тонн материала  $p$ , находящееся на хранение в зоне  $s$  склада;

$y_{ps}^o$  – количество тонн материала  $p$ , отгруженного из зоны  $s$  склада;

$y_{p_a s}$  – количество единиц готовой продукции  $p_a$ , разгруженной в зону  $s$  склада;

$y_{p_a s}^x$  – количество единиц готовой продукции  $p_a$ , находящейся на хранение в зоне  $s$  склада.

Общую прибыль предприятия (1) можно математически описать следующей формулой:

$$F(Y(X)) = \max \left( \sum_{p_a} c_{p_a} \cdot y_{p_a} - \sum_{vp} c_{vp} \cdot y_{vp} - \sum_{ps} c_{ps}^o \cdot y_{ps}^o - \sum_{ps} c_{ps}^x \cdot y_{ps}^x - \sum_{ps} c_{ps}^o \cdot y_{ps}^o - \sum_{p_a s} c_{p_a s} \cdot y_{p_a s} - \sum_{p_a s} c_{p_a s}^x \cdot y_{p_a s}^x \right) \quad (1)$$

### 7. Параметры оптимизационной модели

Переменными оптимизационной модели (2) являются компоненты вектора

$$X = (x_{pv}) \quad (2)$$

где  $x_{pv}$  – объем поставки материала  $p$  от поставщика  $v$ .

### 8. Ограничения оптимизационной модели

Ограничения на количество привезенного материала на склад (3) задаются соотношениями:

$$u_{ps} \leq x_{pv} \leq v_{ps} \quad (3)$$

где  $u_{ps}$  – нижняя граница объема поставки материала  $p$  на склад  $s$ ,  $v_{ps}$  – верхняя граница объема поставки материала  $p$  на склад  $s$ .

### 9. Имитационная модель в программной среде ExtendSim

В качестве инструмента разработки и реализации имитационной модели выбрана система имитационного моделирования ExtendSim, которая является современным инструментом для разработки моделей и проведения с ними экспериментов. При помощи этой системы можно разрабатывать имитационные модели реальных процессов для различных областей производства и логистики.

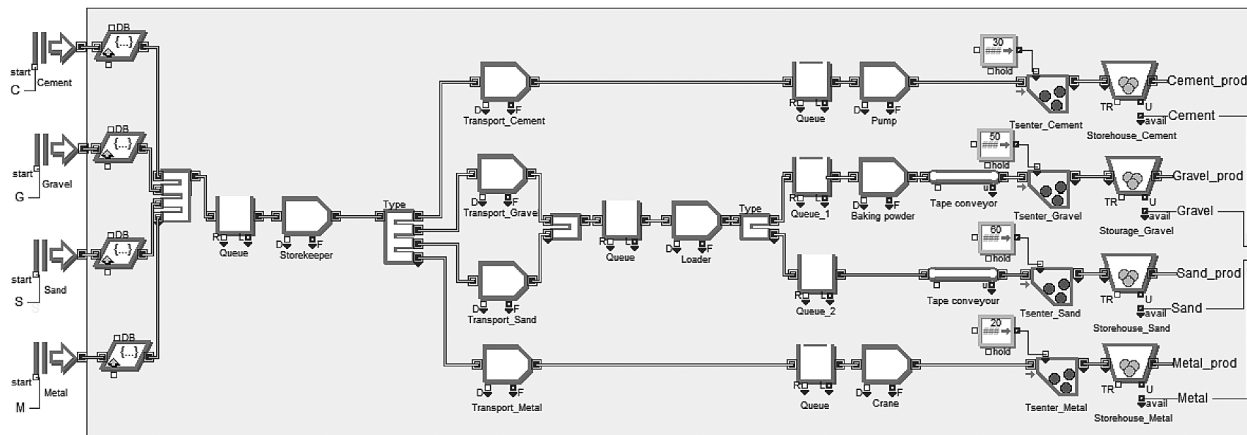


Рис. 6. Фрагмент имитационной модели, воспроизводящий входной поток склада материалов

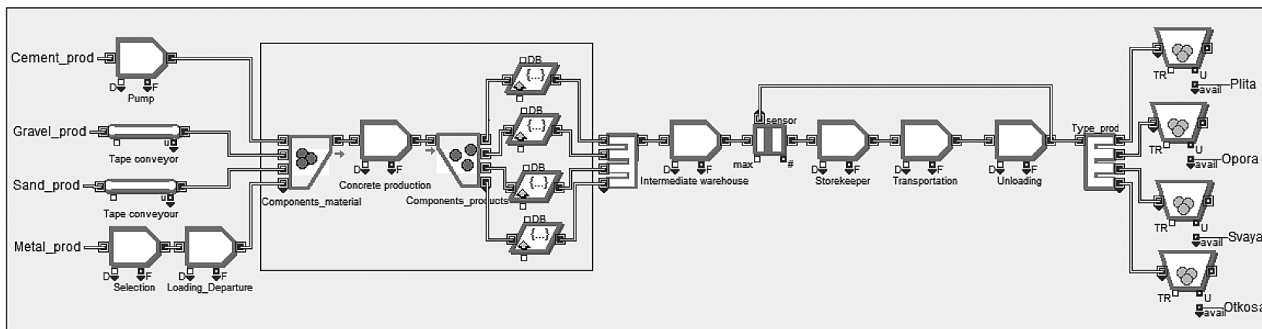


Рис. 7. Фрагмент имитационной модели, воспроизводящий выходной поток склада материалов, процесс производства и входной поток склада готовой продукции

Таблица 1.

## Характеристики пунктов обслуживания на складе

Процессы	Характеристики	Средняя длина очереди, шт.	Среднее время пребывания в очереди, мин.	Максимальное время ожидания, мин.	Коэффициент загрузки, %
Пункт приемки материалов		0,35	18,6	60	0,34
Пункт разгрузки цемента		нет	нет	нет	0,048
Пункт разгрузки склада инертных материалов		0,06	4,56	27	0,38
Пункт разгрузки металла		нет	нет	нет	0,11
Пункт приемки готовой продукции		8	40	81	0,96
Пункт разгрузки готовой продукции		8	40	81	0,96

Структура имитационной модели в ExtendSim имеет блочную структуру: все модели состоят из блоков, а блоки организованы в библиотеки [8]. Каждый блок имеет удобные средства анализа статистических данных в режиме реального времени. В ходе построения данной модели использовались блоки стандартных библиотек (Discrete Event, Value и Item). Имитационная модель представлена на рис. 6 и 7. На рис. 6 моделируется входной поток склада материалов, а на рис. 7 – выходной поток склада материалов, процесс производства и входной поток склада готовой продукции.

При создании, отладке и демонстрации имитационных моделей в пакете ExtendSim часто применяется компьютерная анимация 2D-3D (библиотека – Animation 2D-3D) [9]. В данной работе анимация использовалось для доказательства правильности работы имитационной модели, проверки соответствия модели объекту моделирования (т.е. для верификации модели). Кроме того, модель была проверена на адекватность работниками склада, которые подтвердили соответствие результатов моделирования реальным условиям функционирования склада.

#### 10. Анализ результатов моделирования и оптимизации складского процесса

Единица времени моделирования – минута, длительность моделируемого процесса – один месяц. После построения модели было проведено несколько пробных прогонов и найдены такие усредненные показатели функционирования склада, как средняя длина каждой очереди (см. рис. 3), среднее время пребывания в очереди, максимальное время ожидания и коэффициент загрузки. Результаты процесса моделирования представлены в табл. 1.

Из табл. 1 видно, что небольшие очереди присутствуют в пункте приемки материалов. Самые большие очереди наблюдаются в пунктах приемки и разгрузки готовой продукции. Коэффициент загрузки в этих пунктах также достаточно высок и в среднем равен 96%, что соответствует полной занятости работников склада и имеющегося оборудования. Это говорит об эффективном использовании оборудования и людских ресурсов. Анализируя результаты имитации, можно сделать следующий вывод: существующей пропускной способности склада недостаточно для обслуживания текущего грузопотока. Необходимо провести дополнительные эксперименты, позволяющие эффективно организовать работу склада.

В табл. 2 представлены результаты выполнения пяти оптимизационных экспериментов с имитационной моделью. Видно, что оптимальные значения входных переменных модели совпадают, а значения целевой функции незначительно отличаются друг от друга, что объясняется стохастическим характером модели.

Таблица 2.

#### Результаты оптимизационных экспериментов с имитационной моделью

№ оптимизационного эксперимента	$x_1$ [т]	$x_2$ [т]	$x_3$ [т]	$x_4$ [т]	$F(Y(X))$ [руб.]
1	25	70	70	25	2 203794
2	25	70	70	25	2 195651
3	25	70	70	25	2199739
4	25	70	70	25	2213024
5	25	70	70	25	2215104

На рис. 8 представлен процесс приближения целевой функции к оптимальному значению в ходе

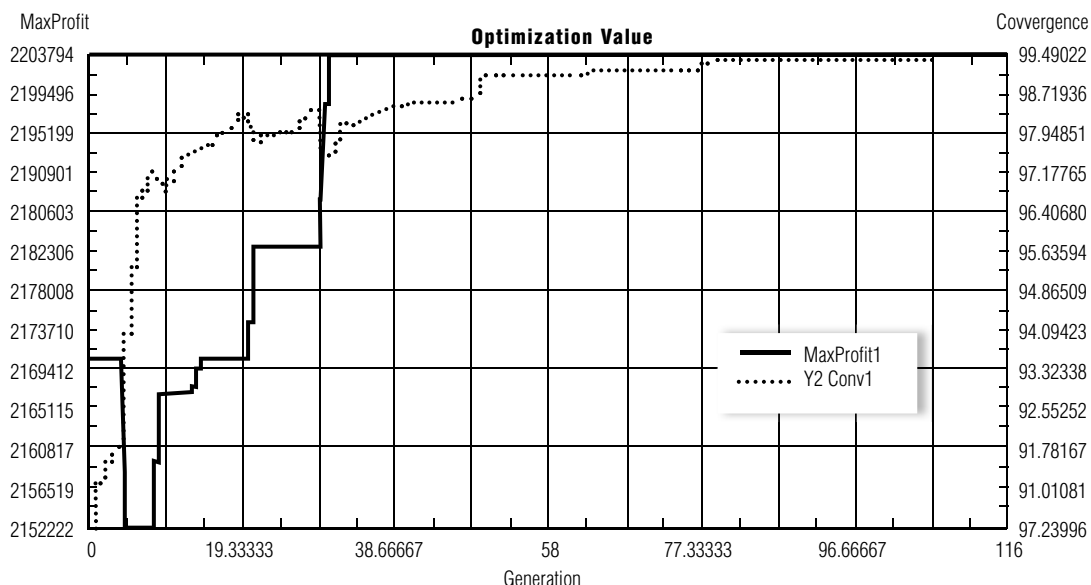


Рис. 8. Значения целевой функции в процессе оптимизации

Таблица 3.

**Затраты на эксплуатацию склада**

Наименование показателей	I неделя	II неделя	III неделя	IV неделя	Всего
Затраты на закупку сырья, руб.	2 485 750	1 261 200	1 959 400	1 574 800	7 281 150
Затраты на доставку, руб.	188 000	116 500	147 000	124 500	576 000
Затраты на размещение, руб.	21 865	19420	20 440	19 680	81 405
Затраты на хранение, руб.	24 390	35 280	41 320	23 450	124 440
Суммарные затраты, руб.	2 720 005	1 432 400	2 168 160	1 742 430	8 062 995

выполнения первого оптимизационного эксперимента, на оси абсцисс обозначен номер прогона модели оптимизации, а на оси ординат – максимальное значение целевой функции.

График на рис. 8 показывает, что поиск оптимального решения начинается со стартового начального значения, равного 2 152 222 руб. В ходе процесса оптимизации значение целевой функции увеличивается, пока не достигнет своего оптимального значения, равного 2203 794 руб. Каждое промежуточное решение с помощью эволюционного алгоритма исследуется и улучшается при оптимальных объемах поставки. Наборы наилучших параметров каждого решения используются для вычисления других более лучших решений. Процесс оптимизации продолжается до того момента, когда алгоритм уже не может улучшить полученное решение.

Суммарные затраты на эксплуатацию склада за весь период моделирования приведены в табл. 3. Большую часть из общих затрат составляют затраты на закупку сырья и на его доставку.

**11. Проведение экспериментов с оптимизационной имитационной моделью**

Эксперименты с имитационной оптимизационной моделью позволили найти ответы на следующие вопросы:

1) Возможно ли обрабатывать и хранить на существующем складе в 1,5-2 раза больше сырьевых материалов каждой категории, необходимых в производстве?

Ответ: возможно, так как на каждом из них достаточно свободного места для хранения материалов.

2) Как повлияет на производительность увеличение количества сотрудников склада до двух человек в пункте приемки готовой продукции?

Ответ: пропускная способность пункта увеличится в 1,5 раза, очередь сократится.

3) Как повлияет закупка новых 2-х погрузчиков на работу склада инертных материалов?

Ответ: закупка двух новых погрузчиков не счита-



ется целесообразной. Однако, закупка одного дополнительного погрузчика позволит значительно уменьшить очередь на этом пункте.

4) Если темпы поступления материалов на склад будут увеличены в 2 раза, то как это повлияет на работу бригады грузчиков, занимающейся размещением поступившего груза?

Ответ: если темпы поступления сырья на складе будут увеличены в 2 раза без дополнительных изменений в структуре и склада, то это приведет к большим очередям и снижению уровня производительности. Увеличение темпов поступления материалов на складе возможно только при закупке дополнительного погрузчика и использовании дополнительного работника склада в пункте приемки готовой продукции.

## 12. Заключение

В ходе выполнения исследования была построена имитационная оптимизационная модель склада промышленного предприятия по производству бетона в программной среде ExtendSim, позволяющая находить наилучший режим работы склада. Модель была построена с целью исследования проблемы возникновения очередей на территории склада и минимизации суммарных складских затрат.

Основные показатели функционирования склада после выполнения оптимизации значительно улучшились. Эффект от применения оптимизационной имитационной модели в управлении складом заключается в том, что показатели его функционирования могут быть улучшены до 15%. Это позволяет

значительно сократить расходы на организацию доставки и хранения материалов, приводит к рационализации распределения складских запасов, что способствует, с одной стороны, к снижению уровня запасов, а с другой, к восполнению нехватки материалов на складах.

Разработанная модель позволяет решать разнообразные задачи типа «что будет, если ...», относящиеся к анализу поведения объекта моделирования. Имитационная оптимизационная модель в планировании деятельности склада позволяет повысить своевременность обеспечения сырьем, повысить точность учета материалов и складских операций, сократить уровень складских запасов сырья и готовой продукции, уменьшить затраты на хранение материала, увеличить производительность труда на складе, анализировать количественные показатели работы склада.

## 13. Благодарности

Работа выполнена в рамках реализации проекта «Разработка оптимизационной имитационной модели промышленного предприятия» (регистрационный номер проекта – 11.7192.2013) аналитической ведомственной целевой программы «Развитие научного потенциала высшей школы» Министерства образования и науки Российской Федерации и Германской службы академических обменов (DAAD) в Институте организации и автоматизации производства общества Фраунгофера (Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung IFF, Магдебург, Германия). ■

## Литература

1. Лукинский В.С. Модели и методы теории логистики. СПб: Питер. 2008. 448 с.
2. Law A.M., McComas M.G. Simulation-based optimization // Proceedings of the 2000 Winter Simulation Conference. 2000. P. 46–49.
3. Fu M.C., Glover F.W., April J. Simulation optimization: A review, new development, and applications // Proceedings of the 2005 Winter Simulation Conference. 2005. P. 237–251.
4. Fahimnia B., Luong L., Marian R. An integrated model for the optimization of a two-echelon supply network // Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. 2008. Vol. 31, Issue 2. P. 477–484.
5. Parikh P.J., Zhang X., Sainathuni B. Distribution planning considering warehousing decisions // Material Handling Institute, 2010. P. 1–15.
6. Biethahn J., Lackner A., Range M., Brodersen O. Optimierung und simulation. Oldenburg: Wissenschaftsverlag GmbH, 2004. 315 p.
7. Pichitlamken P., Nelson B.L. Optimization via simulation: A combined procedure for optimization via simulation // Proceedings of the 2002 Winter Simulation Conference, 2002. P. 292–300.
8. Krahl D. ExtendSim 7 // Proceedings of the 2008 Winter Simulation Conference, 2008. P. 215–221.
9. Krahl D. The extend simulation environment // Proceedings of the 2001 Winter Simulation Conference, 2001. P. 217–225.

## A SIMULATION MODEL OF A WAREHOUSE OF AN INDUSTRIAL ENTERPRISE FOR CONCRETE PRODUCTION

**Olga BABINA**

Senior Lecturer, Department of Economics and Management of Business Processes,  
Institute of Business Processes Management and Economics, Siberian Federal University  
Address: 26a, Kirenskogo street, Krasnoyarsk, 660074, Russian Federation  
E-mail: babina62@yahoo.com

Simulation is an effective tool, which may be applied for warehouse systems planning and management. Using of simulation is related with development of a computer program and carrying out a series of experiments, allowing to define optimal scenarios of warehousing processes. During the past ten years the concept of simulation optimization was developed. Using the concept optimization software is integrated into simulation systems, allowing users to find optimal solutions automatically. A simulation optimization model can be defined as a process of discovering the best set of initial variables of the model for assessment of each of possible solutions, without participation of users. The main objective of simulation optimization modeling of a warehousing system is gaining of information about the system that is critical for efficient decision making regarding minimization of resources used in the warehouse.

The article describes a practical case study of building simulation and optimization models for a warehouse of an industrial concrete enterprise. Warehouse system processes are modeled in ExtendSim environment, and enterprise profit is optimized with the use of evolutionary algorithm. The optimization model has been executed by means of Optimizer software integrated into ExtendSim. The modeling purpose is to examine the impact of stock management strategies parameters on warehouse performance and to maximize enterprise profit from product sales. The paper presents the description of the model building process and simulation outputs. The simulation optimization model in warehouse activity planning enables to increase the accuracy of accounting of materials and warehouse operations, to reduce the level of warehouse stocks, to reduce costs of material storage, to increase labor productivity in a warehouse and to analyze quantitative indicators of warehouse performance.

**Key words:** industrial enterprise, warehouse, simulation, discrete-event simulation, optimization, evolutionary algorithm, ExtendSims software package.

**Citation:** Babina O.I. (2015) Imitacionnaja model' sklada promyshlennogo predpriatija po proizvodstvu betona [A simulation model of a warehouse of an industrial enterprise for concrete production]. *Business Informatics*, no. 1 (31), pp. 41–50 (in Russian).

### References

1. Lukinskiy V.S. (2008) *Modeli i metody teorii logistiki* [Models and methods of the theory of logistics]. Saint Petersburg: Piter. (in Russian).
2. Law A.M., McComas M.G. (2000) Simulation-based optimization. *Proceedings of the 2000 Winter Simulation Conference*, pp. 46–49.
3. Fu M.C., Glover F.W., April J. (2005) Simulation optimization: A review, new development, and applications. *Proceedings of the 2005 Winter Simulation Conference*, pp. 237–251.
4. Fahimnia B., Luong L., Marian R. (2008) An integrated model for the optimization of a two-echelon supply network. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, vol. 31, issue 2, pp. 477–484.
5. Parikh P.J., Zhang X., Sainathuni B. (2010) Distribution planning considering warehousing decisions. *Material Handling Institute*, pp. 1–15.
6. Biethahn J., Lackner A., Range M., Brodersen O. (2004) *Optimierung und simulation*, Oldenburg: Wissenschaftsverlag GmbH.
7. Pichitlamken P., Nelson B.L. (2002) Optimization via simulation: A combined procedure for optimization via simulation. *Proceedings of the 2002 Winter Simulation Conference*, pp. 292–300.
8. Krahl D. (2008) ExtendSim 7. *Proceedings of the 2008 Winter Simulation Conference*, pp. 215–221.
9. Krahl D. (2001) The extend simulation environment. *Proceedings of the 2001 Winter Simulation Conference*, pp. 217–225.

# ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕРОПРИЯТИЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

**Е.Н. ЕФИМОВ**

доктор экономических наук, профессор кафедры информационных технологий и защиты информации, факультет компьютерных технологий и информационной безопасности, Ростовский государственный экономический университет (РИНХ)

Адрес: 344002, г. Ростов-на-Дону, ул. Большая Садовая, д. 69  
E-mail: efimov46@mail.ru

**Г.М. ЛАПИЦКАЯ**

кандидат экономических наук, профессор кафедры информационных технологий и защиты информации, факультет компьютерных технологий и информационной безопасности, Ростовский государственный экономический университет (РИНХ)

Адрес: 344002, г. Ростов-на-Дону, ул. Большая Садовая, д. 69  
E-mail: gmlapickaya@mail.ru

На всех этапах жизненного цикла системе защиты информации присущи неопределенность ее свойств в условиях реального воздействия случайных факторов из внешней и внутренней среды. По мере реализации проекта системы неопределенность снижается, но эффективность функционирования никогда не может быть адекватно выражена и описана детерминированными показателями. Тогда к оценке эффективности реализации и функционирования систем защиты информации наилучшим образом применимы вероятностные методы. В соответствии с этими методами уровни гарантий безопасности системы трансформируются в доверительные вероятности соответствующих оценок показателей. В этих условиях данные для оценки эффективности мероприятий по повышению информационной безопасности можно получить с помощью имитационного моделирования.

Предложенная методика расчета оценки результата воздействия мероприятий по информационной безопасности в компании базируется на моделировании оценок предотвращенных потерь. Значение предотвращенных потерь может быть рассчитано, исходя из вероятности возникновения инцидента информационной безопасности и возможных экономических потерь от него до и после реализации мероприятий по обеспечению информационной безопасности на объекте. Получаемое в результате моделирования суммарное значение предотвращенных потерь по всем инцидентам информационной безопасности позволяет задать и осуществить сценарный расчет возможного эффекта от проведенных мероприятий. Итоговый расчет эффективности мероприятий по повышению информационной безопасности компании может быть выполнен любым из известных методов. В мировой практике для оценки эффективности ИТ-проектов широко применяется стандартный метод анализа затрат и выгод (Cost Benefit Analysis, CBA). Реализация предлагаемого варианта расчета эффективности мероприятий по повышению информационной безопасности выполнена на примере в методе CBA.

Основным достоинством предлагаемой методики расчета эффективности мероприятий по повышению информационной безопасности является учет неопределенности реальной действительности с помощью имитационного моделирования. Это позволяет в определенной степени повысить достоверность расчетов эффекта.

**Ключевые слова:** информационная безопасность, эффективность, моделирование, предотвращенные потери.

**Цитирование:** Ефимов Е.Н., Лапицкая Г.М. Оценка эффективности мероприятий информационной безопасности в условиях неопределенности // Бизнес-информатика. 2015. № 1 (31). С.51–57.

### 1. Постановка проблемы

Принято считать, что затраты на обеспечение информационной безопасности (ИБ) компании эффективны, если они обеспечивают выполнение требований государственных нормативных документов и стандартов, а также концепции ИБ. Такое понимание связано с тем, что для объективной оценки экономического эффекта ИБ нет универсальных методов. Под экономическим эффектом обычно понимают превышение стоимостных оценок конечных результатов соответствующих мероприятий над совокупными затратами ресурсов на их проведение за расчетный период [2, 4, 5].

Сложность оценки эффективности мероприятий по ИБ обусловлена целым рядом обстоятельств. В соответствии с теорией оценки эффективности систем, качество любого объекта, в том числе и системы защиты информации (СЗИ), проявляется лишь в процессе его использования по назначению (целевое функционирование), поэтому объективной является оценка по эффективности применения [8, 9].

Кроме этого, создание СЗИ фактически связано с неизвестными событиями в будущем и поэтому всегда содержит элементы неопределенности, прежде всего в результате функционирования. Этапу проектирования СЗИ вначале сопутствует значительная неопределенность. По мере реализации проекта ее уровень снижается, но никогда эффективность СЗИ не может быть адекватно выражена и описана детерминированными показателями. Процедуры испытаний, сертификации или лицензирования не устраняют полностью неопределенность свойств СЗИ или ее отдельных элементов и не учитывают случайный характер атак. Поэтому объективной характеристикой качества СЗИ, степенью ее приспособленности к достижению требуемого уровня безопасности в условиях реального воздействия случайных факторов, может служить только вероятность, например, характеризующая степень возможностей конкретной СЗИ при заданном комплексе условий, достижение цели операции или выполнение задачи системой. Данная вероятность должна быть положена и в основу комплекса показателей и критериев оценки эффективности СЗИ. При этом критериями оценки служат понятия пригодности и оптимальности. Пригодность означает выполнение всех установленных к СЗИ требований, а оптимальность – достижение одной из характеристик экстремального значения

при соблюдении ограничений и условий на другие свойства системы. При выборе конкретного критерия необходимо его согласование с целью СЗИ [2].

Обычно при синтезе системы возникает многокритериальная задача сравнения различных структур СЗИ. В число рассматриваемых в задаче показателей входят и показатели эффективности, имеющие вероятностно-временной характер функций распределения. В частности, к ним относятся вероятность преодоления системы защиты информации за некоторое время [3].

Таким образом, к оценке эффективности функционирования СЗИ наилучшим образом применимы вероятностные методы, в соответствии с которыми уровни гарантий безопасности СЗИ трансформируются в доверительные вероятности соответствующих оценок показателей. Оценка оптимального уровня гарантий безопасности в компании в значительной степени зависит от предотвращенного ущерба. Для получения численных оценок риска необходимо знать распределения случайных величин ущерба. Во многих случаях такие оценки можно получить, например, с помощью имитационного моделирования или по результатам активного аудита СЗИ [2].

Когнитивные модели могут быть использованы для оценки эффективности процессов. Они позволяют объединить элементы внутренней и внешней экономической среды компании в единую систему, а также проанализировать систему в целом и отдельные ее компоненты, не теряя взаимосвязей между ними. Исследователь в модели может осуществить выбор комплекса мероприятий (факторов), определить их возможную или желаемую силу и направленность воздействия на ситуацию, а также выбор наблюдаемых индикаторов, характеризующих развитие ситуации. Основное достоинство когнитивного моделирования заключается в том, что появляется возможность учесть как количественные, так и качественные показатели деятельности исследуемых процессов. А недостаток в том, что оно позволяет выполнить лишь сценарный прогноз развития ситуации [4, 5, 6].

Резюмируем вышеизложенное. Во-первых, эффективность мероприятий по ИБ в СЗИ вряд ли может быть определена в детерминированных оценках. Во-вторых, эффективность мероприятий по ИБ в СЗИ наилучшим образом может быть представлена вероятностными характеристиками – функциями распределения показателей, прежде всего предотвращенного ущерба.

## 2. Вариант решения проблемы

В расчетах эффективности, как правило, фигурируют две основные компоненты: получаемый результат от внедрения мероприятия и затраты, необходимые на его реализацию.

Конечным результатом проведения мероприятий по обеспечению ИБ обычно считают значение предотвращенных потерь. Значение предотвращенных потерь  $P_i$  может быть рассчитано, исходя из вероятности возникновения  $i$ -го инцидента ИБ ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) и возможных экономических потерь от него до и после реализации мероприятий по обеспечению ИБ на объекте:

$$P_i = P'_i - P''_i,$$

где  $P'_i$  и  $P''_i$  – потери от реализации угроз до и после внедрения мероприятий, повышающих уровень ИБ соответственно.

По сути, значение предотвращенных потерь отражает ту часть прибыли, которая могла быть потеряна, если бы не применялись мероприятия, повышающие уровень ИБ [1].

Тогда суммарное значение предотвращенных потерь  $P$  по всем инцидентам ИБ определяется как:

$$P = \sum_{i=1}^n (P_i + R_i),$$

где  $R_i$  – непосредственно возвращаемые средства компании, например, возмещение третьей стороной, которая виновна в инциденте ИБ, средства, полученные в результате применения штрафных санкций к сотрудникам, виновным в инцидентах ИБ, страховое возмещение и другое.

Сложность точного определения значения предотвращенных потерь очевидна. Источником данных для расчета потерь может быть либо статистика, либо экспертные методы оценки инцидентов ИБ. В первом случае статистика может отсутствовать, или она недостаточна и даже недоступна для принятия решений. Во втором случае обычно преобладает субъективизм оценок, что не повышает достоверности расчетов. Выходом из создавшегося положения может быть совместное применение обоих методов в рамках имитационного моделирования значений предотвращенных потерь. Данный метод («процессно-статистический подход» в трактовке автора – проф. Г.Н. Хубаева) достаточно хорошо зарекомендовал себя в различных сферах деятельности [10].

Используя процессно-статистический подход, предлагается следующая последовательность действий по имитационному моделированию значений предотвращенных потерь [7]:

- ◆ разбиение возможных потерь на группы, например, по инцидентам ИБ;
- ◆ оценка экспертным путем или на основании статистики значения величины потерь (тяжести последствий) по каждому инциденту: минимальное (*min*), наиболее вероятное (*mid*) и максимальное (*max*) значения (до и после проведения мероприятий по ИБ);
- ◆ моделирование значений величины потерь (до и после проведения мероприятий по повышению ИБ), на основе определенных выше характеристик (по треугольному закону распределения);
- ◆ расчет суммарного значения предотвращенных потерь на основании моделируемых значений;
- ◆ расчет статистических характеристик моделированных суммарных значений предотвращенных потерь;
- ◆ расчет показателей эффективности проведенных мероприятий и формулировка выводов.

В результате расчета получаем гистограмму распределения или интегральный процент распределения суммарного значения предотвращенных потерь. Знание закона распределения суммарного значения предотвращенных потерь позволяет легко оценить вероятность конкретного значения в любой выбранной точке или вероятность нахождения значений предотвращенных потерь в заданном интервале. Данную вероятность, с конкретным значением суммы предотвращенных потерь, можно считать в обосновании эффективности мероприятий по повышению ИБ гарантийной вероятностью.

Вторая компонента, используемая при оценке эффективности мероприятий ИБ компании, это затраты на их обеспечение. Такого рода затраты для совокупности мероприятий по ИБ могут включать:

- ◆ затраты на содержание подразделения ИБ (доля затрат);
- ◆ затраты на закупку и содержание аппаратно-программных средств защиты информации (непосредственно для реализации мероприятий);
- ◆ затраты на закупку и содержание иных средств защиты информации, непосредственно для реализации мероприятий.

Полученные таким образом компоненты (результат и затраты) могут быть использованы для расчета

эффективности мероприятий по повышению ИБ компании с гарантийной вероятностью в любом из известных методов. Так, в мировой практике для оценки эффективности ИТ-проектов, довольно широко применяется стандартный метод анализа затрат и выгод *Cost Benefit Analysis (CBA)*. В данном методе выполняется оценка и сравнение выгод (*benefit*), полученных в результате осуществления проекта, с затратами (*cost*) на его реализацию. При этом рассчитываются такие показатели как чистый приведенный доход (*Net Present Value, NPV*), индекс рентабельности (*Profitability Index, PI*), внутренняя норма доходности (*Internal Rate of Return, IRR*) и другие.

Рассмотрим реализацию предлагаемого варианта расчета эффективности на примере. ИТ-проект представляет собой внедрение трех мероприятий по ИБ ( $M_1, M_2, M_3$ ), суммарные затраты по которым составляют 1200 тыс. руб. и процентная ставка  $r = 10\%$ . Инвестиции осуществляются в течение первого периода проекта. Затраты по мероприятиям ИБ и оценки объемов возможных поступлений средств от предотвращенных потерь по ним приведены в табл. 1.

Таблица 1.

Затраты и возможное поступление средств по мероприятиям ИБ

Мероприятия ИБ	Затраты, тыс. руб.	Поступления, тыс. руб.			
		Обозн.	min	mid	max
$M_1$	650	$P_1$	150	260	410
$M_2$	340	$P_2$	100	170	300
$M_3$	210	$P_3$	50	110	200
Сумма	1200		300	540	910

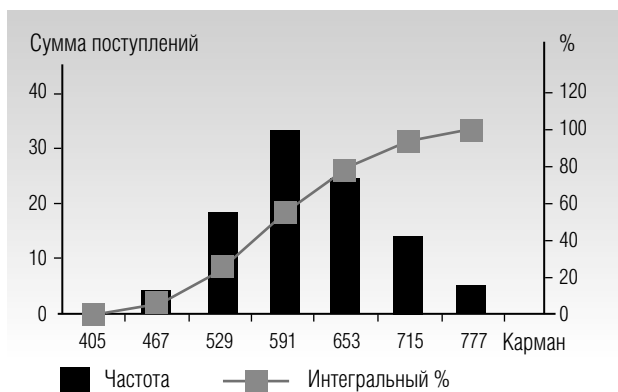


Рис. 1. Суммарное распределение возможного поступления средств от мероприятий  $M_1 - M_3$

Рассчитаем чистый приведенный доход (*NPV*), индекс рентабельности (*PI*), внутреннюю норму доходности (*IRR*), модифицированную внутреннюю норму доходности (*MIRR*), дисконтированный срок окупаемости проекта (*DPB*). При этом выполним сценарный расчет и сделаем выводы о целесообразности инвестиций.

Вначале осуществляется моделирование объемов возможных поступлений средств по приведенным мероприятиям (предотвращенный ущерб). Данные по поступлению средств, полученные в процессе их моделирования, обобщаются как сумма поступлений в итоговое распределение (рис. 1). Описательная статистика итогового распределения суммы предотвращенного ущерба приведена в табл. 2.

Результаты моделирования и описательная статистика итогового распределения использованы для построения сценариев оценки эффективности ИТ-проекта (табл. 3).

Таблица 2.

Описательная статистика распределения суммы поступлений средств

Показатель	Значение
Среднее	587,82
Стандартная ошибка	7,43
Стандартное отклонение	74,30
Дисперсия выборки	5521,24
Минимум	408
Максимум	768

Таблица 3.

Сценарии оценки эффективности ИТ-проекта

Сценарии	Обозн.	Объемы поступления платежей за период, тыс. руб.
Пессимистический	$S_p$	408
Наиболее вероятный	$S_v$	591
Оптимистический	$S_o$	768

Для каждого из сценариев были выполнены расчеты показателей эффективности ИТ-проекта, приведенные в табл. 4.

Таблица 4.

## Показатели эффективности ИТ-проекта по сценариям

Показатели эффективности	Обозначения	Сценарии		
		$S_p$	$S_v$	$S_o$
Индекс рентабельности	$PI$	0,84	1,22	1,11
Дисконтированный срок окупаемости проекта	$DPB$	3,66	2,39	1,79
Чистый приведенный доход	$NPV$	93,3	269,7	132,9
Поступления, приведенные к моменту окончания проекта	$FVI$	1893,5	1956,2	1612,8
Затраты, приведенные к моменту времени 0	$PVO$	1200	1200	1200
Модифицированная внутренняя норма доходности	$MIRR$	0,12	0,18	0,16
Внутренняя норма доходности	$IIR$	0,135	0,224	0,181

Для сценариев выполняются почти все условия одобрения ИТ–проекта:  $NPV > 0$ ;  $PI > 1$  (кроме сценария  $S_p$ );  $MIRR > r$ .

Окончательный выбор предлагается выполнить путем определения близости каждого из сценариев к идеальному проекту, например, с помощью Евклидова расстояния. Для этого показатель  $NPV$  по сценариям нормируется по отношению к максимальному значению, а также устанавливаются экспертным путем весовые коэффициенты. Идеальный проект может быть выбран, например, как  $\{NPV = 2$ ;  $PI = 2$ ;  $MIRR = 1\}$ , соответственно весовые коэффициенты  $\{0,4$ ;  $0,3$ ;  $0,3\}$ .

По результатам расчета расстояния до идеального проекта равны для сценариев  $S_p$ ,  $S_v$  и  $S_o$  соответственно 0,865; 0,392; 0,679. Таким образом, можно считать, что оптимальным вариантом является сценарий  $S_v$  (наиболее вероятный).

## Выводы

Выполнен анализ предметной области, с точки зрения оценки эффективности СЗИ. При этом показано, что объективной характеристикой качества СЗИ – степень ее приспособленности к достижению требуемого уровня безопасности в условиях

реального воздействия случайных факторов, может служить только вероятность достижения цели операции, выполнения задачи системой или иное.

Обоснована возможность получения необходимых данных для оценки эффективности мероприятий по повышению ИБ компании с помощью имитационного моделирования. Предложена методика расчета для оценки результата от воздействия проведенных мероприятий по ИБ, представленная на конкретном примере. В данной методике моделируются оценка предотвращенного ущерба, являющаяся базовым показателем при обосновании экономического эффекта СЗИ.

С помощью имитационного моделирования учитывается относительная неопределенность реальной действительности, что в принципе позволяет повысить достоверность обоснования эффективности проектов ИБ. В методике возможен учет воздействия как прямых, так и косвенных факторов эффективности проектов ИБ. Знание законов распределения суммарного значения предотвращенных потерь позволяет задать и осуществить сценарный расчет оценки эффекта от внедрения ИТ-проекта с заданной гарантийной вероятностью. ■

## Литература

1. Андреев К. Метод оценки экономической эффективности подразделения по защите информации // Информационная безопасность. 2010. № 5. [Электронный ресурс]: <http://www.itsec.ru/articles2/Oborandteh/metod-ocenki-ekonomicheskoi-effektivnosti-podrazdeleniya-po-zashite-informacii> (дата обращения 27.12.2014).
2. Баутов А. Эффективность защиты информации // Открытые системы. 2003. № 07-08. [Электронный ресурс]: <http://www.osp.ru/os/2003/07-08/183282/> (дата обращения 27.12.2014).

3. Горбунов А., Чуменко В. Выбор рациональной структуры средств защиты информации в АСУ. [Электронный ресурс]: <http://kiev-security.org.ua/box/2/26.shtml> (дата обращения 27.12.2014).
4. Денисов М.Ю., Долженко А.И., Ефимов Е.Н. Когнитивное моделирование оценки эффективности электронных бизнес–отношений предприятия // Вестник Ростовского государственного экономического университета «РИНХ». 2012. № 1 (37). С. 83–90.
5. Ефимов Е.Н. Оценка эффективности электронных бизнес–отношений предприятия // Проблемы федеральной и региональной экономики: ученые записки. /Рост. гос. эконом. ун-т (РИНХ). Ростов н/Д: 2011. Вып. 14. С. 68–75.
6. Ефимов Е.Н., Лапичкая Г.М. Информационная безопасность и бизнес–процессы компании // Известия ЮФУ. Технические науки. Информационная безопасность. 2013. № 12. С 253–260.
7. Крепков И.М., Ефимов Е.Н., Фоменко Н.М. Анализ и учет рисков продвижения Интернет-проектов предприятия // Вестник МЭИ. 2010. № 2. С. 101–107.
8. Петухов Г. Основы теории эффективности целенаправленных процессов. Часть 1. Методология, методы, модели. М.: МО СССР, 1989.
9. Петухов Г.Б., Якунин В.И. Методологические основы внешнего проектирования целенаправленных процессов и целеустремленных систем. М.: АСТ, 2006.
10. Хубаев Г.Н. Процессно-статистический подход к учету затрат ресурсов при оценке (калькуляции) себестоимости продукции и услуг: особенности реализации, преимущества // Вопросы экономических наук. 2008. № 2. С. 158–166.

## EVALUATION OF INFORMATION SECURITY EFFECTIVENESS MEASURES UNDER UNCERTAINTY

### ***Evgeny EFIMOV***

*Professor, Department of Information Technologies and Information Protection,  
Faculty of Computer Technologies and Information Security,  
Rostov State Economic University (RINE)*

*Address: 69, Bolshaya Sadovaya Street, Rostov-on-Don, 344002, Russian Federation*

*E-mail: efimov46@mail.ru*

### ***Galina LAPITSKAYA***

*Professor, Department of Information Technologies and Information Protection,  
Faculty of Computer Technologies and Information Security,  
Rostov State Economic University (RINE)*

*Address: 69, Bolshaya Sadovaya Street, Rostov-on-Don, 344002, Russian Federation*

*E-mail: gmlapickaya@mail.ru*

*Uncertainty of information security system properties is inherent at all stages of its life cycle due to real exposure to random factors of external and internal environment. As a project is implemented, the system uncertainty tends to reduce, but its operation efficiency can never be adequately expressed and described by deterministic parameters. In this case probabilistic methods are most applicable to evaluate efficiency of implementation and operation of information security systems. In accordance with these methods, levels of system safeguards are transformed into confidence levels of corresponding estimates. Under these conditions, data to evaluate effectiveness of information security enhancement measures can be obtained by using simulation modeling.*

*A suggested methodology for information security impact assessment at a company implies modeling of estimates of losses avoided. The value of losses avoided can be calculated on the basis of the likelihood of an information*



security incident and resulting possible economic losses before and after implementation of information security measures at an object.

Total losses avoided resulting from the simulation covering all information security incidents enable to specify and to carry out scenario-based calculations of potential effects of such measures. The final evaluation of information security enhancement measures can be performed by any known method. Globally a standard method of cost-benefit analysis (CBA) is widely used to evaluate effectiveness of IT projects. Implementation of the suggested information security enhancements evaluation methodology has been based on the CBA method.

The main advantage of the proposed information security enhancements evaluation methodology is its ability to pay due regard to the real world uncertainty thanks to simulation modeling. This enables to some extent to increase the validity of evaluation estimates.

**Key words:** information security, effectiveness, modeling, losses prevented.

**Citation:** Efimov E.N., Lapitskaya G.M. (2015) Ocenka jeffektivnosti meroprijatij informacionnoj bezopasnosti v uslovijah neopredelennosti [Evaluation of the effectiveness of information security in conditions of uncertainty]. *Business Informatics*, no. 1 (31), pp. 51–57 (in Russian).

#### References

1. Andreev K. (2010) Metod ocenki jekonomicheskoj jeffektivnosti podrazdelenija po zashhite informacii [A method of evaluation of economic performance of an information security division]. *Information Security* (electronic journal). Available at: <http://www.itsec.ru/articles2/Oborandteh/metod-ocenki-ekonomicheskoi-jeffektivnosti-podrazdeleniya-po-zashhite-informacii> (accessed 27 December 2014). (in Russian)
2. Bautov A. (2003) Jeffektivnost' zashhity informacii [The effectiveness of information security]. *Open Systems* (electronic journal), no. 07-08. Available at: <http://www.osp.ru/os/2003/07-08/183282/> (accessed 27 December 2014). (in Russian)
3. Gorbunov A., Chumenko V. *Vybor racional'noj struktury sredstv zashhity informacii v ASU* [Selection of the rational structure of information protection instruments in information systems]. Available at: <http://kiev-security.org.ua/box/2/26.shtml> (accessed 27 December 2014). (in Russian)
4. Denisov M., Dolzhenko A., Efimov E. (2012) Kognitivnoe modelirovanie ocenki jeffektivnosti jelektronnyh biznes—otnoshenij predpriyatija [Cognitive modeling evaluation of the effectiveness of electronic business relations company]. *Bulletin of the Rostov State Economic University*, no. 1 (37), pp. 83–90. (in Russian)
5. Efimov E. (2011) Ocenka jeffektivnosti jelektronnyh biznes—otnoshenij predpriyatija [Assessment of the effectiveness of electronic business relations company]. *Problems of Federal and Regional Economy: Scientific Notes of Rostov State Economic University*, no. 14, pp. 68–75. (in Russian)
6. Efimov E., Lapickaja G. (2013) Informacionnaja bezopasnost' i biznes-processy kompanii [Information security and business processes of the company]. *Proceedings of South Federal University. Technical Science. Information Security*, no. 12, pp. 253–260. (in Russian)
7. Krepkov I., Efimov E., Fomenko N. (2010) Analiz i uchet riskov prodvizhenija Internet-proektov predpriyatija (2010) [Analysis and risk-based promotion of Internet projects]. *Bulletin of Moscow Power Engineering Institute*, no. 2, pp. 101–107. (in Russian)
8. Petuhov G. (1989) *Osnovy teorii jeffektivnosti celenapravlennyh processov. Chast' 1. Metodologija, metody, modeli*. [Fundamentals of the theory of the effectiveness of targeted processes. Part 1. Methodology, methods, models]. Moscow: The USSR Ministry of Defence. (in Russian)
9. Petuhov G. (2006) *Metodologicheskie osnovy vneshnego proektirovanija celenapravlennyh processov i celeustremennyh sistem* [Methodological basis of the external design of targeted processes and dedicated systems]. Moscow: AST. (in Russian)
10. Hubaev G. (2008) Processno-statisticheskij podhod k uchetu zatrat resursov pri ocenke (kal'kuljacii) sebestoimosti produkcii i uslug: osobennosti realizacii, preimushhestva. [Process-statistical approach to cost accounting resources assessment (costing) cost of products and services: implementation peculiarities, advantages]. *Problems of Economics*, no. 2, pp. 158–166. (in Russian)

# ПОДХОД К ОЦЕНКЕ КАЧЕСТВА МОДЕЛЕЙ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ НА ОСНОВЕ СТРОГО БИНАРНЫХ ДЕРЕВЬЕВ И МОДИФИЦИРОВАННОГО АЛГОРИТМА КЛОНАЛЬНОГО ОТБОРА

**Л.А. ДЕМИДОВА**

доктор технических наук, профессор кафедры вычислительной и прикладной математики, факультет вычислительной техники,  
Рязанский государственный радиотехнический университет

Адрес: 390000, г. Рязань, ул. Гагарина, д. 59/1

E-mail: liliya.demidova@rambler.ru

Рассматриваются модели краткосрочного прогнозирования коротких временных рядов на основе строго бинарных деревьев и модифицированного алгоритма клонального отбора, обеспечивающие повышение точности прогноза посредством поиска аналитических зависимостей, формируемых на основе антител, кодирующих строго бинарные деревья и адекватно описывающих известные значения временных рядов.

Антитело представляет собой символьную строку, элементы которой выбираются из трёх предварительно заданных символьных алфавитов: алфавита арифметических операций; алфавита функционалов и алфавита терминалов. Использование трех символьных алфавитов обеспечивает при реализации модифицированного алгоритма клонального отбора корректное преобразование в аналитические зависимости случайным образом формируемых антител, структура которых может быть описана с помощью строго бинарных деревьев. При кодировании антител на основе строго бинарных деревьев осуществляется последовательная запись в символьную строку всех узлов строго бинарного дерева, начиная слева направо и снизу вверх. При формировании аналитических зависимостей на основе антител используется рекурсивная процедура интерпретирования антител.

Модифицированный алгоритм клонального отбора относится к группе эволюционных алгоритмов, реализующих возможность одновременного поиска среди нескольких альтернативных вариантов решений и выбора лучших из них. Главной отличительной особенностью модифицированного алгоритма клонального отбора является применение механизмов клональной селекции, гипермутации и супрессии в ходе смены поколений популяций антител, используемых для формирования искомым аналитических зависимостей.

Предложен и исследован новый подход к оценке качества моделей прогнозирования на основе строго бинарных деревьев и модифицированного алгоритма клонального отбора. Показана целесообразность одновременного учета значений средней относительной ошибки прогнозирования и показателя несовпадения тенденций при вычислении аффинитета антител с целью оценки качества моделей прогнозирования, определяемых с использованием аналитических зависимостей, формируемых на основе строго бинарных деревьев. Рассматриваемый подход к оценке качества моделей прогнозирования позволяет при реализации модифицированного алгоритма клонального отбора исключить из дальнейшего рассмотрения модели прогнозирования, характеризующиеся большими значениями показателя несовпадения тенденций.

Предлагаемые модели прогнозирования позволяют существенно сократить время поиска аналитической зависимости, наилучшим образом описывающей известные значения коротких временных рядов, и могут быть рекомендованы для решения задач краткосрочного прогнозирования (на 1-3 шага вперед).

**Ключевые слова:** временной ряд, модель прогнозирования, строго бинарное дерево, модифицированный алгоритм клонального отбора, средняя относительная ошибка прогнозирования, показатель несовпадения тенденций, аффинитет.

**Цитирование:** Демидова Л.А. Подход к оценке качества моделей прогнозирования на основе строго бинарных деревьев и модифицированного алгоритма клонального отбора // Бизнес-информатика. 2015. № 1 (31). С.58–68.

## 1. Введение

**А**нализ коротких временных рядов (ВР), длина которых ограничена 20–30 значениями, играет важную роль в решении многих практических задач, например, задач, связанных с прогнозированием различных социально-экономических процессов [1–4].

В последние годы все чаще при разработке моделей прогнозирования коротких ВР используются различные технологии искусственного интеллекта, применение которых позволяет обеспечить получение адекватных оценок возможных изменений в поведении ВР на основе их известных значений и принятие соответствующих управленческих решений [5–13].

При применении традиционных технологий прогнозирования ВР, основанных, например, на экстраполяционных описаниях, приходится решать непростые вопросы, связанные с выбором адекватной модели прогнозирования и оценкой свободных параметров этой модели, в частности, степени полинома или порядка авторегрессии [1, 2].

Одна из перспективных технологий, которая может быть использована при разработке моделей прогнозирования коротких ВР, реализует применение искусственных иммунных систем (ИИС), основанных на принципах естественной иммунной системы и хорошо зарекомендовавших себя при решении широкого спектра прикладных задач [14–19]. Эффективность использования аппарата ИИС, в частности, алгоритма клонального отбора и механизмов супрессии антител в решении задач интерполяции, экстраполяции и прогнозирования, доказанная в работах зарубежных исследователей [15, 18], подтверждает перспективность применения ИИС для решения задачи прогнозирования коротких ВР.

Практика использования моделей прогнозирования, определяемых с применением аналитических зависимостей, формируемых на основе строго бинарных деревьев (СБД), полученных при реализации модифицированного алгоритма клонального отбора (МАКО), для прогнозирования тенденций рынка труда в России свидетельствует о целесообразности проведения дальнейших разработок в данном направлении [16, 20–23].

В большинстве случаев качество моделей прогнозирования коротких ВР оценивается с применением какого-либо одного показателя, например, средней относительной ошибки прогнозирования, значение которой должно быть минимизировано [5, 6, 11–13, 16, 20–23]. В то же время для коротких

ВР может быть выполнен расчет и других показателей качества моделей прогнозирования, таких как коэффициент детерминации, среднеквадратическая ошибка прогнозирования, минимальное и максимальное значения ошибки прогнозирования, коэффициент несовпадения тенденций и т.п. [24–26]. Задача одновременного учета значений таких показателей при оценке качества модели прогнозирования представляет собой задачу многокритериальной оптимизации, которая с той или иной долей успеха может быть решена только высококвалифицированным экспертом-аналитиком.

Одновременный учет даже каких-либо двух показателей качества моделей прогнозирования обеспечил бы существенное повышение точности прогнозирования коротких ВР. В частности, учет наряду со значением средней относительной ошибки прогнозирования значения показателя несовпадения тенденций позволил бы исключить из дальнейшего рассмотрения модели прогнозирования, имеющие «лучшие» (малые) значения средней относительной ошибки прогнозирования, но при этом характеризующиеся «плохим» (большим) значением показателя несовпадения тенденций.

Так как при реализации МАКО для оценки качества моделей прогнозирования на основе СБД с целью отбора «лучшей» модели применяется традиционный подход, основанный на минимизации значения средней относительной ошибки прогнозирования [16, 20–23], то можно сделать вывод об актуальности разработки нового подхода к оценке качества моделей прогнозирования на основе СБД, который позволил бы обеспечить одновременный учет значений средней относительной ошибки прогнозирования и показателя несовпадения тенденций при реализации МАКО.

## 2. Основные определения.

### Разработка модели прогнозирования

В работах [16, 20–23] для решения задачи прогнозирования коротких ВР  $d(t)$  предлагается использовать модели краткосрочного прогнозирования  $k$ -го порядка, получаемые при реализации МАКО, который позволяет при приемлемых временных затратах сформировать на основе СБД аналитическую зависимость, наилучшим образом описывающую известные значения ВР и обеспечивающую получение минимального значения аффинитета  $Aff$  (*affinity*) – средней относительной ошибки прогнозирования  $AFER$  (*Average Forecasting Error Rate*):

$$AFER = \frac{\sum_{t=k+1}^m |(f(t) - d(t))/d(t)|}{m - k} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где  $f(t)$  и  $d(t)$  – предсказанное и реальное значения ВР для  $t$ -го отсчета времени;  $m$  – количество значений ВР (количество отсчетов времени).

При реализации МАКО возможные варианты аналитических зависимостей кодируются в виде антител  $Ab$ , которые должны осуществлять распознавание антигенов  $Ag$  – известных значений ВР. При этом в качестве «лучшего» антитела выбирается антитело  $Ab$ , обеспечивающее минимальное значение аффинитета  $Aff$  [16, 20–23].

Антитело  $Ab$  представляет собой символьную строку, элементы которой выбираются из трех предварительно заданных символьных алфавитов [20–23]: алфавита арифметических операций  $Operation = \{ '+', '-', '*', '/' \}$ , то есть операций сложения, вычитания, умножения и деления; алфавита функционалов  $Functional = \{ 'S', 'C', 'Q', 'L', 'E', '_' \}$ , в котором символы 'S', 'C', 'Q', 'L', 'E' соответствуют математическим функциям «синус», «косинус», «квадратный корень», «натуральный логарифм», «экспонента», а символ '\_' определяет отсутствие какой-либо математической функции; алфавита терминалов  $Terminal = \{ 'a', 'b', \dots, 'z', '@' \}$ , в котором символ '@' определяет некоторую константу, а символы 'a', 'b', ..., 'z' соответствуют аргументам искомой аналитической функции. Предполагается, что арифметические операции являются двухместными, а применение функционала должно предшествовать применению арифметической операции [20–23].

Использование трех символьных алфавитов обеспечивает при реализации МАКО корректное преобразование в аналитические зависимости случайным образом формируемых антител, структура которых может быть описана с помощью СБД [20–23], примеры которых приведены на рис. 1, где рядом с узлами показаны значения их уровней. При использовании почти полных СБД (ППСБД) [20, 22] (рис. 1б) удастся сформировать более сложные аналитические зависимости, чем в случае применения просто СБД (рис. 1а) [21, 23], и, как следствие, обеспечить получение меньших значений средней относительной ошибки прогнозирования  $AFER_L$  [22]. По определению, **строго бинарное дерево** (СБД) уровня  $L$  состоит только из узлов уровня  $l$  ( $l \leq L$ ), у которых степень (количество выходящих из узла ветвей) равна двум или нулю [27]. В контексте решаемой задачи использовались СБД уровня  $L$ , у которых каж-

дый правый узел  $l$ -го ( $l < L$ ) уровня является листом (концевым узлом, то есть узлом, чья степень равна нулю), а каждый левый узел  $l$ -го ( $l < L$ ) уровня имеет двух потомков (при этом левый и правый узлы  $L$ -го уровня являются концевыми). По определению, **почти полное СБД** (ППСБД) – это СБД, для которого существует неотрицательное целое  $l$  такое, что каждый лист в дереве имеет уровень  $l$  или  $l + 1$  и, если узел дерева имеет правого потомка уровня  $l + 1$ , тогда все его левые потомки, являющиеся листьями, также имеют уровень  $l + 1$  [27]. В контексте решаемой задачи использовались ППСБД уровня 3 (рис. 1б, рис. 3), которые применялись либо непосредственно для формирования аналитических зависимостей на основе антител длиной 18 символов ( $2 \cdot r$ , где  $r$  – количество узлов в ППСБД уровня 3;  $r = 9$ ), либо – для построения СБД более высокого уровня с целью последующего формирования аналитических зависимостей на основе антител большей длины. В последнем случае построение СБД осуществлялось посредством итерационного присоединения уже имеющегося СБД к новому узлу в качестве «левого» поддерева и присоединения к этому же узлу в качестве «правого» поддерева – СБД уровня 1. Сформированные таким образом СБД в дальнейшем условно рассматриваются как ППСБД.

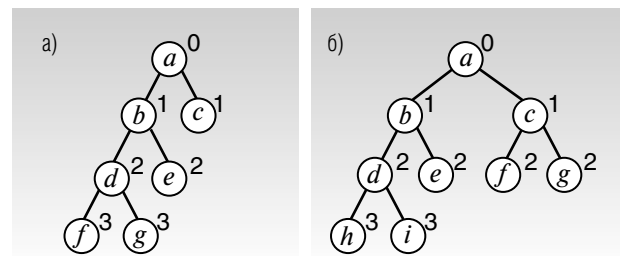


Рис. 1. Примеры бинарных деревьев:  
а) – строгое бинарное дерево уровня 3;  
б) – почти полное строгое бинарное дерево уровня 3

Количество терминальных позиций  $Term$  в антителе определяется максимально возможным порядком модели прогнозирования [20–23]. Если максимально возможный порядок равен  $K$ , то это означает, что при прогнозировании значения ВР  $d(t)$  на момент времени  $t$  могут использоваться  $K$  значений ВР:  $d(t - K), \dots, d(t - 2), d(t - 1)$ . При этом реальный и максимальный порядки модели прогнозирования  $k$  и  $K$  соответственно удовлетворяют условию:  $k \leq K$  (ввиду возможного кратного вхождения некоторых терминальных символов в запись аналитической зависимости и возможного наличия константы). Для антител на основе СБД (рис. 1а) при

формировании аналитических зависимостей произвольного максимального возможного порядка  $K$  может быть использована рекурсивная процедура интерпретирования антител [22], заключающаяся в рекурсивном преобразовании СБД в символьную строку посредством последовательной записи всех узлов, начиная слева направо и снизу вверх. Терминальные узлы (листья) СБД могут содержать только символы из алфавита терминалов *Terminal*, а остальные узлы формируются из символов алфавита арифметических операций *Operation* и алфавита функционалов *Functional*. При этом минимальный и максимальный номера позиций антитела, в которых стоят терминальные символы, равны  $2 \cdot Term$  и  $4 \cdot Term - 2$  соответственно, а длина антитела определяется максимальным номером позиции, в которой стоит терминальный символ.

Пример формирования антитела на основе СБД для случая, когда  $K = 3$ , что соответствует 3 концевым узлам (листьям) и алфавит терминалов имеет вид:  $Terminal = \{ 'a', 'b', 'c', '@' \}$ , приведен на рис. 2: в позициях 6, 8, 10 стоят символы из алфавита терминалов, в позициях 1, 3, 5, 7, 9 – из алфавита функционалов, а в позициях 2, 4 – из алфавита арифметических операций. Антитело  $Ab$ , сопоставляемое СБД, изображенному на рис. 2, и порожденная им аналитическая зависимость  $F(b, c)$  имеют соответственно вид:

$$Ab = ('L' '*' 'C' '-' '.' '@' 'E' 'b' 'S' 'c');$$

$$F(b, c) = \ln(\cos(\sin(c) - \exp(b)) * const),$$

где  $const$  – константа, соответствующая символу '@' и определяемая случайным образом.

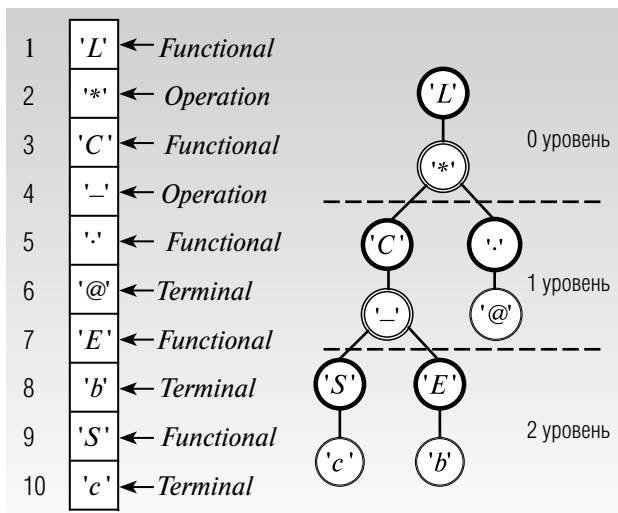


Рис. 2. Пример формирования антитела на основе СБД

Формирование антитела, соответствующего ППСБД (рис. 1б), может быть реализовано различными способами, обеспечивающими корректный результат интерпретирования антитела. В частности, могут быть использованы [20]: способ, основанный на применении стандартного подхода к обходу вершин бинарного дерева и реализующий формирование упорядоченного списка символов, находящихся в вершинах ППСБД; способ, основанный на разбиении ППСБД на поддеревья и реализующий сначала с применением стандартного подхода к обходу вершин бинарного дерева для каждого поддерева формирование упорядоченных списков символов, находящихся в его вершинах, а затем – последовательное объединение этих списков.

В [22] показано, что применение при реализации МАКО способа формирования антител, основанного на разбиении ППСБД на поддеревья, обеспечивает минимизацию временных затрат на интерпретацию антител в аналитические зависимости. Для антител на основе ППСБД может быть использована рекурсивная процедура интерпретирования антител [22], но ее применение в этом случае имеет ряд особенностей [20].

Так как для антител на основе ППСБД максимально возможный порядок  $K$  (количество концевых узлов – листьев) всегда является нечетным числом, то само ППСБД может быть представлено в виде композиции одного базового «левого» поддерева максимально возможного порядка  $K_L = 3$  (рис. 3) и некоторого количества  $n$  ( $n \geq 1$ ) базовых «правых»  $i$ -х ( $i = \overline{1, n}$ ) поддеревьев максимально возможного порядка  $K_n^i = 2$  (рис. 3). При этом

$$K_L + \sum_{i=1}^n K_n^i = K.$$

Базовое «левое» поддерево – это СБД максимально возможного порядка  $K_L = 3$ , являющееся одновременно СБД уровня 2 (рис. 3). Базовое «правое» поддерево – это СБД максимально возможного порядка  $K_n^i = 2$ , являющееся одновременно СБД уровня 1 (рис. 3). Формирование ППСБД максимально возможного порядка  $K$  осуществляется посредством итерационного (до достижения порядка  $K$ ) присоединения уже имеющегося СБД к новому узлу в качестве «левого» поддерева и присоединения к этому же узлу в качестве «правого» поддерева – базового «правого» поддерева (СБД уровня 1). При этом только на первом шаге итерационного формирования ППСБД «левое» поддерево является базовым, а на всех остальных шагах в качестве «лево-

го» используется СБД, полученное на предыдущем шаге.

Количество терминальных позиций в базовом «левом» и базовых «правых» поддеревьях равно соответственно  $Term_{\text{л}} = 3$  и  $Term_{\text{п}}^i = 2$  ( $i = 1, n$ ), а длина антитела равна  $10 + 8 \cdot n$  [22]. Процедура формирования антитела на основе ППСБД может быть реализована циклически в виде рекурсивного формирования частей антитела на основе соответствующих поддеревьев с последующей их композицией (слева направо и снизу вверх).

На рис. 3 приведен пример ППСБД для случая, когда  $K = 5$ , что соответствует 5 концевым узлам (листьям), и алфавит терминалов имеет вид:  $Terminal = \{ 'a', 'b', 'c', 'd', 'e', '@' \}$ . Длина антитела в этом случае находится как сумма длин «левого» поддерева ( $4 \cdot Term_{\text{л}} - 2 = 10$ ), «правого» поддерева ( $4 \cdot Term_{\text{п}} - 2 = 6$ ) и количества символов композиции, равного 2, то есть равна 18.

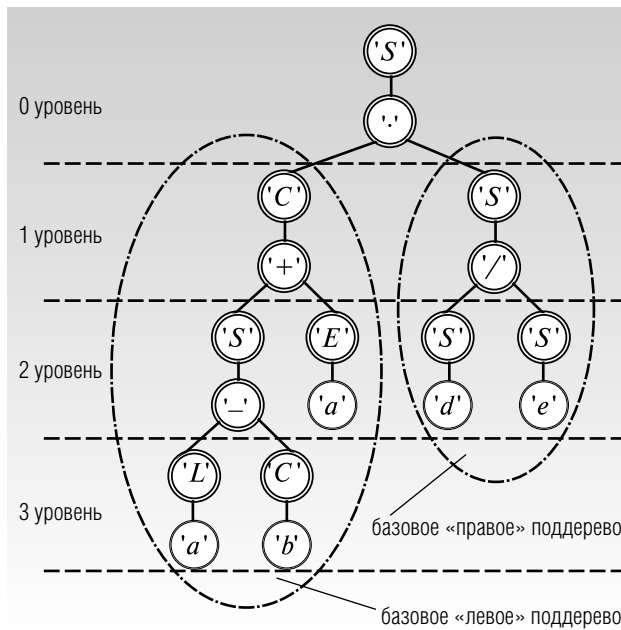


Рис. 3. Пример ППСБД, используемого для формирования антитела

Как уже было отмечено выше, качество антител и соответствующих им моделей прогнозирования, получаемых при реализации МАКО, оценивается по значению аффинитета  $Aff$ , который должен быть минимизирован. При этом обычно в качестве аффинитета  $Aff$  используется средняя относительная ошибка прогнозирования  $AFER$ , вычисляемая по формуле (1).

В тоже время особое внимание при отборе «лучших» антител и соответствующих им моделей прогнозирования следует уделять анализу значений

показателя несовпадения тенденций  $Tendency$ , который должен быть минимизирован:

$$Tendency = \frac{h}{m - k - 1}, \quad (2)$$

где  $h$  – количество отрицательных произведений  $(f(t-1) - f(t)) \cdot (d(t-1) - d(t))$  при  $t = k + 2, m$ ;  $f(t)$  и  $d(t)$  – предсказанное и реальное значения ВР для  $t$ -го отсчета времени;  $m$  – количество значений ВР (количество отсчетов времени);  $k$  – порядок модели;  $m - k - 1$  – общее количество произведений  $(f(t-1) - f(t)) \cdot (d(t-1) - d(t))$ .

Для одновременного учета при оценке качества антител и соответствующих им моделей прогнозирования наряду со значением средней относительной ошибки прогнозирования  $AFER$  значения показателя несовпадения тенденций  $Tendency$  предлагается вычислять аффинитет модели прогнозирования следующим образом:

$$Aff = AFER \cdot (1 + Tendency). \quad (3)$$

Представление формулы для вычисления аффинитета  $Aff$  в таком виде позволит обеспечить при реализации МАКО совместную одновременную минимизацию значений средней относительной ошибки прогнозирования  $AFER$  и показателя несовпадения тенденций  $Tendency$ .

Если для некоторой модели прогнозирования окажется, что  $AFER = 0$ , то этот факт будет свидетельствовать не только о том, значение средней относительной ошибки прогнозирования равно нулю, но и о полном совпадении тенденций ВР, при котором  $Tendency = 0$ . При этом значение аффинитета  $Aff$ , вычисленное по формуле (3), окажется минимально возможным. Если для некоторой модели прогнозирования окажется, что  $Tendency = 0$ , то этот факт будет свидетельствовать лишь о полном совпадении тенденций ВР. При этом значение средней относительной ошибки прогнозирования  $AFER$  может оказаться существенно далеким от нулевого. В связи с этим при вычислении аффинитета  $Aff$  антитела в формуле (3) учет значения показателя несовпадения тенденций  $Tendency$  реализован в виде множителя, представленного с помощью суммы  $(1 + Tendency)$ , что позволит при реализации МАКО в случае, когда  $Tendency = 0$ , продолжить поиск лучших вариантов моделей прогнозирования, имеющих меньшие значения средней относительной ошибки прогнозирования  $AFER$ .

Пусть модифицированный показатель несовпадения тенденций имеет вид:

$$Tendency_M = 1 + Tendency \quad (4)$$

В ходе отбора «лучших» антител и соответствующих им моделей прогнозирования при реализации МАКО предлагается считать, что антитело  $Ab_1$  лучше антитела  $Ab_2$ , если наряду с условием:

$$Aff_1 < Aff_2; \quad (5)$$

выполняются условия:

$$AFER_1 \leq AFER_2 \text{ и } Tendency_1 \leq Tendency_2. \quad (6)$$

При использовании такого подхода при реализации МАКО в качестве «лучших» антител в новом поколении МАКО будут полагаться антитела, имеющие значение аффинитета  $Aff$ , не больше, чем у «лучшего» антитела предыдущего поколения МАКО, и, кроме того, характеризующиеся неувеличением значения показателя несовпадения тенденций  $Tendency$  при одновременном неувеличении значения средней относительной ошибки прогнозирования  $AFER$ .

Для описанных выше вариантов формирования антител (на основе СБД и ППСБД) реализация МАКО осуществляется аналогичным образом. При реализации МАКО искомая аналитическая зависимость  $F$  кодируется в виде антитела  $Ab$ , которое должно обеспечивать распознавание антигенов  $Ag$  – элементов прогнозируемого ВР  $d(t)$  ( $t = 1, m$ ) – таким образом, чтобы осуществлялась минимизация аффинитета  $Aff(3)$  при соблюдении условий (5) и (6).

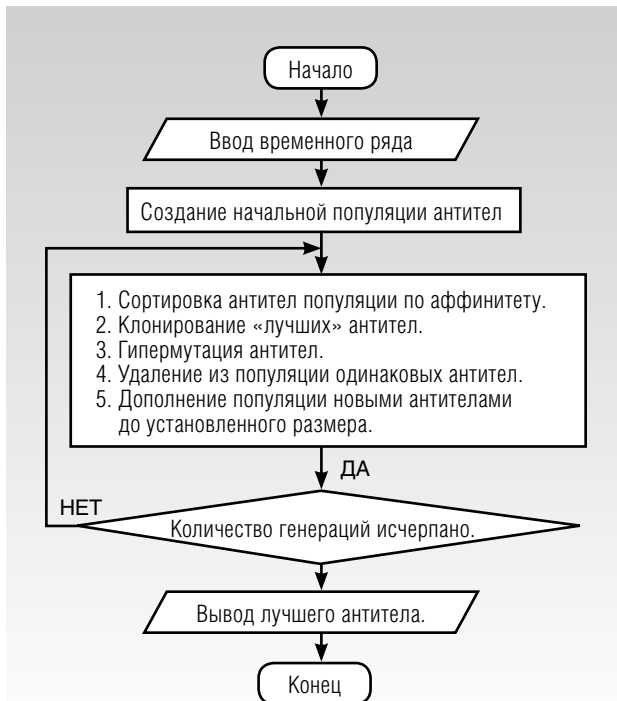


Рис. 4. Укрупненная схема МАКО

Укрупненная схема МАКО, используемого при разработке моделей прогнозирования  $k$ -го порядка, приведена на рис. 4.

МАКО относится к группе эволюционных алгоритмов [14], реализующих возможность одновременного поиска среди нескольких альтернативных вариантов решений и выбора лучших из них. Главной отличительной особенностью МАКО является использование механизмов клональной селекции (воспроизводства), гипермутации (изменения) и супрессии антител в ходе смены поколений популяций антител [18, 22]. При этом именно механизм супрессии, обеспечивающий удаление и уничтожение «похожих» антител, позволяет обходить локальные минимумы целевой функции (аффинитета) и расширять, при необходимости, область поиска решения.

МАКО является модификацией алгоритма клонального отбора, предложенного к применению для разработки моделей прогнозирования в работе [16], поскольку реализует корректное преобразование в аналитические зависимости антител, формируемых случайным образом на основе СБД, благодаря предложенному в [21, 22] и описанному выше подходу, основанному на использовании трёх символьных алфавитов для представления узлов СБД.

МАКО включает в себя подготовительную часть, реализующую формирование начальной популяции антител размером  $P$ , и итерационную часть, состоящую из следующих шагов: упорядочение антител по возрастанию значений аффинитета  $Aff$ ; отбор и клонирование определенной доли «лучших» антител, имеющих наименьшие значения аффинитета  $Aff$ ; гипермутация клонов антител; самоуничтожение клонов антител, «похожих» на другие клоны и антитела текущей популяции; вычисление аффинитета клонов антител и формирование новой популяции антител; супрессия полученной популяции; генерация новых антител и добавление их к текущей популяции до получения ее исходного размера  $P$ ; проверка условия достижения заданного количества поколений  $G$  и завершение работы МАКО при выполнении этого условия, а в противном случае – повтор итерационной части. Подробное описание МАКО дано в работе [22].

### 3. Экспериментальные исследования

Предлагаемый подход к оценке качества моделей прогнозирования на основе СБД, реализующий оценку аффинитета антител с помощью формулы (3) при соблюдении условий (5) и (6), был исполь-

зован при реализации МАКО в ходе решения задач краткосрочного прогнозирования тенденций рынка труда в России, в частности, для прогнозирования ВР, описывающего «экономически активное население» (в тыс. чел.). Одновременно в ходе сравнительного анализа было реализовано построение моделей прогнозирования на основе СБД и МАКО с применением традиционно используемой для оценки аффинитета антител средней относительной ошибки прогнозирования *AFER* (1).

При разработке моделей прогнозирования использовались 18 известных значений ВР  $d(t)$  ( $t = \overline{1,18}$ ) с февраля 1999 года по август 2003 года для отсчетов времени по месяцам: февраль, май, август и ноябрь [11], а оценка качества прогнозирования выполнялась для 3 значений ВР (ноябрь 2003 года, февраль 2004 года и май 2004 года), то есть на 3 шага вперед.

На рис. 5 приведены результаты прогнозирования на основе модели 4-го порядка, полученной при использовании предлагаемого (по формуле (3)) подхода к оценке качества моделей прогнозирования в процессе смены 2000 поколений антител. Значения средних относительных ошибок прогнозирования *AFER* и на три шага вперед составили соответственно 0,261 и 0,389, количество несопадающих тенденций равно 0 как для 13 тенденций, используемых при построении модели прогнозирования, так и для тенденций при прогнозировании на три шага вперед, что свидетельствует о применимости разработанной модели для выполнения краткосрочного прогнозирования данного ВР.

При этом «лучшее» антитело имеет вид:

$$- + - * S - Q * Q / C - - c Q @ S f S d C g C f S c,$$

а аналитическая зависимость, определяющая модель прогнозирования 4-го порядка, записывается соответственно как:

$$F(d(t-1), d(t-2), d(t-3), d(t-4)) = \sin(\sqrt{\cos(\sin(d(t-4))) - \cos(d(t-2))}) / \cos(d(t-1)) * \sin(d(t-3)) - \sin(d(t-2)) * \sqrt{1071900} + d(t-4).$$

Аналогичные результаты прогнозирования для рассматриваемого примера могут быть получены и при использовании традиционного (по формуле (1)) подхода к оценке качества моделей прогнозирования, однако их получение может сопровождаться хаотичными изменениями значений показателя несопадения тенденций *Tendency* (2), поскольку поиск будет вестись только в направлении убывания значений средней относительной ошибки прогно-

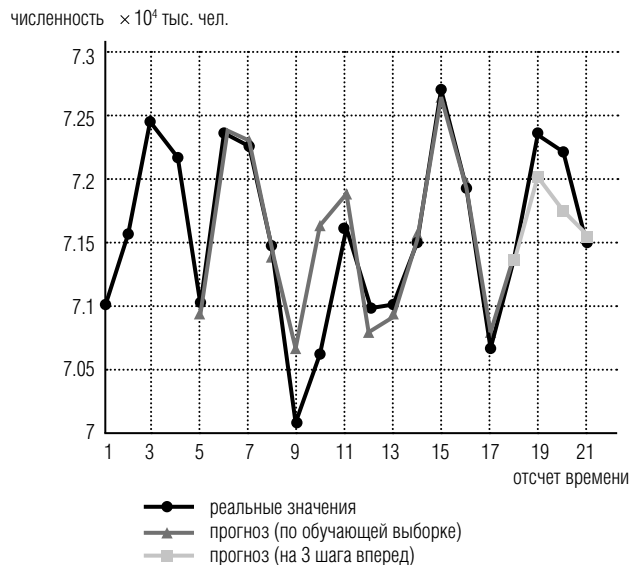


Рис. 5. Результаты прогнозирования

зирования *AFER* (1). Использование предлагаемого подхода в ходе смены поколений МАКО позволяет сузить область поиска искомого решения.

Так как использование МАКО не гарантирует нахождение оптимальной модели прогнозирования, то особое внимание должно уделяться вопросу признания модели прогнозирования в качестве «приемлемой» («субоптимальной»).

На рис. 6 и 7 приведены соответственно графические зависимости для средней относительной ошибки прогнозирования *AFER* (1) и модифицированного показателя несопадения тенденций *Tendency<sub>M</sub>* (4), полученные при использовании предлагаемого (по формуле (3)) и традиционного (по формуле (1)) подходов к оценке качества моделей прогнозирования в процессе смены 1000 поколений одной реализации МАКО.

Как видно из рис. 6, в ходе реализации МАКО при использовании предлагаемого подхода к оценке качества моделей прогнозирования наблюдается постепенное уменьшение значений показателя *Tendency<sub>M</sub>* и, соответственно, количества несопадающих тенденций «лучшего» антитела, в то время как при использовании традиционного подхода к оценке качества моделей прогнозирования возможно скачкообразное уменьшение и увеличение значений показателя *Tendency<sub>M</sub>* и, соответственно, количества несопадающих тенденций «лучшего» антитела (рис. 7). При этом в обоих случаях наблюдается постепенное уменьшение значений средней относительной ошибки прогнозирования *AFER* «лучшего» антитела.



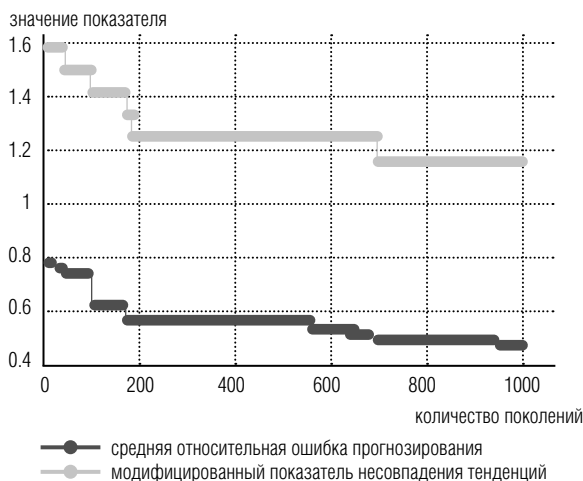


Рис. 6. Графические зависимости для показателей оценивания качества моделей прогнозирования при использовании предлагаемого подхода

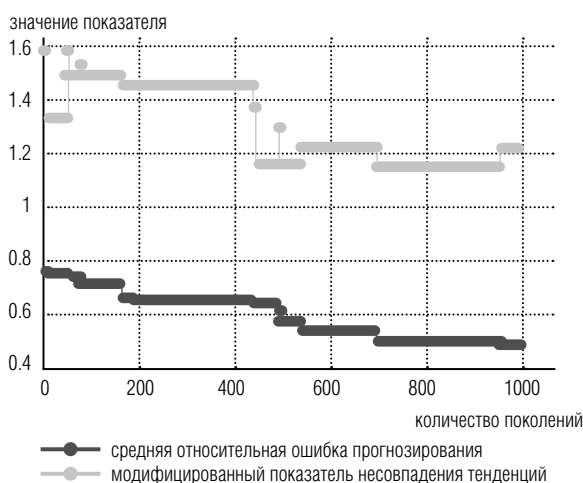


Рис. 7. Графические зависимости для показателей оценивания качества моделей прогнозирования при использовании традиционного подхода

В результате при применении традиционного подхода к оценке качества моделей прогнозирования «приемлемой» моделью может быть признана та, которая обладает меньшим значением средней относительной ошибки прогнозирования *AFER* (1), но при этом «плохим» значением показателя несовпадения тенденций *Tendency* (2).

Использование предлагаемого подхода к оценке качества моделей прогнозирования позволит сбалансировать значения средней относительной ошибки прогнозирования *AFER* (1) и показателя несовпадения тенденций *Tendency* (2). При этом удастся в ходе смены поколений МАКО исключить из дальнейшего рассмотрения антитела и соответствующие им модели прогнозирования с худшими значениями показателя несовпадения тенденций *Tendency* (2), поскольку в процессе смены поколений МАКО для антител будет запрещено увеличение значения показателя несовпадения тенденций *Tendency* (2).

#### 4. Заключение

Предложенный подход к оценке качества моделей прогнозирования на основе СБД и МАКО обеспечивает совместный одновременный учет «лучших» значений средней относительной ошибки прогнозирования *AFER* (1) и показателя несовпадения тенденций *Tendency* (2), позволяя при реализации МАКО исключить из дальнейшего рассмотрения модели прогнозирования, характеризующиеся большими значениями показателя несовпадения тенденций *Tendency*.

Получаемая на основе СБД и МАКО функциональная зависимость не является аналитической зависимостью исследуемого ВР, а представляет собой искусственно подобранную с использованием МАКО функцию, которая минимизирует введенный критерий качества (3), но, при этом, не претендует на содержательную интерпретацию по отношению к источнику ВР.

Модели прогнозирования на основе СБД и МАКО позволяют существенно сократить время поиска функциональной зависимости, наилучшим образом (с точки зрения одновременной минимизации средней относительной ошибки прогнозирования *AFER* и показателя несовпадения тенденций *Tendency*) описывающей известные значения коротких ВР, и могут быть рекомендованы для решения задач краткосрочного прогнозирования (на 1-3 шага вперед). ■

#### Литература

1. Айвазян С.А., Мхитарян В.С. Прикладная статистика и основы эконометрики. М.: Юнити, 1998. 1022 с.
2. Андерсен Т. Статистический анализ временных рядов. М.: Мир, 1976. 756 с.
3. Mills T.C., Markellos R.N. The econometric modelling of financial time series. Cambridge: Cambridge University Press, 2008. 472 p.
4. Woodward W.A., Gray H.L., Elliott A.C. Applied time series analysis. Statistics: A series of textbooks and monographs. CRC Press, 2011. 564 p.

5. Chen S.M. Forecasting enrollments based on high-order fuzzy time series // *Cybernetic Systems*. 2002. Vol. 33. № 1. P. 1–16.
6. Hwang J.-R., Chen S.-M., Lee C.-H. Handling forecasting problems using fuzzy time series // *Fuzzy Sets and Systems*. 1998. Vol. 100. P. 217–228.
7. Cao L.J., Tay Francis E.H. Support vector machine with adaptive parameters in financial time series forecasting // *IEEE Transaction on Neural Networks*. Vol. 14. № 6. November 2003. P. 1506–1518.
8. Raicharoen T., Lursinsap C., Sanguanbhoki P. Application of critical support vector machine to time series prediction // *Circuits and Systems*, 2003. ISCAS '03. Proceedings of the 2003 International Symposium. 2003. Vol. 5. P. V-741–V-744.
9. Sah M., Degtiarev K.Y. Forecasting enrollment model based on first-order fuzzy time series // *Proceeding of International Conference on Computer Intelligence*. 2004. Vol. 1. P. 375–378.
10. Su S.F., Li S.H. Neural network based fusion of global and local information in prediction time series // *Proceedings of the 2003 IEEE International Joint Conference on Systems, Man and Cybernetics*. 2003. Vol. 5. P. 4445–4450.
11. Демидова Л.А. Разработка однофакторных нечетких моделей для анализа тенденций временных рядов с использованием генетического алгоритма // *Научно-технические ведомости СПбГПУ*. 2007. № 52 (2). С. 156–164.
12. Демидова Л.А. Прогнозирование тенденций временных рядов на основе однофакторной нечеткой модели с использованием дискретных нечетких множеств второго типа и генетического алгоритма // *Бизнес-информатика*. 2008. № 4 (6). С. 46–53.
13. Демидова Л.А., Скворцова Т.С. Двухфакторная модель прогнозирования временных рядов с короткой длиной актуальной части с использованием генетического алгоритма // *Системы управления и информационные технологии*. 2010. № 1 (39). С. 7–12.
14. Джонс М.Т. Программирование искусственного интеллекта в приложениях / Пер. с англ. А.И.Осипов. М.: ДМК Пресс, 2004. 312 с.
15. De Castro L.N., Von Zuben F.J. The clonal selection algorithm with engineering applications // *Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference (GECCO'00), Workshop on Artificial Immune Systems and Their Applications*. Las Vegas, USA, July 2000. p. 36–37.
16. Бидюк П.И., Баклан И.В., Литвиненко В.И., Фёфелов А.А. Алгоритм клонального отбора для прогнозирования нестационарных динамических систем // *Штучний інтелект*, 2004. № 4. С. 89–99.
17. Демидова Л.А., Титов С.Б. Исследование влияния основных параметров алгоритма функционирования искусственной иммунной сети на качество кластеризации объектов // *Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета*. 2012. № 40. С. 54–60.
18. Искусственные иммунные системы и их применение / Под ред. Д.Дасгупты. М.: Физматлит, 2006. 344 с.
19. Кравец О.Я. Перспективные подходы к исследованию технологий менеджмента в сложных системах управления // *Экономика и менеджмент систем управления*. 2014. Т. 1, № 1 (11). С. 93–100.
20. Астахова Н.Н., Демидова Л.А. Использование почти полных строго бинарных деревьев и модифицированного алгоритма клонального отбора при разработке моделей прогнозирования временных рядов с короткой актуальной частью // *Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета*. 2013. № 4-2 (46). С. 89–96.
21. Демидова Л.А., Корячко А.В., Скворцова Т.С. Модифицированный алгоритм клонального отбора для анализа временных рядов с короткой длиной актуальной части // *Системы управления и информационные технологии*. 2010. Т. 42, № 4.1. С. 131–136.
22. Демидова Л.А. Модели прогнозирования временных рядов с короткой актуальной частью на основе модифицированного алгоритма клонального отбора // *Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета*. 2012. № 39-2. С. 64–71.
23. Демидова Л.А., Пылькин А.Н., Скворцов С.В., Скворцова Т.С. Гибридные модели прогнозирования коротких временных рядов. М.: Горячая линия – Телеком, 2012. 208 с.
24. Паклин Н.Б., Орешков В.И. Бизнес-аналитика: от данных к знаниям. СПб.: Питер, 2013. 704 с.
25. Белов В.В. Проблемы факторного прогнозирования социально-экономических показателей // *Вестник Московского государственного университета приборостроения и информатики*. 2005. № 2. С. 116.
26. Терехов А.А. Идентификация статистического материала и консолидация временных рядов // *Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета*, 2009. № 27. С. 62–70.
27. Калмыкова О.В., Грибанов В.П., Сорока Р.И. Основы алгоритмизации и программирования: Учебное пособие. М.: МЭСИ, 2004. 220 с.

## AN APPROACH TO EVALUATION OF FORECASTING MODELS QUALITY USING STRICTLY BINARY TREES AND MODIFIED CLONAL SELECTION ALGORITHM

**Liliya DEMIDOVA**

Professor, Department of Computational and Applied Mathematics,  
Faculty of Computer Engineering,  
Ryazan State Radio Engineering University

Address: 59/1, Gagarina street, Ryazan, 390005, Russian Federation

E-mail: liliya.demidova@rambler.ru

Models of short-term forecasting of short-time series on the base of strictly binary trees and modified clonal selection algorithm are considered. These enable to increase forecast accuracy by selecting analytical dependences to be formed on the antibodies base, coding strictly binary trees and adequately describing known values of time series.

The antibody constitutes a symbolical line, which elements are selected from three preset symbolical alphabets: alphabet of arithmetic operations; alphabet of functionalities and alphabet of terminals. When implementing the modified clonal selection algorithm the use of three symbolical alphabets ensures correct transformation to analytical dependences of antibodies formed in a random way, which structure can be described by means of strictly binary trees.

When antibodies are coded on the base of strictly binary trees all knots of strictly binary tree are consecutively recorded in a symbolical line, beginning from left to right and from bottom to top. When analytical dependences are formed on the base of antibodies the recursive procedure of antibodies interpretation is applied.

The modified clonal selection algorithm belongs to a group of evolutionary algorithms, which enable to carry out simultaneous search among several decision alternatives to make the best choice. The main distinctive feature of the modified clonal selection algorithm is use of mechanisms of clonal selection, hypermutation and suppression during alternation of generations of antibodies populations, used to form required analytical dependences.

A new approach to quality estimation of forecasting models on the base of strictly binary trees and modified clonal selection algorithm has been offered and investigated. The paper has shown the expediency of simultaneous accounting of mean relative forecast error rate and tendencies discrepancy indicator in antibodies affinity calculations for the purpose of forecasting models quality estimation to be defined by involving analytical dependences, formed on the base of strictly binary trees. When applying the modified clonal selection algorithm the considered approach to forecasting models quality estimation enables to exclude from further consideration forecasting models, which are characterized by great values of tendencies discrepancy indicator.

The offered forecasting models enable to reduce significantly time needed to retrieve an analytical dependence, which gives the best description of short time series known values, and can be recommended to address short-term forecasting tasks (for 1–3 steps forward).

**Keywords:** time series, forecasting model, strictly binary tree, modified clonal selection algorithm, mean relative forecast error rate, tendencies discrepancy indicator, affinity.

**Citation:** Demidova L.A. (2015) Podhod k ocenke kachestva modelej prognozirovaniya na osnove strogo binarnyh derev'ev i modifitsirovannogo algoritma klonal'nogo otbora [An approach to evaluation of forecasting models quality using strictly binary trees and modified clonal selection algorithm]. *Business Informatics*, no. 1 (31), pp. 58–68 (in Russian).

### References

1. Ayvazyan S.A., Mkhitarian V.S. (1998) *Prikladnaya statistika i osnovy ekonometriki* [Applied statistics and fundamentals of econometrics]. Moscow: Uniti. (in Russian)
2. Andersen T. (1976) *Statisticheskii analiz vremennyh ryadov* [Time series' statistical analysis]. Moscow: Mir. (in Russian)
3. Mills T.C., Markellos R.N. (2008) *The econometric modelling of financial time series*. Cambridge: Cambridge University Press.
4. Woodward W.A., Gray H.L., Elliott A.C. (2011) *Applied time series analysis*. Statistics: A series of textbooks and monographs. CRC Press.

5. Chen S.M. (2002) Forecasting enrollments based on high-order fuzzy time series. *Cybernetic Systems*, vol. 33, no. 1, pp. 1–16.
6. Hwang J.-R., Chen S.-M., Lee C.-H. (1998) Handling forecasting problems using fuzzy time series. *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 100, pp. 217–228.
7. Cao L.J., Tay Francis E.H. (2003) Support vector machine with adaptive parameters in financial time series forecasting. *IEEE Transaction on Neural Networks*, vol. 14, no. 6, pp. 1506–1518.
8. Raicharoen T., Lursinsap C., Sanguanbhoki P. (2003) Application of critical support vector machine to time series prediction. *Circuits and Systems*, 2003. ISCAS '03. Proceedings of the 2003 International Symposium, vol. 5, pp. V-741–V-744.
9. Sah M., Degtiarev K.Y. (2004) Forecasting enrollment model based on first-order fuzzy time series. *Proceeding of International Conference on Computer Intelligence*, vol. 1, pp. 375–378.
10. Su S.F., Li S.H. (2003) Neural network based fusion of global and local information in prediction time series. *Proceedings of the 2003 IEEE International Joint Conference on Systems, Man and Cybernetics*, vol. 5, pp. 4445–4450.
11. Demidova L.A. (2007) Razrabotka odnofaktornyh nechetkih modelei dlya analiza tendencii vremennyh ryadov s ispol'zovaniem geneticheskogo algoritma [Development of one-factorial fuzzy models for the analysis of time series' tendencies by means of genetic algorithm]. *Nauchno-tehnicheskie vedomosti SPbGPU. Informatica. Upravlenie. Telekommunikatsii*, no. 52 (2), pp. 156–164. (in Russian)
12. Demidova L.A. (2008) Prognozirovaniye tendencii vremennyh ryadov na osnove odnofaktornoi nechetkoi modeli s ispol'zovaniem diskretnyh mnogestv vtorigo tipa i geneticheskogo algoritma [Tendencies' Forecasting of time series on the base of one-factor fuzzy model by means of discrete type-2 fuzzy sets and genetic algorithm]. *Business Informatics*, no. 4 (6), pp. 46–53. (in Russian)
13. Demidova L.A., Skvortsova T.S. (2010) Dvuhfaktornaya model' prognozirovaniya vremennyh ryadov s korotkoi dlinoi aktual'noi chasti s ispol'zovaniem geneticheskogo algoritma [Two-factorial forecasting model of time series with a short length of actual part by means of genetic algorithm]. *Sistemy upravleniya i informacionnye tehnologii*, no. 1 (39), pp. 7–12. (in Russian)
14. Dzhons M.T. (2004) *Programmirovaniye iskusstvennogo intellekta v prilozheniyah* [Programming of artificial intelligence in applications]. Moscow: DMK Press. (in Russian)
15. De Castro L.N., Von Zuben F.J. (2000) The clonal selection algorithm with engineering applications. *Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference (GECCO'00), Workshop on Artificial Immune Systems and Their Applications, Las Vegas, USA, July 2000*, pp. 36–37.
16. Biduk P.I., Baklan I.V., Litvinenko V.I., Fefelov A.A. (2004) Algoritm klonal'nogo otbora dlya prognozirovaniya nestacionarnyh dinamicheskikh sistem [Clonal selection algorithm for forecasting of non-stationary dynamic systems]. *Shtuchnii intellekt*, no. 4, pp. 89–99. (in Russian)
17. Demidova L.A., Titov S.B. (2012) Issledovaniye vliyaniya osnovnykh parametrov algoritma funkcionirovaniya iskusstvennoi immunnnoi seti na kachestvo klasterizatsii ob'ektov [Key parameters' influence research of an artificial immune network functioning algorithm on the objects' clusterization quality]. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*, no. 40, pp. 54–60. (in Russian)
18. Dasgupta D., ed. (2006) *Iskusstvennyye immunnnyye seti i ih primeneniye* [Artificial immune systems and their application]. Moscow: Fizmatlit. (in Russian)
19. Kravets O. Ya. (2014) Perspektivnyye podhody k issledovaniyu tehnologii menedjmenta v slozhnykh sistemah upravleniya [Perspective approaches to research of management technologies in difficult control systems]. *Ekonomika i menedjment system upravleniya*, vol. 1, no. 1 (11), pp. 93–100. (in Russian)
20. Astakhova N. N., Demidova L.A. (2013) Ispol'zovaniye pochty polnykh strogo binarnykh derev'ev i modifitsirovannogo algoritma klonal'nogo otbora pri razrabotke modelei prognozirovaniya vremennyh ryadov s korotkoi aktual'noi chast'yu [Using of the almost complete strictly binary trees and the modified clonal selection algorithm for the forecasting models' development of the time series with short actual part]. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*, no. 4-2 (46), pp. 89–96. (in Russian)
21. Demidova L.A., Koryachko A.V., Skvortsova T.S. (2010) Modifitsirovannyi algoritm klonal'nogo otbora dlya analiza vremennyh ryadov s korotkoi dlinoi aktual'noi chasti [The modified clonal selection algorithm for the analysis of time series with a short length of actual part]. *Sistemy upravleniya i informacionnye tehnologii*, vol. 42, no. 4.1, pp. 131–136. (in Russian)
22. Demidova L.A. (2012) Modeli prognozirovaniya vremennyh ryadov s korotkoi aktual'noi chast'yu na osnove modifitsirovannogo algoritma klonal'nogo otbora [Forecasting models for time series with a short actual part on the base of modified clonal selection algorithm]. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*, no. 39-2, pp. 64–71. (in Russian)
23. Demidova L.A., Pylkin A.N., Skvortsov S.V., Skvortsova T.S. (2012) *Gibridnyye modeli prognozirovaniya korotkikh vremennyh ryadov* [Hybrid forecasting models of short time series]. Moscow: Goryachaya liniya – Telekom. (in Russian)
24. Paklin N.B., Oreshkov V.I. (2013) *Biznes-analitika: ot dannykh k znaniyam* [Business analytics: from data to knowledge]. St. Petersburg: Piter. (in Russian)
25. Belov V.V. (2005) Problemy faktornogo prognozirovaniya social'no-ekonomicheskikh pokazatelei [Factorial forecasting problems of socio-economic indexes]. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta priborostroeniya i informatiki*, no. 2, pp. 116. (in Russian)
26. Terekhov A.A. (2009) Identifikatsiya statisticheskogo materiala i konsolidatsiya vremennyh ryadov [Identification of a statistical material and time series' consolidation]. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*, no. 27, pp. 62–70. (in Russian)
27. Kalmykova O.V., Gribov V.P., Soroka P.I. (2004) *Osnovy algoritimizatsii i programmirovaniya: uchebnoye posobie* [Bases of algorithmization and programming: manual]. Moscow: MESI. (in Russian)

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ ТОЛПЫ НА ОСНОВЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ДИНАМИКИ ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ АГЕНТОВ

**А.Л. БЕКЛАРЯН**

преподаватель кафедры бизнес-аналитики, факультет бизнес-информатики,  
Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»

Адрес: 101000, г. Москва, ул. Мясницкая, д. 20

E-mail: abeklaryan@hse.ru

**А.С. АКОПОВ**

доктор технических наук, профессор кафедры бизнес-аналитики,  
факультет бизнес-информатики, Национальный исследовательский  
университет «Высшая школа экономики»

Адрес: 101000, г. Москва, ул. Мясницкая, д. 20

E-mail: aakopov@hse.ru

В статье развивается феноменологический подход к моделированию поведения толпы, предложенный в работе [1]. Рассматривается непрерывная стохастическая агентная модель движения людей в ограниченном пространстве с заданной геометрией с использованием уточнений как состояния агента, так и системы принятия решений агентом, приведенных в моделях Хелбинга [2, 3, 4] (молекулярный подход). Такая интеграция представляется наиболее перспективным развитием данного класса задач, ввиду того, что феноменологический подход (модель Бекларяна–Акопова) позволяет привнести естественную дискретизацию задачи с последующим вычислением приращения всех характеристик агентов в каждый момент времени, а использование элементов молекулярного подхода (модели Хелбинга) позволяет описать максимально реалистичную систему принятия решений агентом. Это снимает сложный вопрос численного интегрирования уравнений Ньютона, лежащих в основе моделей Хелбинга, и предлагает явные вычисления всех характеристик системы.

В результате в системе имитационного моделирования AnyLogic создана агентная модель, позволяющая исследовать динамику перемещения агентов с учетом «эффекта толпы» при различных сценариях, в частности, в условиях экстремальных ситуаций при наличии эффектов «давки» и «турбулентности».

**Ключевые слова:** имитационное моделирование, динамика толпы, агентное моделирование, AnyLogic.

**Цитирование:** Бекларян А.Л., Акопов А.С. Моделирование поведения толпы на основе интеллектуальной динамики взаимодействующих агентов // Бизнес-информатика. 2015. № 1 (31). С. 69–77.

## 1. Введение

**К**оллективное поведение людей в замкнутом пространстве таит в себе формы поведения, опасные для жизни человека. Особая роль отводится ситуациям, при которых возникает массовая паника, например, вследствие возникнове-

ния чрезвычайной ситуации (ЧС). Так, в результате пожара в ночном клубе «Хромая лошадь» (5 декабря 2009 года) погибло 156 человек и 64 человека получили тяжкий вред здоровью [5]. Давка, произошедшая 22 ноября 2010 года в столице Камбоджи во время традиционного камбоджийского праздника – фестиваля воды, – повлекла за собой гибель

456 человек, еще более пятисот получили ранения различной степени тяжести [6]. При этом стоит заметить, что во многих ситуациях основные людские потери возникают не столько в сам момент возникновения ЧС, а являются следствиями дальнейших событий (задымление, эффект толпы, давка и т.д.), а также зависят от характеристик внешней системы (геометрия помещения, расположение выходов и т.д.), существенно влияющих на возможность эффективной эвакуации. Таким образом, паника и дальнейшая давка многократно увеличивают число жертв среди людей даже в ситуациях, напрямую не угрожающих жизни.

К сожалению, последствия ЧС являются трудно-прогнозируемыми, так как зависят от множества факторов. Кроме того, большая часть наблюдений за местами скопления людей, и тем более за процессом поведения толпы в той или иной ЧС, относятся либо к закрытой информации, либо, как минимум, к труднодоступной, не говоря уже о том, что само множество однотипных ЧС статистически мало и не дает возможности построения точной аналитической модели.

Несмотря на высокий интерес к проблематике, долгое время основные работы по данной теме были посвящены психологическим и социальным аспектам вопроса. Например, в работе [7] детально описаны условия и причины возникновения паники, которые сводятся к доминированию коллективного бессознательного как основного фактора. То есть солидная часть исследователей рассматривает толпу с фрейдистской точки зрения, основанной на гипотезе, что люди как часть толпы действуют иначе, чем люди как индивиды [8, 9, 10]. Совокупность разумов членов группы синергируются в некий коллективный разум. Соответственно, и предлагаемые решения проблемы возникновения паники также основаны на таком подходе [11], который мы назовем *наивным*.

На фоне описанных исследований изучение толпы с привлечением сложных математических моделей началось сравнительно недавно. Здесь стоит отметить работы пионера этой области — Дирка Хелбинга. В его работе 2000 года в журнале Nature [2] впервые удалось воспроизвести ряд характерных для толпы явлений, таких, как образование пробок, вовлечение новых людей в панику и другие, с помощью математического моделирования. В основе этой работы лежала идея применения к толпе людей методов молекулярной динамики, где психологические и социальные факторы рассматриваются как потенциалы взаимодействия между молекулами-людьми

[12]. Такой подход будем называть *молекулярным*. На основе модели Хелбинга были построены ряд других моделей [13, 14, 15, 16], рассматривающие различные аспекты возможных усложнений системы взаимодействий. Правда, основная часть моделей основывается на двухчастичном взаимодействии и игнорирует тот факт, что в определенной точке пространства сталкиваются трое и более людей. Тем не менее, в работе [4] была рассмотрена модель много-частичного взаимодействия, которая привела к появлению модельного эффекта турбулентности толпы, который не раз был зарегистрирован в реальных ситуациях. Здесь стоит упомянуть работы группы российских ученых, Д.А.Брацуна [17, 18] и его коллег, ставящие своей целью создание агентной модели поведения толпы на основе моделей Хелбинга. Отличительной особенностью моделей Брацуна является сложность геометрии пространства и формирование агентом плана выхода из многоуровневого разветвленного помещения. К сожалению, дальнейшее усложнение моделей Хелбинга, как в части взаимодействия людей, так и в части анализа окружающей обстановки, ведет к громоздкой процедуре совместного интегрирования уравнений движений, что требует либо распараллеливания вычислительных процессов, либо сверхпроизводительных процессоров.

Наряду с двумя описанными подходами, в работах [1, 19] был предложен *феноменологический* подход, в рамках которого формализована агентная модель поведения толпы. В такой модели априори определяются состояния агентов с их характеристиками, правила взаимодействия агентов и правила принятия решений. Это позволяет смоделировать динамику состояния системы как результат взаимодействия автономных агентов, чья система принятия решений задается в явном виде, а не является результатом решения системы уравнений Ньютона. При этом удается заложить такие эффекты, как турбулентность толпы, волны сжатия толпы и другие, которые в рамках моделей Хелбинга требуют задания соответствующих потенциалов, что, в свою очередь, ведет к поиску уникального динамического решения для весьма сложной системы уравнений и порождает самостоятельную неординарную задачу. Также стоит отметить, что при феноменологическом подходе удастся добавить ряд стохастических процессов в систему принятия решений агента с целью приближения моделируемой динамики к реально наблюдаемым случайным флуктуациям в поведении толпы.

Среди других работ, нацеленных на создание программно-графического пакета реализации человеческого поведения, особое место занимает коммерческий продукт DI-Guy [20]. Как следует из официального релиза компании, основным заказчиком программного продукта является министерство обороны США и крупнейшие военно-промышленные корпорации (Boeing, BAE Systems, Raytheon). То есть создание систем прогнозирования человеческого поведения также является предметом коммерциализации и представляет большой интерес как для государственных структур, так и для частных компаний.

В результате учета имеющихся моделей и подходов, а также исследований по психологии толпы, были сформулированы основные априорные предположения, которые легли в основу данной агентной модели поведения при ЧС. Среди этих предположений необходимо отметить следующие:

- ◆ частичная или полная потеря ориентации в пространстве и во времени;
- ◆ высокая степень турбулентности толпы, т.е. наличие хаотичного движения во всех направлениях в условиях высокой плотности агентов;
- ◆ существенное замедление скорости передвижения при определенных условиях (ранение, уплотнение и т.д.);
- ◆ стремление к ближайшему выходу в случае нахождения выхода в пределах видимости;
- ◆ стремление к присоединению к ближайшей группе агентов (эффект притяжения толпы).

В данной работе рассматривается непрерывная стохастическая агентная модель в ограниченном пространстве с заданной геометрией, основанная на феноменологической модели Бекларяна–Акопова [1, 19] с использованием уточнений характеристик агента и системы принятия решений агентом, приведенных в моделях Хелбинга [2, 3, 4]. Такая интеграция видится наиболее перспективным развитием данного класса задач, ввиду того, что феноменологический подход (модели Бекларяна–Акопова) позволяет привести естественную дискретизацию задачи с последующим вычислением приращения всех характеристик агентов в каждый момент времени. Это снимает вопрос численного интегрирования уравнений Ньютона, и предлагает явные вычисления всех характеристик системы. С другой стороны, уточнение характеристик агента и его системы принятия решений, заимствованное из модели Хелбинга, позволяет получить максимально реалистичную динамику толпы.

Отметим, что в рассматриваемых моделях совокупность агентов является совокупностью индивидуумов, лишенных каких-либо общих изначальных целеполаганий.

## 2. Модель движения толпы на основе интеллектуальной динамики агентов

В предлагаемой модели реализуется концепция перехода от фиксированных значений ряда показателей, отражающих как геометрию помещения, так и физику процесса перемещения агентов, к представлению их в качестве управляющих параметров модели. В результате удастся построить гибкую универсальную модель, позволяющую варьировать управляющими параметрами и, как следствие, калибровать модель с целью максимизации правдоподобия с реальными процессами. Также построенная модель допускает дальнейшее усложнение во всех аспектах (геометрия помещения, механика взаимодействия агентов, характеристики самих агентов и т.д.) и введение новых уравнений связи и условий.

Предложенная модель имеет следующую структуру. Задано ограниченное пространство прямоугольной формы с диаметральными выходами. Все пространство поделено на одинаковые области также прямоугольной формы, в каждой из которой задано свое распределение агентов по площади. Каждый агент характеризуется своим состоянием и правилами взаимодействия с другими агентами. При этом как состояние, так и правила перемещения каждого из агентов являются функциями от статуса ситуации, которая характеризует степень экстремальности обстановки в восприятии агента.

Параметры модели, характеризующие геометрию пространства, состояние агента и правила взаимодействия агентов, делятся на две группы: параметры, принимающие абсолютные значения и параметры, требующие калибровки. Первая группа параметров (координаты углов помещения, координаты выходов, количество агентов и др.) состоит из показателей, которые подаются на вход модели и могут принимать любые значения. Вторая группа параметров отвечает за правила поведения агентов и требует проведения экспериментов с целью калибровки их значений.

В условии отсутствия ЧС основное стремление агента – покинуть помещение с наименьшими потерями, в которые входят отклонение от прямолинейной траектории движения к выходу, пересечение с другими агентами, замедление скорости движения

и ряд других параметров. Среди допущений модели стоит выделить тот факт, что рассматривается одноэтажное помещение прямоугольной формы с центральными выходами. Приведем формальное описание модели, используя следующие обозначения:

$(a_0, b_0)$  – координата левого верхнего угла помещения (*параметр*);

$(a_{11}, b_{11}); (a_{12}, b_{12})$  – координаты вершин первого выхода (*параметр*);

$(a_{21}, b_{21}); (a_{22}, b_{22})$  – координаты вершин второго выхода (*параметр*);

$len_1, len_2$  – длина и ширина помещения, соответственно (*параметр*).

Геометрия помещения (активного пространства) представлена на *рис. 1*.

Для характеристик активного пространства имеет место ряд естественных ограничений. Само помещение разбито на  $M$  прямоугольных областей за счет равномерно распределенных горизонтальных и вертикальных прямых. Количество клеток по вертикали ( $m_{vert}$ ) и горизонтали ( $m_{hor}$ ) также является *параметрами* моделирования. Очевидно, что  $M = m_{vert} \times m_{hor}$ .

Количество агентов в клетке  $K_l$  в начальный момент обозначается  $n_{K_l}$ . Имеет место равенство

$$\sum_{l=1}^M n_{K_l} = N.$$

В каждой клетке  $K_l, l = 1, 2, \dots, M$  задается собственное начальное распределение положений агентов в начальный момент времени, обозначаемое области  $F_{K_l}$ . Распределение  $F_{K_l}$  вместе с  $n_{K_l}$  также являются *параметрами*.

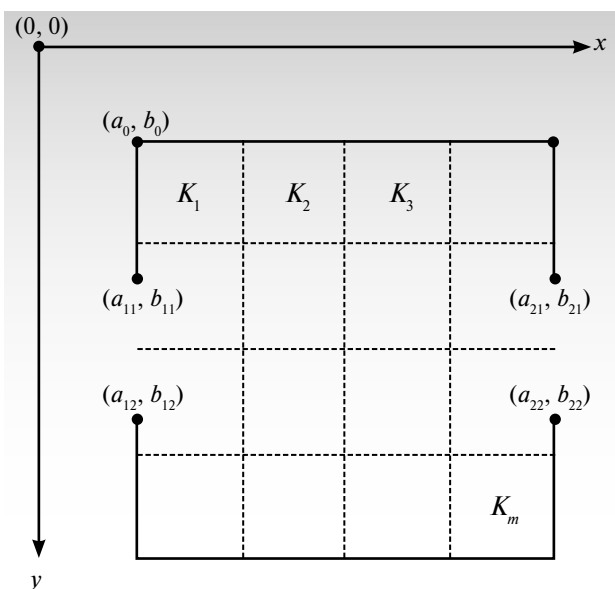


Рис. 1. Геометрия моделируемого помещения

При формальном описании модели также используются следующие обозначения:

$t = 1, 2, \dots, T$ , где  $T \in [1, +\infty]$  – модельное время, допускающее дробление вплоть до миллисекунд (аппроксимация непрерывной модели дискретной). Подобное квантование времени обусловлено тем, что она намного меньше, чем величина минимального времени для принятия решения агентом;

$N$  – общее число агентов (рассматривается как *параметр* модели);

$i = 1, 2, \dots, N$  – индекс агентов;

$o_i$  – возраст агента. Значения нормально распределены в отрезке [6, 79];

$g_i$  – пол агента: случайная величина, равновероятно принимающая значения 1 (мужчина) или 0 (женщина);

$x_i(t)$  – абсцисса положения агента в момент времени  $t$ ;

$y_i(t)$  – ордината положения агента в момент времени  $t$ ;

$\vec{r}_i(t) = \{x_i(t), y_i(t)\}$  – радиус-вектор положения агента в момент времени  $t$ ;

$v_i(t)$  – абсолютное значение скорости (скалярная величина) перемещения агента в момент времени  $t$ ;

$v_{i, conf}$  – значение комфортной скорости (скалярная величина) ходьбы агента;

$v_{i, max}$  – значение максимальной скорости (скалярная величина) ходьбы агента (отметим, что комфортная и максимальная скорости ходьбы для разных гендерно-возрастных групп являются известными [21, 22]);

$\vec{d}_i(t)$  – направляющий единичный вектор перемещения агента в момент времени  $t$ ;

$\vec{D}_i(t)$  – направляющий единичный вектор агента к точке выхода в момент времени  $t$ ;

$\delta_i(t)$  – радиус «личного пространства» агента;

$dist_{i,j}(t)$  – расстояние между  $i$ -м и  $j$ -м агентами;

$$dist_{i,j}(t) = \sqrt{[x_i(t) - x_j(t)]^2 + [y_i(t) - y_j(t)]^2}, \quad (1)$$

$st_i(t) \in \{0, 1, 2, 3\}$  – статус агента в момент времени  $t$  (0 – убит, 1 – ранен, 2 – дезориентация, 3 – жив). Статус 2 является временным и спустя некоторый период меняется на 3. В условиях отсутствия ЧС и давки,  $st_i(t) = 3$  для всех  $i$ ;

$sit_i(t) \in \{0, 1, 2, 3\}$  – статус восприятия агентом окружающей ситуации в момент времени  $t$  (0 – отсутствие ЧС, 3 – время сразу после ЧС, 2 – актив-



ная стадия ЧС, 1 – угасание ЧС). В условиях отсутствия ЧС,  $st_i(t) = 0$  для всех  $i$ ;

$s_i(t)$  – площадь горизонтальной проекции агента,

$$s_i(t) = \begin{cases} 0, & \text{если } st_i(t) = 0 \\ \sigma_1 \bar{s}_i, & \text{если } st_i(t) = 1 \\ \sigma_2 \bar{s}_i, & \text{если } st_i(t) = 2 \\ \bar{s}_i, & \text{если } st_i(t) = 3, \end{cases} \quad (2)$$

где  $\bar{s}_i$  – базовое значение,  $\sigma_1, \sigma_2$  – поправочные коэффициенты (параметры), причем  $\sigma_1 > \sigma_2 \geq 1$ . Значения коэффициентов обусловлены тем, что ранний человек имеет большую площадь проекции, ввиду появившейся, например, хромоты, контузии или просто ухудшения координации движения. Дезориентированный человек, хоть и в меньшей степени, но также склонен к ухудшению своего позиционирования, что влечет увеличение площади проекции.

Базовое ( $\bar{s}_i$ ) значение площади горизонтальной проекции агента рассчитывается на основании данных из методики МЧС России [23].

Плотность людей в толпе относительно агента  $\rho_i(t)$  в момент времени  $t$  описывается следующим образом:

$$\rho_i(t) = \frac{\sum_{j=1}^N \chi_i^j(t) s_j(t)}{\eta^2 s_i(t)}, \quad (3)$$

где  $\eta$  – коэффициент пропорции между окружающим пространством вокруг агента, где вычисляется плотность, и его площади горизонтальной проекции (параметр),  $\chi_i^j(t)$  – характеристическая функция присутствия  $j$ -го агента в окружении  $i$ -го агента, т.е.

$$\chi_i^j(t) = \begin{cases} 1, & \text{если } (x_j(t), y_j(t)) \in B\left(\eta \sqrt{\frac{s_i}{\pi}}, (x_i(t), y_i(t))\right) \text{ и } st_j(t) \neq 0 \\ 0, & \text{иначе,} \end{cases} \quad (4)$$

где  $B(r, (x, y))$  – круг радиуса  $r$  с центром в точке  $(x, y)$ .

Опишем функциональную связь между  $\delta_i(t)$  и  $\rho_i(t)$ .

$$\delta_i(t) = \begin{cases} \xi_i(t) \bar{\delta}_{1,i}, & \rho_i(t) \leq \bar{\rho}_{1,i}(t), \\ \xi_i(t) \bar{\delta}_{2,i}, & \bar{\rho}_{1,i}(t) < \rho_i(t) \leq \bar{\rho}_{2,i}(t), \\ \xi_i(t) \bar{\delta}_{3,i}, & \bar{\rho}_{2,i}(t) < \rho_i(t) \leq \bar{\rho}_{3,i}(t), \\ \xi_i(t) \bar{\delta}_{4,i}, & \bar{\rho}_{3,i}(t) < \rho_i(t) \leq \bar{\rho}_{4,i}(t), \end{cases} \quad (5)$$

$$\xi_i = \begin{cases} \bar{\xi}_0, & \text{если } sit_i(t) = 0, \\ \bar{\xi}_1, & \text{если } sit_i(t) = 1, \\ \bar{\xi}_2, & \text{если } sit_i(t) = 2, \\ \bar{\xi}_3, & \text{если } sit_i(t) = 3, \end{cases} \quad (6)$$

$$\bar{\xi}_3 > \bar{\xi}_2 > \bar{\xi}_1 > \bar{\xi}_0, \quad (7)$$

$$\bar{\rho}_{i,1}(t) = \frac{\bar{\rho}_{i,3}(t)}{3}, \bar{\rho}_{i,2}(t) = \frac{2\bar{\rho}_{i,3}(t)}{3}, \quad (8)$$

$$\bar{\rho}_{3,i}(t) = \psi_3(sit_i(t)) \frac{s_i \sum_{j=1}^N \chi_i^j(t)}{\sum_{j=1}^N \chi_i^j(t) s_j}, \quad (9)$$

$$\bar{\rho}_{3,i}(t) = \psi_4(sit_i(t)) \frac{s_i \sum_{j=1}^N \chi_i^j(t)}{\sum_{j=1}^N \chi_i^j(t) s_j},$$

$$\psi_4(sit_i(t)) > \psi_3(sit_i(t)),$$

$$\psi_3(0) > \psi_3(1) > \psi_3(2) > \psi_3(3), \quad (10)$$

$$\psi_4(3) > \psi_4(2) > \psi_4(1) > \psi_4(0),$$

$$\bar{\delta}_{1,i} = \vartheta_1 \sqrt{\frac{s_i}{\pi}}, \bar{\delta}_{2,i} = \vartheta_2 \sqrt{\frac{s_i}{\pi}}, \bar{\delta}_{3,i} = \vartheta_3 \sqrt{\frac{s_i}{\pi}}, \bar{\delta}_{4,i} = \vartheta_4 \sqrt{\frac{s_i}{\pi}}. \quad (11)$$

$$\vartheta_4 > \vartheta_1 > \vartheta_2 > \vartheta_3. \quad (12)$$

Радиус личного пространства является кусочно-постоянной функцией и, в отличие от площади горизонтальной проекции, является не физической, а психологической характеристикой агента. Коэффициент  $\xi_i$ , выступающий также в качестве параметра модели, отражает поправки в радиусе личного пространства в зависимости от статуса ситуации: чем более чрезвычайна ситуация в восприятии агента, тем больше его стремление расширить свое личное пространство.

Взаимодействие агентов в рамках описываемой модели рассматривается как абсолютно упругий нецентральный удар. В качестве критерия наступления взаимодействия выступает пересечение площадей горизонтальных проекций агентов.

В качестве чрезвычайной ситуации рассматривается одиночный взрыв, центр которого является случайной величиной с вероятностным распределением  $P$ . С центром взрыва связаны три концентрические окружности различных радиусов, образующие зоны различного поражения агентов. Попадание в каждую из зон поражения в момент взрыва меняет статус агента  $st_i$  на соответствующее значение. В случае смерти агента он перестает влиять на дальнейшее развитие модели, в том числе, не является преградой для перемещения. Если в результате взрыва агент дезориентирован, то он на протяжении нескольких секунд он остается неподвижным, а по истечении меняет свой статус на  $st_i = 3$ .

При ЧС каждый из агентов, испытывая стресс и страх, перестает ориентироваться на комфортную скорость ходьбы и готов даже на бег. При этом в случае попадания агента в зону ранения при взрыве, его максимальная скорость бега претерпевает изменение пропорциональное близости к взрыву.

### 3. Результаты имитационного моделирования в AnyLogic

Для предложенной модели движения агентов (1) – (12) разработана имитационная модель в системе AnyLogic [25]. Для реализации модели движения толпы в системе AnyLogic была разработана

специальная процедура на языке программирования Java, вызываемая из события Event, вызываемого циклически в каждый момент модельного времени  $t$ . Особенностью данной процедуры является итерационное вычисление новых координат агентов с использованием системы принятия решений и дальнейшей передачей вычисленных координат в функцию, отвечающую за перемещение агентов с заданной скоростью. В результате возникновения ЧС, возникают эффекты «турбулентности» и «давки» (рис. 3) что приводит к гибели значительной части агентов. Данный результат полностью согласуется с результатами работы [1].

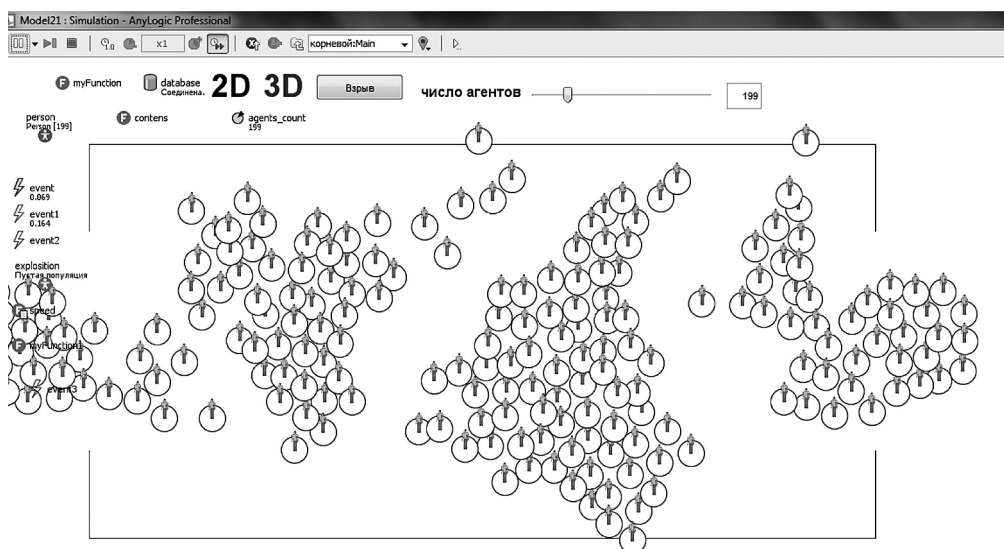


Рис. 2. Фрагмент презентационной части модели в AnyLogic: Распределение агентов до ЧС

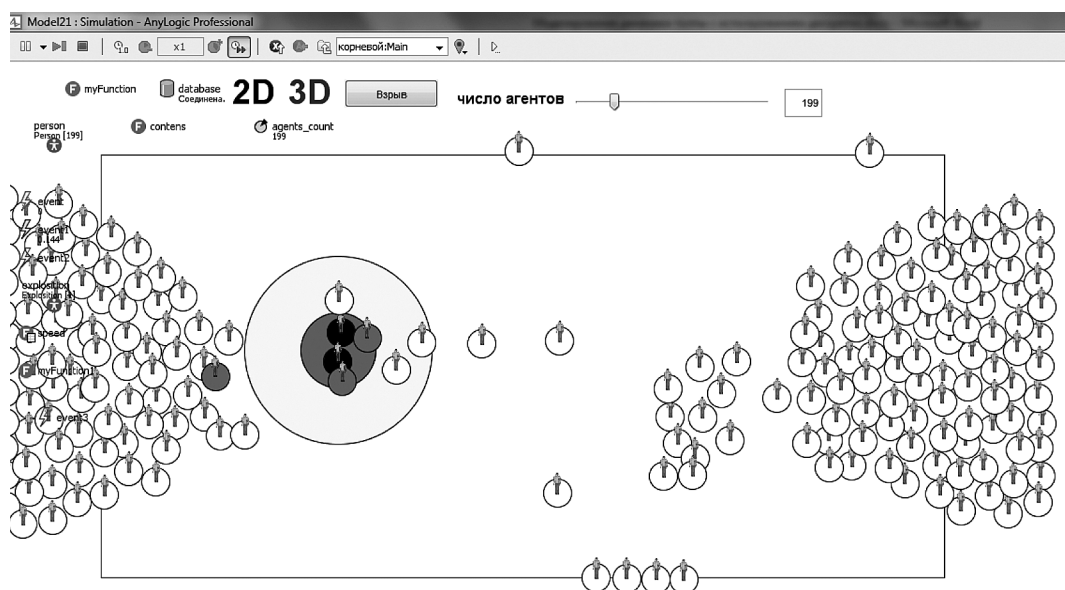


Рис. 3. Фрагмент презентационной части модели в AnyLogic: Распределение агентов после ЧС

#### 4. Заключение

Основываясь на феноменологическом подходе, была формализована агентная модель поведения толпы при чрезвычайной ситуации, которая была реализована в виде имитационной модели в системе AnyLogic. Как возникающая динамика в рамках

такой модели, так и ее результаты согласуются с соответствующими характеристиками реальных процессов.

Полученные результаты предполагают дальнейшее развитие данного подхода с детальным учетом процедур кластеризации и динамики таксонов. ■

#### Литература

1. Akopov A.S., Beklaryan L.A. Simulation of human crowd behavior in extreme situations // International Journal of Pure and Applied Mathematics. 2012. Vol. 79, no. 1. P. 121–138.
2. Helbing D., Farkas I., Vicsek T. Simulating dynamical features of escape panic // Nature. 2000. no. 407. P. 487–490.
3. Helbing D., Farkas I., Molnar P., Vicsek T. Simulation of pedestrian crowds in normal and evacuation situations // Pedestrian and evacuation dynamics. 2002, no. 21. P. 21–58.
4. Moussaïda M., Helbing D., Theraulaza G. How simple rules determine pedestrian behavior and crowd disasters // PNAS. 2011. Vol. 108, no. 17. P. 6884–6892.
5. Список погибших в клубе «Хромая лошадь». [Электронный ресурс]: <http://permloshad.narod.ru> (дата обращения 10.10.2014).
6. Число погибших в давке на фестивале в Камбодже превысило 450 человек. [Электронный ресурс]: <http://www.rian.ru/world/20101124/300360894.html> (дата обращения 20.10.2014).
7. Mintz A. Non-adaptive group behavior // Journal of Abnormal Psychology. 1951. Vol. 46, No. 2. P. 150–159.
8. Лебон Г. Психология народов и масс. М.: Академический проект, 2011. 238 с.
9. Фрейд З. Психология масс и анализ человеческого «Я». М.: Азбука-Аттикус, 2013. 192 с.
10. Юнг К.Г. Психология бессознательного. М.: Канон+РООИ «Реабилитация», 2012. 320 с.
11. Андреева Г.М. Социальная психология. Учебник для высших учебных заведений. М.: Аспект-Пресс, 2001. 290 с.
12. Helbing D., Molnar P. Social force model for pedestrian dynamics // Physical review E. 1995. Vol. 51, no. 5. P. 4282–4286.
13. Аптуков А.М., Брацун Д.А. Моделирование групповой динамики толпы, паникующей в ограниченном пространстве // Вестник Пермского университета. Механика. 2009. № 3. С. 18–23.
14. Кирик Е.С., Круглов Д.В., Юргельян Т.Б. О дискретной модели движения людей с элементом анализа окружающей обстановки // Журнал СФУ, Серия «Математика и физика». 2008. Т. 1, № 3. С. 266–276.
15. Antonini G., Bierlaire M., Weber M. Discrete choice models of pedestrian walking behavior // Transportation Research Part B. 2006. Vol. 40, No. 8. P. 667–687.
16. Yu W., Johansson A. Modeling crowd turbulence by many-particle simulations // Physical review E. 2007. Vol. 76, no. 4. P. 046–105.
17. Аптуков А.М., Брацун Д.А., Люшнин А.В. Моделирование поведения паникующей толпы в многоуровневом разветвленном помещении // Компьютерные исследования и моделирование. 2013. Т. 5, № 3. С. 491–508.
18. Bratsun, D. Computational modeling of collective behavior of panicked crowd escaping multi-floor branched building // Proceedings of the European Conference on Complex Systems 2012. Springer International Publishing, 2013. P. 659–663.
19. Акопов А.С., Бекларян Л.А. Агентная модель поведения толпы при чрезвычайных ситуациях // Автоматика и телемеханика. 2014. (в печати).
20. Официальный сайт коммерческого симулятора di-guy, имитирующего поведение больших масс людей. [Электронный ресурс]: <http://www.diguy.com/diguy> (дата обращения 2.11.2014).
21. Bohannon R.W. Comfortable and maximum walking speed of adults aged 20-79 years: reference values and determinants // Age and Ageing. 1997, Vol. 26, no. 1. P. 15–19.
22. Waters R.L., Hislop H.J., Thomas L., Campbell J. Energy cost of walking in normal children and teenagers // Developmental Medicine & Child Neurology. 1983. Vol. 25, no. 2. pp. 184–188.

23. Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности: Приказ МЧС России от 30.06.2009 г. № 382. М.: МЧС России, 2009. 48 с.
24. Акопов А.С. Имитационное моделирование: учебник и практикум для академического бакалавриата. М.: Юрайт, 2014. 389 с.
25. Боев В.Д. Компьютерное моделирование: Пособие для практических занятий, курсового и дипломного проектирования в AnyLogic 7. СПб.: ВАС, 2014. 432 с.

---

## SIMULATION OF HUMAN CROWD BEHAVIOR BASED ON INTELLECTUAL DYNAMICS OF INTERACTING AGENTS

**Armen BEKLARYAN**

*Lecturer, Department of Business Analytics, Faculty of Business Informatics,  
National Research University Higher School of Economics*

*Address: 20, Myasnitskaya street, Moscow, 101000, Russian Federation*

*E-mail: abeklaryan@hse.ru*

**Andranik AKOPOV**

*Professor, Department of Business Analytics, Faculty of Business Informatics,  
National Research University Higher School of Economics*

*Address: 20, Myasnitskaya street, Moscow, 101000, Russian Federation*

*E-mail: aakopov@hse.ru*

*This paper elaborates a phenomenological approach to simulation of human crowd behavior, proposed in study [1]. We consider a continuous stochastic agent-based model of human behavior in a confined space with a given geometry by using refinements of both an agent status and agent's decision-making system, presented in Helbing's models [2, 3, 4] (molecular approach).*

*Such integration seems to be the most promising development of this class of tasks due to the fact that the phenomenological approach (Beklaryan-Akopov's model) enables to introduce natural discretization of a task and then to calculate the increment of all agent's characteristics at any specific time, and the use of elements of the molecular approach (Helbing's model) enables to describe the most realistic decision-making system of an agent. This removes a complicated issue of numerical integration of Newton's equations underlying Helbing's model and offers explicit calculations of all system characteristics.*

*As a result, an agent based model has been devised in AnyLogic simulation modeling system, enabling to investigate agent movement dynamics with due regard to «the crowd effect» in various scenarios, in particular, in extreme situations, when exposure to «crowd crush» and «turbulence» effects exists.*

**Key words:** simulation modeling, crowd dynamics, agent based modeling, AnyLogic.

**Citation:** Beklaryan A.L., Akopov A.S. (2015) Simulation of human crowd behavior based on intellectual dynamics of the interacting agents [Modelirovanie povedeniya tolpy na osnove intellektual'noj dinamiki vzaimodejstvujushih agentov]. *Business Informatics*, no. 1 (31), pp. 69–77 (in Russian).

## References

1. Akopov A.S., Beklaryan L.A. (2012) Simulation of human crowd behavior in extreme situations. *International Journal of Pure and Applied Mathematics*, vol. 79, no. 1, pp. 121–138.
2. Helbing D., Farkas I., Vicsek T. (2000) Simulating dynamical features of escape panic. *Nature*, no. 407, pp. 487–490.
3. Helbing D., Farkas I., Molnar P., Vicsek T. (2002) Simulation of pedestrian crowds in normal and evacuation situations. *Pedestrian and evacuation dynamics*, no. 21, pp. 21–58.
4. Moussaïda M., Helbing D., Theraulaza G. (2011) How simple rules determine pedestrian behavior and crowd disasters. *PNAS*, vol. 108, no. 17, pp. 6884–6892.
5. List of the dead in Lame Horse club. Available at: <http://permloshad.narod.ru> (accessed 10 October 2014).
6. The death toll in a crush at a festival in Cambodia has exceeded 450 people. Available at: [://www.rian.ru/world/20101124/300360894.html](http://www.rian.ru/world/20101124/300360894.html) (accessed 20 October 2014).
7. Mintz, A. (1951) Non-adaptive group behavior. *Journal of Abnormal Psychology*, vol. 46, no. 2, pp. 150–159.
8. Lebon G. (2011) *Psihologija narodov i mass* [The crowd: a study of the popular mind]. Moscow: Akademicheskij proekt. (in Russian)
9. Frejd Z. (2013) *Psihologija mass i analiz chelovecheskogo «Ja»* [Group psychology and the analysis of the ego]. Moscow: Azbuka-Attikus. (in Russian)
10. Jung K.G. (2012) *Psihologija besoznatel'nogo* [Psychology of the unconscious]. Moscow: Kanon+ROOI «Reabilitacija». (in Russian)
11. Andreeva G.M. (2001) *Social'naja psihologija. Uchebnik dlja vysshih uchebnyh zavedenii* [Social psychology. Textbook for higher educational institutions]. Moscow: Aspekt-Press. (in Russian)
12. Helbing D., Molnar P. (1995) Social force model for pedestrian dynamics. *Physical review E*, vol. 51, no. 5, pp. 4282–4286.
13. Aptukov A.M., Bratsun D.A. (2009) Modelirovanie gruppovoj dinamiki tolpy, panikujushhej v ogranichenom prostranstve [Modeling crowd group dynamics panicked in a confined space]. *Bulletin of the Perm university. Mechanics*, no. 3, pp. 18–23.
14. Kirik E.S., Krouglov D. V., Yurgel'yan T.B. (2008) O diskretnoj modeli dvizhenija ljudej s jelementom analiza okruzhajushhej obstanovki [On discrete people movement model with environment analysis]. *Journal of Siberian Federal University. Mathematics & Physics*, no. 1 (3), pp. 266–276.
15. Antonini G., Bierlaire M., Weber M. (2006) Discrete choice models of pedestrian walking behavior. *Transportation Research Part B*, vol. 40, no. 8, pp. 667–687.
16. Yu W., Johansson A. (2007) Modeling crowd turbulence by many-particle simulations. *Physical review E*, vol. 76, no. 4, pp. 46–105.
17. Aptukov A.M., Bratsun D. A., Lyushnin A.V. (2013) Modelirovanie povedenija panikujushhej tolpy v mnogourovnevnom razvetvlennom pomeshhenii [Modeling of behavior of panicked crowd in multi-floor branched space]. *Computer Research and Modeling*, no. 5 (3), pp. 491–508.
18. Bratsun D. (2013) Computational modeling of collective behavior of panicked crowd escaping multi-floor branched building. Proceedings of the *European Conference on Complex Systems 2012*, Springer International Publishing, pp. 659–663.
19. Akopov A.S., Beklaryan L.A. (2014) Agentnaja model' povedenija tolpy pri chrezvychajnyh situacijah [Agent behavior model of human crowd in emergency situations]. *Automation and Remote Control*. (in Russian, in press)
20. The official website of a commercial simulator di-guy imitating behavior of large numbers of people. Available at: <http://www.diguy.com/diguy> (accessed 2 November 2014).
21. Bohannon R.W. (1997) Comfortable and maximum walking speed of adults aged 20-79 years: reference values and determinants. *Age and Ageing*, vol. 26, no. 1, pp. 15–19.
22. Waters R.L., Hislop H.J., Thomas L., Campbell J. (1983) Energy cost of walking in normal children and teenagers. *Developmental Medicine & Child Neurology*, vol. 25, no. 2, pp. 184–188.
23. *Ob utverzhenii metodiki opredelenija raschetnyh velichin pozhnarnogo riska v zdanijah, sooruzhenijah i stroenijah razlichnyh klassov funkcional'noj pozharnej opasnosti*: Prikaz MChS Rossii ot 30.06.2009 № 382 [On approval of the procedure for determining the values of fire risk in buildings and structures of various classes of functional fire hazard: The order of Ministry of Emergency Situations of Russia from 30.06.2009 No. 382]. (2009). Moscow: MOE of Russian Federation. (in Russian)
24. Akopov A.S. (2014) *Imitacionnoe modelirovanie: uchebnik i praktikum dlja akademicheskogo bakalavriata* [Simulation modeling: the textbook and practical work for academic undergraduate]. Moscow: Urait. (in Russian)
25. Boev V.D. (2014) *Komp'yuternoe modelirovanie: Posobie dlja prakticheskijh zanjatij, kursovogo i diplomnogo proektirovanija v AnyLogic 7* [Computer modeling: the handbook for practical classes, course and diploma projects in AnyLogic 7]. St. Petersburg: VAS. (in Russian)

**ЖУРНАЛ «БИЗНЕС-ИНФОРМАТИКА»  
ОСУЩЕСТВЛЯЕТ РАЗМЕЩЕНИЕ РЕКЛАМНЫХ  
И РЕКЛАМНО-ИНФОРМАЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

**Расценки:**

**Обложка:**

2, 3, 4 страница обложки, полноцветная печать,  
полоса 210 X 290 мм (A4) — 40 тыс. руб.

**Текстовый блок, черно-белая печать:**

- ♦ полоса — 20 тыс. руб.;
- ♦ 1/2 полосы — 15 тыс. руб.;
- ♦ 1/4 полосы — 10 тыс. руб.;
- ♦ меньший объем — 7 тыс. руб.

**Вставка, (4 полосы, полноцветная печать) — 60 тыс. руб.**

**Рекламно-информационный блок,  
(8 полос, полноцветная печать) — 80 тыс. руб.**

**Рекламно-информационный блок,  
(16 полос, полноцветная печать) — 90 тыс. руб.**

**Корпоративный специальный выпуск —  
по договоренности.**

Материалы принимаются с учетом следующих параметров:

- ♦ дообрезной формат — 215 X 300 мм;
- ♦ обрезной формат — 210 X 290 мм;
- ♦ поле набора полосной рекламы — 190 X 270 мм — с отступом от границ обрезного формата по 10 мм с каждой стороны;
- ♦ файл TIF, EPS, PDF— разрешение не менее 300 dpi.

Представляемая для публикации статья должна быть актуальной, обладать новизной, отражать постановку задачи (проблемы), описание основных результатов исследования, выводы, а также соответствовать указанным ниже правилам оформления.

Текст должен быть тщательно вычитан автором, который несет ответственность за научно-теоретический уровень публикуемого материала.

Материалы представляются в электронном виде по адресу:  
bijournal@hse.ru.

## ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ

**ТЕКСТ СТАТЬИ** представляется в редакцию в электронном виде (в формате MS Word, версия 2003 или выше).

**ОБЪЕМ.** Ориентировочный объем статьи составляет 20-25 тысяч знаков (с пробелами).

### ШРИФТ, ФОРМАТИРОВАНИЕ, НУМЕРАЦИЯ СТРАНИЦ

**ШРИФТ** – Times New Roman, кегль набора – 12 пунктов, полуторный интервал, форматирование по ширине. Нумерация страниц – сверху по центру, поля: левое – 2,5 см, верхнее, нижнее и правое – по 1,5 см.

**НАЗВАНИЕ СТАТЬИ** приводится на русском и английском языках. Название статьи должно быть информативным и раскрывать содержание статьи.

**СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ** приводятся на русском и английском языках и включают следующие элементы:

- ◆ фамилия, имя, отчество всех авторов полностью
- ◆ должность, звание, ученая степень каждого автора
- ◆ полное название организации – места работы каждого автора в именительном падеже, полный почтовый адрес каждой организации (включая почтовый индекс)
- ◆ адрес электронной почты каждого автора.

**АННОТАЦИЯ К СТАТЬЕ** представляется на русском и английском языках.

- ◆ Объем – 200-300 слов.
- ◆ Аннотация должна быть информативной (не содержать общих слов).
- ◆ Аннотация должна отражать основное содержание статьи и быть структурированной (следовать логике описания результатов в статье).
- ◆ Структура аннотации: предмет, цель, метод или методологию проведения исследования, результаты исследований, область их применения, выводы.
- ◆ Метод или методологию проведения исследований целесообразно описывать в том случае, если они отличаются новизной или представляют интерес с точки зрения данной работы. В аннотациях статей, описывающих экспериментальные работы, указывают источники данных и характер их обработки.
- ◆ Результаты работы описывают предельно точно и информативно. Приводятся основные теоретические и экспериментальные результаты, фактические данные, обнаруженные взаимосвязи и закономерности. При этом отдается предпочтение новым результатам и дан-

ным долгосрочного значения, важным открытиям, выводам, которые опровергают существующие теории, а также информации, которая, по мнению автора, имеет практическое значение.

- ◆ Выводы могут сопровождаться рекомендациями, оценками, предложениями, гипотезами, описанными в статье.
- ◆ Сведения, содержащиеся в названии статьи, не должны повторяться в тексте аннотации. Следует избегать лишних вводных фраз (например, «автор статьи рассматривает...»).
- ◆ Исторические справки, если они не составляют основное содержание документа, описание ранее опубликованных работ и общеизвестные положения, в аннотации не приводятся.
- ◆ В тексте аннотации следует употреблять синтаксические конструкции, свойственные языку научных и технических документов, избегать сложных грамматических конструкций.
- ◆ В тексте аннотации следует применять значимые слова из текста статьи.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА** приводятся на русском и английском языках. Количество ключевых слов (словосочетаний) – 6-10. Ключевые слова или словосочетания отделяются друг от друга точкой с запятой.

**ФОРМУЛЫ.** При наборе формул, как выключных, так и строчных, должен быть использован редактор формул MS Equation. В формульных и символических записях греческие (русские) символы, а также математические функции записываются прямыми шрифтами, а переменные аргументы функций в виде английских (латинских) букв – наклонным курсивом (пример «cos a», «sin b», «min», «max»). Нумерация формул – сквозная (по желанию авторов допускается двойная нумерация формул с указанием структурного номера раздела статьи и, через точку, номера формулы в разделе).

**РИСУНКИ** (графики, диаграммы и т.п.) могут быть оформлены средствами MS Word или MS Excel. Ссылки на рисунки в тексте обязательны и должны предшествовать позиции размещения рисунка. Допускается использование графического векторного файла в формате wmf/emf или cdr v. 10. Фотографические материалы предоставляются в формате TIF или JPEG, с разрешением изображения не менее 300 точек на дюйм. Нумерация рисунков – сквозная.

**ТАБЛИЦЫ** оформляются средствами MS Word или MS Excel. Нумерация таблиц – сквозная.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ** составляется в соответствии с требованиями ГОСТ 7.0.5-2008. Библиографическая ссылка (примеры оформления размещены на сайте журнала <http://bi.hse.ru/>). Нумерация библиографических источников – в порядке цитирования. Ссылки на иностранную литературу – на языке оригинала без сокращений.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ ДЛЯ АНГЛОЯЗЫЧНОГО БЛОКА** оформляется в соответствии с требованиями SCOPUS (примеры оформления размещены на сайте журнала <http://bi.hse.ru/>). Для транслитерации русскоязычных наименований можно воспользоваться сервисом <http://translit.ru/>.

## ЛИЦЕНЗИОННЫЙ ДОГОВОР

Для размещения полнотекстовых версий статей на сайте журнала с авторами заключается лицензионный договор о передаче авторских прав.

Плата с авторов за публикацию рукописей не взимается.

# AUTHORS GUIDELINES

Articles should be topical and original, should outline tasks (issues), describe key results of the author's research and appropriate conclusions.

Manuscripts are submitted via e-mail: [bijournal@hse.ru](mailto:bijournal@hse.ru).

## MANUSCRIPT REQUIREMENTS

**TEXT FILES** should be submitted in electronic form, as a MS Word document (version 2003 or higher).

**LENGTH.** Articles should be between 20 and 25 thousand characters (incl. spaces).

**FONT, SPACING, MARGINS.** The text should be in Times New Roman 12 pt, 1.5 spaced, fit to the width, margins: left – 25 mm, all other – 15 mm.

**TITLE** of the article should be submitted in native language and English.

**AUTHORS' DETAILS** are presented in native language and English. The details include:

- ◆ Full name of each author
- ◆ Position, rank, academic degree of each author
- ◆ Affiliation of each author, at the time the research was completed
- ◆ Full postal address of each affiliation (incl. postcode / ZIP)
- ◆ E-mail address of each author.

**ABSTRACT** are presented in native language and English.

- ◆ The abstract should be between 200 and 300 words.
- ◆ The abstract should be informative (no general words), original, relevant (reflects your paper's key content and research findings); structured (follows the logics of results' presentation in the paper)
  - ◆ The recommended structure: purpose (mandatory), design / methodology / approach (mandatory), findings (mandatory), research limitations / implications (if applicable), practical implications (if applicable), originality / value (mandatory).
- ◆ It is appropriate to describe the research methods/methodology

if they are original or of interest for this particular research. For papers concerned with experimental work the data sources and data procession technique should be described.

- ◆ The results should be described as precisely and informatively as possible. Include your key theoretical and experimental results, factual information, revealed interconnections and patterns. Give special priority in the abstract to new results and long-term impact data, important discoveries and verified findings that contradict previous theories as well as data that you think have practical value.

- ◆ Conclusions may be associated with recommendations, estimates, suggestions, hypotheses described in the paper.

- ◆ Information contained in the title should not be duplicated in the abstract. Authors should try to avoid unnecessary introductory phrases (e.g. «the author of the paper considers...»).

- ◆ Authors should use the language typical of research and technical documents to compile your abstract and avoid complex grammatical constructions.

- ◆ The text of the abstract should include key words of the paper.

**KEYWORDS** are presented in native language and English. The number of key words / words combinations are from 6 to 10 (separated by semicolons).

**FORMULAE** should be prepared using Math Type or MS Equation tool.

**FIG.S** should be of high quality, black and white, legible and numbered consecutively with Arabic numerals. All Fig.s (charts, diagrams, etc.) should be submitted in electronic form (photo images – in TIF, PSD or JPEG formats, minimum resolution 300 dpi). Appropriate references in the text are required.

**REFERENCES** should be presented in Harvard style and carefully checked for completeness, accuracy and consistency.

The publication is free of charge.