

*Российская Академия Наук*

# ТРУДЫ

**4/2012(11)**

издается с декабря 2010 г.

ISBN 978-5-91137-222-4

**Кольского научного центра РАН**

---

Главный редактор – академик В.Т. Калинин

Заместители главного редактора  
д.г.-м.н. В.П. Петров  
д.т.н. В.А. Путилов

Редакционный совет:

академик Г.Г. Матишов,  
академик Н.Н. Мельников,  
академик Ф.П. Митрофанов,  
чл.-корр. В.К. Жиров,  
чл.-корр. А.И. Николаев,  
д.г.-м.н. Ю.Л. Войтеховский,  
д.т.н. Б.В. Ефимов,  
д.э.н. Ф.Д. Ларичкин,  
д.т.н. В.А. Маслобоев,  
д.ф.-м.н. Е.Д. Терещенко,  
к.г.-м.н. А.Н. Виноградов  
(ответственный секретарь)

## ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

**ВЫПУСК 3**

Редколлегия серии

«Информационные технологии»:  
профессор, д.т.н. В.А. Путилов (отв. редактор),  
д.т.н. А.Г. Олейник (зам. отв. редактора),  
д.ф. - м.н. А.П. Афанасьев,  
д.т.н. В.А. Маслобоев

184209, г. Апатиты Мурманская область, ул. Ферсмана, д.14  
Кольский научный центр РАН  
Тел. (81555)79393, 79380. Факс (81555)76425  
E-mail: [admin@apatitu.ru](mailto:admin@apatitu.ru) <http://www.kolasc.net.ru>

---

© Учреждение Российской академии наук Институт информатики  
и математического моделирования технологических процессов  
Кольского научного центра РАН, 2012

© Учреждение Российской академии наук Кольский научный центр РАН, 2012

Серия «Информационные технологии» представляет результаты исследований, направленных на создание и развитие теоретической базы, информационных технологий и информационных систем поддержки широкого спектра видов деятельности – от научных исследований до практического управления технологическими и социально-экономическими системами. В настоящий выпуск включены результаты, полученные исследователями ИИММ КНЦ РАН в 2012 году. Ряд работ выполнен при активном участии сотрудников и студентов факультета информатики и прикладной математики Кольского филиала Петрозаводского университета, а также исследователей других научных и образовательных учреждений.

Сборник адресован специалистам в области создания и практического использования информационных систем и технологий в различных сферах управленческой и производственной деятельности, преподавателям и студентам ВУЗов соответствующих специальностей.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	9
В.А. Путилов, А.В. Маслобоев	Мультиагентный подход к виртуализации проблемно-ориентированной деятельности субъектов управления региональной безопасностью в Арктике ..... 10
К.В. Богатиков, И.Е. Кириллов, И.Н. Морозов	Синтез структур оценки состояния надежности социально-экономической системы Арктического региона ..... 24
В.Н. Богатиков, И.Е. Кириллов, И.Н. Морозов	Подход к оценке состояний социально-экономических систем для целей управления их надежностью (на примере Арктического региона) . 31
К.В. Богатиков, И.Е. Кириллов, И.Н. Морозов	Механизм самоорганизации агентной системы управления ..... 40
М.В. Мальков	О надежности информационных систем ..... 49
К.А. Степанов, А.В. Вицентий, А.Г. Олейник	Влияние региональных факторов на надежность функционирования информационных систем в условиях Арктики и высоких широт ..... 59
П.А. Ломов, М.Г. Шишаев, В.В. Диковицкий	Упрощенное представление OWL-онтологий для их применения в графических пользовательских интерфейсах ..... 70
В.В. Диковицкий	Метод информационного поиска на основе динамической расширяемой базы знаний ..... 85
С.С. Ковалёв, М.Г. Шишаев	Современные методы кластеризации в контексте задачи идентификации рассылок почтового спама 89
М.Г. Шишаев, А.В. Трефилов	Организация динамической коммуникационной сети на базе мобильных устройств с многокомпонентной метрикой маршрутов ..... 99
М. Г. Шишаев, С.Ю. Елисеенко	Имитационная модель пространственных перемещений объектов с квазислучайными параметрами маршрутов ..... 106

А.С. Неведров, А.Г. Олейник	Архитектура системы интеграции инструментальных средств для определения эффективных режимов обогащения .....	115
В.В. Бирюков, И.В. Буренина, Р.М. Никитин, А.Г. Олейник	Разработка моделей разделительных аппаратов с использованием математического аппарата ММК .....	124
А.В. Вицентий	Ограничения данных при реализации процедур декларативных моделей прогнозирования параметров производственных процессов обогащения .....	134
В.Ф.Скороходов, Р.М. Никитин А.Г. Олейник	Применение компьютерного моделирования для исследования гидродинамики процесса флотации	141
С.Ю. Яковлев	Базовая структурная модель опасностей промышленно-природного комплекса .....	150
В.Н. Богатиков, И.Е. Кириллов, И.Н. Морозов	Распределенная адаптивная модель прогнозирования изменения параметров технологических систем .....	158
В.В. Белош, В.Н. Богатиков, Т.А. Фильчакова	Построение систем диагностики и управления технологической безопасностью в нейросетевом базисе .....	168
Н.Ю. Рыженко	Пространственное моделирование и анализ безопасности объектов природно-промышленных комплексов в системе ARCGIS .....	181
А.А. Рыженко, Р.Ш. Хабибулин	Информационная технология визуализации взрывов и пожаров на производственных объектах .....	186
Ю.О. Самойлов, В.В. Быстров	Информационные средства и технологии оценки качества образовательной деятельности.....	191
Д.Н. Халиуллина	Технология управления финансовыми вложениями в инновационном предприятии.....	202
А.А. Зуенко, С.В. Баженов	Реализация библиотеки АК-объектов.....	207

*Russian Academy of Sciences*  
**transactions**

**4/2012(11)**  
Published since 2010  
ISBN 978-5-91137-222-4

**Kola Science Centre**

---

Editor – Academician V.T. Kalinnikov

Deputy editor in chief:  
Doctor of Geology and Mineralogy V.P. Petrov  
Prof, Dr. of Sciences, V.A. Putilov

Editor Council:

Academicians:

G.G. Matishov, N.N. Melnikov, F.M. Mitrofanov.

Corresponding Member of RAS:

V.K. Zhiron, A.I. Nikolaev.

Dr. of Sciences:

Yu.L. Voitekhovskiy, F.D. Larichkin,

V.A. Masloboev, E.D. Tereshchenko,

Ph.D. A.N. Vinogradov (executive secretary)

**INFORMATION  
TECHNOLOGIES**

series 3

Editorial council of the «Information Technologies»  
series

Prof., D.Sc. V.A. Putilov (Editor-in-Chief),

D.Sc. (Eng.) A.G. Oleynik (Vice Editor-in-Chief),

D.Sc. (Phys. and Maths) A.P. Aphanasyev,

D.Sc.(Eng.) V.A. Masloboev

14, Fersman str., Apatity, Murmansk region, 184209, Russia  
Tel. (81555)79393, 79380. Fax: (81555)76425  
E-mail: [admin@admksk.apatitu.ru](mailto:admin@admksk.apatitu.ru) <http://www.kolasc.net.ru>

---

Sequence “Information Technologies” represents research and work-out results in the field of development of theoretical basis, information technologies and information systems for problem-oriented activity support in wide scope. The represented results can be used from research studies to practical management of technological or socio-economic systems. This issue includes the results which were received by IIMM KSC RAS researchers at 2012 year. A number of papers are carried out with the assistance of research fellows and students of Kola branch Petrosavodsk state university (Informatics and applied mathematics department), as well as research people of other scientific and educational institutions.

The collection is intended for experts in the field of information systems and technologies development and application for various administrative and industrial activity support, as well as for teachers and students of corresponding specialities at the higher educational establishments.

CONTENTS

V.A. Putilov, A.V. Masloboev	An agent-based approach to problem-oriented activity virtualization of regional security management subjects in the Arctic .....	Page 10
K.V. Bogatikov, I.E. Kirillov, I.N. Morozov	Structure synthesis reliability assessment of social and economic system in the Arctic region .....	24
V.N. Bogatikov, I.N. Morozov I.E. Kirillov	Approach to the assessment of conditions of social and economic systems for management of their reliability (on the example of the Arctic region) .....	31
K.V. Bogatikov, I.E. Kirillov, I.N. Morozov	The mechanism of adaptation agent management .....	40
M.V. Malkov	About reliability of information systems .....	49
K.A. Stepanov, A.V. Vicentiy, A.G. Oleynik	Influence of regional factors on the information systems reliability in the Arctic and high latitudes .....	59
P.A. Lomov, M.G. Shishaev, V.V. Dikovitsky	Simplified representation of owl of ontologies for their use in graphic user interfaces .....	70
V.V. Dikovitsky	Information retrieval method based on dynamical knowledge base .....	85
S.S. Kovalev, M.G. Shishaev	Modern cluster analysis methods in context of e-mail spam campaigns identification .....	89
M.G. Shishaev, A.V. Trefilov	The organization of an ad-hoc network on the basis of mobile devices with the multicomponent metrics of routes .....	99
М. Г. Шишаев, С.Ю. Елисеенко	Simulation model of spatial object movements with quasi-random routes .....	106
A.S. Nevedrov, A.G. Oleynik	Architecture of toolkits integration system for definition of ore separation effective regime .....	115

V.V. Birukov, I.V. Burenina, R.M. Nikitin, A.G. Oleynik	Ore dresser models design on the basis of mathematical apparatus MMK .....	124
A.V. Vicentiy	Raw data constraints in procedures realization of ore concentration production processes parameters prediction declaration models .....	134
V.F. Skorokhodov, R.M. Nikitin, A.G. Oleynik	The computer modelling application for research of flotation process hydrodynamics .....	141
S.Yu. Yakovlev	Basic structural model of hazards at industrial-natural complex .....	150
V.N. Bogatikov, I.E. Kirillov, I.N. Morozov	Distributed adaptive model for forecasting of change of technological systemc parameters .....	158
V.V. Belosh, V.N. Bogatikov, T.A. Filchakova	Construction of diagnostic and control systems for the technological safety in the neuronetwork basis .....	168
N.U. Ryzhenko	Spatial modeling and analysis of objects of natural safety industrial complex in ARCGIS .....	181
A.A. Ryzhenko, R.Sh. Khabibulin	Information imaging explosion and fire at industrial sites enterprises .....	186
Y.O. Samoilov, V.V. Bystrov	Information technologies and methods of education quality estimation .....	191
D.N. Khaliullina	Technology of management of enterprise innovative investment .....	202
A.A. Zouenko, S.V. Bazhenov	Implementation of n-tuple algebra library .....	207



## **ВВЕДЕНИЕ**

В современных условиях наличие и эффективное использование проблемно-ориентированных информационных технологий, и систем во многом определяет успешность человеческой деятельности в самых различных сферах – от ориентированных на перспективу научных исследований до текущего управления функционированием, развитием социально-экономических и технологических систем различного масштаба. По-прежнему актуальным в сфере развития информационных технологий является решение задач интеграции разнородных информационных ресурсов, обеспечение целостности хранимой информации и совершенствование механизмов манипулирования ею. Единое информационное пространство, формируемое с учетом специфических особенностей территорий, определяется в качестве системообразующей основы при подготовке, планировании и реализации государственной политики.

Интеграция информационных ресурсов позволяет повысить системность информационного обеспечения деятельности, дает возможность использования имеющихся ресурсов для решения новых задач, в том числе – междисциплинарных. Однако в результате интеграции растут масштабы и структурная сложность информационных ресурсов, что обуславливает необходимость совершенствования методов и технологий представления таких ресурсов пользователям и механизмов адаптивного доступа пользователей к информации и средствам ее обработки. Мировым трендом в решении указанных задач является использование формальных методов обработки семантической информации, представляемой в виде онтологий, и агентных технологий, дающих возможность виртуализации многих функций, как при поиске информации, так и при ее использовании в решении прикладных задач.

С учетом специфики Арктических территорий Российской Федерации особое внимание при формировании здесь целостной информационно-коммуникационной инфраструктуры необходимо уделять вопросам ее использования при решении задач обеспечения безопасности всех видов деятельности. При этом важным является обеспечение надежности самих информационных систем.

Настоящий сборник продолжает серию «Информационные технологии» Трудов Кольского научного центра РАН. Работы, включенные в настоящий сборник, представляют результаты исследований членов одной научной школы, сформировавшейся в Институте информатики и математического моделирования технологических процессов КНЦ РАН. Ряд работ выполнен при активном участии сотрудников и студентов факультета информатики и прикладной математики Кольского филиала Петрозаводского госуниверситета, а также исследователей из других научных и образовательных учреждений.

Исследования, результаты которых представлены в сборнике, проводились при поддержке Президиума РАН, Отделения нанотехнологий и информационных технологий РАН, Правительства Мурманской области и Российского фонда фундаментальных исследований.

УДК 004.89, 004.942

**В.А. Путилов, А.В. Маслобоев**

Институт информатики и математического моделирования Кольского НЦ РАН,  
Кольский филиал ПетрГУ

## **МУЛЬТИАГЕНТНЫЙ ПОДХОД К ВИРТУАЛИЗАЦИИ ПРОБЛЕМНО-ОРИЕНТИРОВАННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ СУБЪЕКТОВ УПРАВЛЕНИЯ РЕГИОНАЛЬНОЙ БЕЗОПАСНОСТЬЮ В АРКТИКЕ\***

### **Аннотация**

В работе предлагается новый подход к решению задач информационного обеспечения управления безопасностью функционирования региональных социально-экономических систем на основе формирования проблемно-ориентированных мультиагентных виртуальных пространств, как ситуационно-коалиционных многоагентных систем, обеспечивающий виртуализацию процессов принятия решений и функций управления субъектов региональной безопасности, а также моделирование их целенаправленной деятельности.

### **Ключевые слова:**

*агентные технологии, виртуализация, информационно-аналитическая поддержка, управление, региональная безопасность, проблемно-ориентированные мультиагентные виртуальные пространства, сетцентрический подход.*

**V.A. Putilov, A.V. Masloboev**

## **AN AGENT-BASED APPROACH TO PROBLEM-ORIENTED ACTIVITY VIRTUALIZATION OF REGIONAL SECURITY MANAGEMENT SUBJECTS IN THE ARCTIC**

### **Abstract**

In this paper a virtualization-based approach to management information support problem solving of the regional socio-economic system functioning security based on problem-oriented multi-agent virtual environments synthesis, as situated coalition multi-agent systems has been proposed. The approach provides decision-making process and regional security subjects management functions virtualization as well as their purposeful activities simulation.

### **Keywords:**

*agent-based technologies, virtualization, information and analytical support, management, regional security, problem-oriented multi-agent virtual spaces, network-centric approach.*

### **Введение**

С открытием в Арктическом регионе больших запасов углеводородов и других полезных ископаемых арктическая циркумполярная зона стала объектом эскалирования национальных интересов основных «арктических государств» (Россия, США, Норвегия, Канада и Дания), а также стран-наблюдателей в Арктике (Китай, Италия, Южная Корея и др.). Арктический регион становится ареной все более ожесточающейся борьбы за его природные ресурсы. В освоение ресурсонасыщенных арктических пространств ведущими странами мира вкладываются большие инвестиции, что ослабляет позицию присутствия

---

\* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 12-07-00138 - Разработка когнитивных моделей и методов формирования интегрированной информационной среды поддержки управления безопасностью Арктических регионов России).

Российской Федерации (РФ) в Арктике, владеющей значительными ее территориями, и формирует вектор угроз национальным интересам РФ в Арктике: геополитическим, социально-экономическим, оборонным и экологическим [1]. В связи с этим, тема национальной безопасности и защиты интересов РФ в Арктической зоне сегодня представляет особую актуальность.

Крайний Север и Арктика в целом - это суровые регионы с экстремальными климатическими условиями, что обуславливает высокую вероятность возникновения чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера. Оперативное решение вопросов минимизации рисков и локализации угроз безопасности региональных компонентов арктических территорий, адекватное реагирование на чрезвычайные ситуации, а также реализация механизмов упреждающего управления устойчивым развитием потребуют обработки большого объема разноплановой информации для различных министерств и ведомств, своевременного определения степени ее достоверности, а также согласованного информационного взаимодействия соответствующих структур безопасности.

В связи с этим, одной из главных целей государственной политики РФ в Арктике является развитие сферы информационных технологий и связи. Анализ мер, осуществляемых РФ по данному направлению, свидетельствует о том, что их эффективность значительно снижает отсутствие единого информационного пространства Арктической зоны РФ (АЗ РФ), на базе которого представляется возможным формирование целостной информационной инфраструктуры для комплексного решения задач управления безопасностью арктических регионов [2]. Формирование единого информационного пространства АЗ РФ позволит повысить оперативность, достоверность и качество выдаваемой информации об обстановке в Арктике.

Обеспечение приемлемого уровня безопасности функционирования и развития региональных социально-экономических систем и их компонентов может быть достигнуто за счет повышения эффективности согласованного по времени, ресурсам и специфике ситуации информационного взаимодействия проблемно-ориентированных организационных структур, деятельность которых связана с решением задач управления различными составляющими региональной безопасности. Получение адекватного возникающим задачам управления безопасностью региона эффекта в данном направлении представляется возможным на основе:

- формирования единого виртуального информационного пространства (ЕВИП), как целостной информационно-аналитической среды поддержки управления региональной безопасностью [2], представляющей собой комплекс проблемно-ориентированных, взаимосвязанных и взаимодействующих информационных и аналитических ресурсов и систем, а также технологическую и организационную инфраструктуру их создания и использования;
- виртуализации процессов принятия решений и функций управления субъектов региональной безопасности на основе когнитивного подхода и соответствующих когнитивных информационных технологий;
- согласования контуров управления различными составляющими глобальной безопасности регионального развития на основе компьютерного моделирования для формирования оптимальных траекторий безопасного

развития региона и комплексной оценки угроз безопасности функционирования региональных подсистем и их компонентов;

- сетцентрического подхода к формированию единой инфраструктуры (сети) виртуальных когнитивных центров управления безопасностью развития арктических регионов;

- научно-методического обеспечения и программно-алгоритмической базы для создания интеллектуальных систем поддержки принятия решений в сфере прогнозирования и стратегического планирования безопасного развития региональных социально-экономических систем.

В настоящей работе рассматриваются вопросы создания и использования проблемно-ориентированных виртуальных пространств, как ситуационно-коалиционных мультиагентных систем для задач информационной поддержки управления региональной безопасностью. Предложена многоуровневая модель ЕВИП региона. Модель имеет мультиагентную реализацию и обеспечивает технологическую основу для синтеза проблемно-ориентированных виртуальных организационных структур безопасности, анализа динамики и координации взаимодействия когнитивных агентов субъектов проблемно-ориентированной деятельности в мультиагентных виртуальных системах, ориентированных на решение задач управления региональным развитием.

Развитие мультиагентного подхода к решению задач информационного обеспечения управления безопасностью функционирования региональных социально-экономических систем на основе формирования проблемно-ориентированных виртуальных пространств, как ситуационно-коалиционных мультиагентных систем обеспечивает виртуализацию процессов принятия решений и функций управления субъектов региональной безопасности, а также адаптивное моделирование их целенаправленной деятельности. Вместе с тем, в работе представлена обобщенная четырехуровневая модель деятельности когнитивных агентов для имитации поведения субъектов проблемно-ориентированной деятельности в открытых мультиагентных виртуальных средах, обеспечивающая основу для синтеза функциональной структуры и анализа динамики взаимодействия когнитивных агентов, как виртуальных деятелей при решении пользовательских задач.

### **Мультиагентный подход к виртуализации управления сложными объектами и процессами информатизации**

Современный этап развития компьютерных наук обозначил новый мейнстрим в области создания технологий построения интеллектуальных систем поддержки принятия решений в сфере прогнозирования и стратегического планирования развития сложных динамических систем - когнитивные информационные технологии [3], основанные на когнитивном подходе к решению трудноформализуемых задач в различных предметных областях и обеспечивающие возможность рационализации и формализации сложных объектов и процессов информатизации для получения новых знаний об исследуемых процессах и объектах в условиях неопределенности и неполноты информации, а также виртуализации функций управления данными объектами и процессами.

Таким образом, когнитивный подход и реализующие его технологии, в частности технология мультиагентных систем (МАС) [4], могут найти широкое применение для решения задач согласования контуров управления различными видами безопасности развития регионов АЗ РФ и формирования ЕВИП АЗ РФ на базе когнитивных виртуальных пространств отдельных региональных подсистем и их компонентов. Ввиду разнородности и динамичности компонентов ЕВИП решение задач информационной поддержки проблемно-ориентированной деятельности субъектов региональной безопасности на основе ЕВИП в целях повышения эффективности согласованного по времени, ресурсам и специфики ситуации информационного взаимодействия организационных структур безопасности при локализации возникающих угроз безопасности региональных подсистем, представляется сложной проблемой, требующей комплексного решения.

Актуальность исследований в области разработки проблемно-ориентированных МАС определяется сложностью современных организационных и технических систем, разнообразием, сложностью и распределенностью решаемых задач, огромными объемами потоков информации и высокими требованиями к времени ее обработки. Мультиагентные технологии находят широкое применение в различных областях, требующих решения сложных распределенных задач, таких как создание гибких систем распределенной обработки информации, реинжиниринг бизнес-процессов, построение виртуальных предприятий, имитационное моделирование интегрированных производственных систем, электронная торговля, организация работы коллективов роботов и т. д. Средствами мультиагентных технологий решаются также задачи интеграции разнородных исполнительных ресурсов, поисковые задачи и пр. Однако, анализ современного состояния исследований отечественных и зарубежных научных школ в рассматриваемой проблемной области показал, что, несмотря на большой потенциал развития современных МАС и базирующихся на них технологических решений для различных предметных областей, вопросы приложения технологии МАС для задач информационного обеспечения управления безопасностью функционирования социально-экономических систем регионального масштаба и создаваемых на ее основе агентно-ориентированных ЕВИП для задач управления региональным развитием мало изучены.

В качестве технологической платформы для практической реализации и развертывания открытых расширяемых многофункциональных ЕВИП, наделенных потенциалом к саморазвитию и способностью адаптации к динамичному характеру функционирования внешнего и внутреннего окружения региона, предлагается использовать современные технологии одноранговых мультиагентных распределенных информационных систем [5], принципы сетецентрического управления и синергетического подхода.

*Сетецентрический подход* [6] обеспечивает создание общего информационного поля (целостной виртуальной среды) для интеграции функционального и вычислительного потенциала разнородных проблемно-ориентированных информационных систем при решении задач управления сложными динамическими системами. Основу сетецентрического подхода к проектированию распределенных информационных систем составляет сервис-ориентированная архитектура (SOA - Service-Oriented Architecture) [7].

Реализация принципов сетецентрического управления в распределенных информационных системах обеспечивает эффективное взаимодействие многопрофильных подсистем сильносвязных стационарных и/или мобильных объектов с программируемым поведением в единой информационной среде. Основу сетецентрического управления составляют сквозные модели систем объектов взаимодействующих в едином информационном пространстве, в котором в реальном времени и с высокой надежностью обеспечивается циклическое повторение всех этапов исполнения различных контуров управления.

*Синергетический подход* [8] к управлению сложными открытыми нелинейными системами, характеризующимися свойствами неустойчивости, неравновесности, бифуркации, катастрофы и самоорганизации, рассматривается как дальнейшее развитие системного подхода и обеспечивает новые возможности для исследования и осуществления управленческой деятельности в открытых виртуальных информационных системах. Реализация синергетического подхода к управлению в МАС заключается в формировании коалиций агентов в результате самоорганизации и коллективной адаптации агентов к изменяющимся условиям среды; эволюция МАС за счет внутренних механизмов самоорганизации ее элементов (агентов – проявление синергетического эффекта. Это обеспечивает возможность перехода от закрытых иерархических структур с жесткими связями и централизованным управлением к открытым сетевым виртуальным организационным структурам с гибкими связями и децентрализованным управлением.

Применение *мультиагентного подхода* [2] для задач управления региональным развитием позволяет создать адекватную информационно-аналитической среде поддержки управления безопасностью функционирования региональных социально-экономических систем, учитывая распределенность, динамичность и структурную сложность образующих их подсистем. При таком подходе представляется возможность реализовать виртуализацию функций управления отдельными составляющими региональной безопасности за счет делегирования их интеллектуальным про-активным агентам (рис. 1), а на основе проблемно-ориентированных коалиционных взаимодействий агентов, возможно, будет обеспечено эффективное функционирование самоорганизующегося ЕВИП и его компонентов, а также поддержание приемлемого уровня безопасности развития на перспективу. Формирование коалиций агентов, согласно [9] - это один из подходов конфигурирования виртуальных организационных структур безопасности под конкретную задачу управления безопасностью региона посредством применения согласованных стратегий, временная логика которых зависит от динамически меняющихся условий.

В данном случае под агентом понимается аппаратная или программная сущность, действующая либо от лица пользователя (субъекта региональной безопасности), либо от лица системы (ЕВИП региона), делегировавшей агенту полномочия на выполнение тех или иных действий в интересах достижения целей при решении пользовательских задач. Субъекты региональной безопасности являют собой организационные структуры, управляемые Советом безопасности РФ, а также заинтересованные государственные и коммерческие организации в области обеспечения различных видов безопасности (социально-экономической, экологической, информационной и др.) и управления региональным развитием.

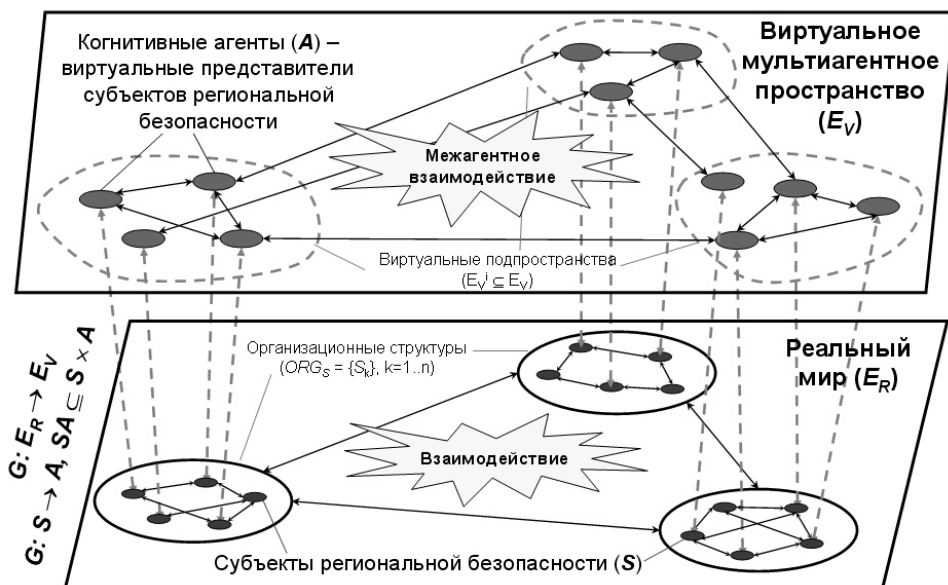


Рис. 1. Реализация мультиагентного подхода к виртуализации проблемно-ориентированной деятельности субъектов региональной безопасности

Основная задача когнитивного агента в виртуальном пространстве региона – мониторинг состояния и контроль уровней безопасности функционирования объектов и процессов региональной социально-экономической системы в реальном масштабе времени с учетом информационных взаимодействий с внешней средой, с пользователем и межагентных коммуникаций с другими агентами. Информационная и функциональная мощность субъектов региональной безопасности однозначно определяют возможный класс задач решаемых их виртуальными представителями, (когнитивных агентов), а их типизация – спектр возможных функций, реализуемых агентами.

Базовый набор функций когнитивных агентов субъектов региональной безопасности в ЕВИП:

- представление и визуализация информации;
- предоставление специализированных интерфейсов для различных категорий пользователей и решаемых задач;
- проблемно-ориентированный поиск и анализ информации;
- оперативная распределенная обработка информации;
- формирование виртуальных организационных структур безопасности под конкретную задачу в зависимости от спецификации ситуации;
- прогностические функции на основе имитационного моделирования развития ситуации и оценка показателей безопасности функционирования компонентов региональных социально-экономических систем в многомерном пространстве критериев;
- поддержка процесса принятия решений по формированию и выбору допустимых траекторий безопасного развития региона и его компонентов с возможностью адаптивного управления и с учетом установленных ограничений.

Симметричная функциональность агентов создает предпосылки для более эффективного формирования возможных виртуальных организационных структур для решения задач управления региональной безопасностью, а их реактивность, про-активность и автономность делает распределенную среду «живой», активно функционирующей при минимальном участии пользователя. Кроме того, использование нового класса когнитивных агентов с имитационным аппаратом [10] (рис. 2) обеспечивает возможность целенаправленного управления безопасностью региональной социально-экономической системы, как в стабильных условиях, так и в критических ситуациях.

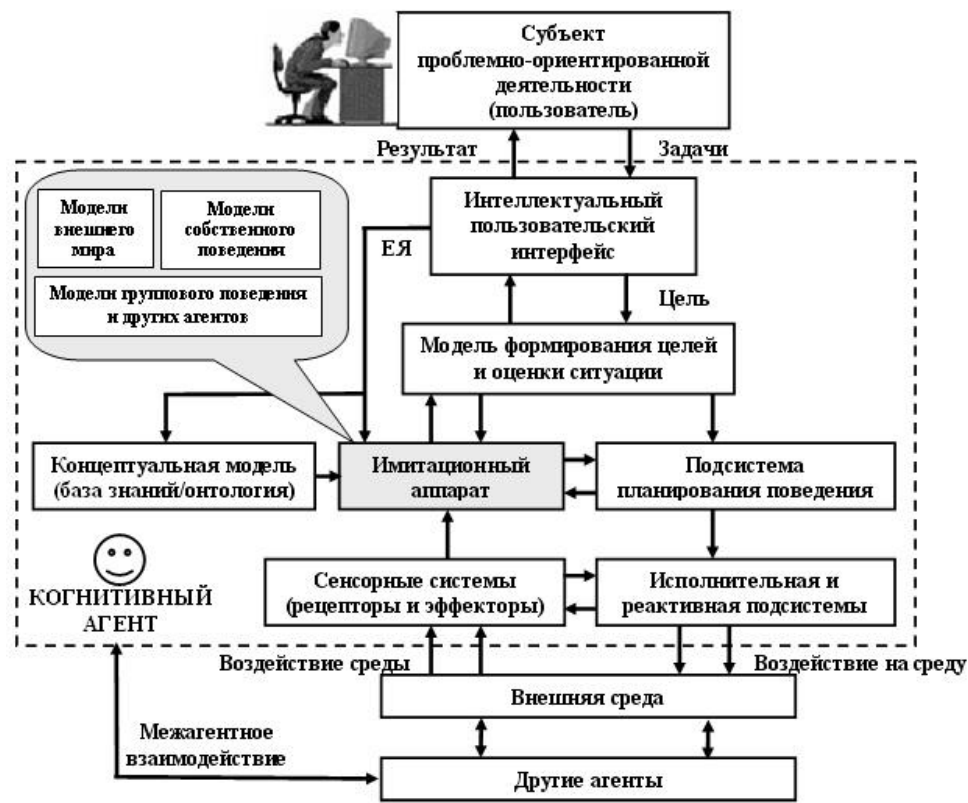


Рис. 2. Архитектура когнитивного агента с имитационным аппаратом

Таким образом, виртуальное пространство представляет собой модель среды действий, моделирующая эффект присутствия пользователя. При этом мультиагентные виртуальные системы предоставляет прямой доступ к объектам виртуального пространства для имитации поведения исследуемой системы, для которой построено виртуальное пространство, при различных управляющих воздействиях на эту систему в соответствии с законами реального мира. Особенностью мультиагентных виртуальных пространств является ориентация на использование онтологических моделей представления знаний и их применимость для описания различных предметных областей. Для представления знаний в ЕВИП предлагается использовать онтологии как динамично развивающуюся и перспективную форму представления знаний [11].



Онтология задает интеллектуальность агента - чем точнее составлена онтология, чем более корректно обозначены связи, тем полнее агент представляет предметную область, для которой он существует. Функции онтологии выполняет концептуальная модель ЕВИП [12], являющаяся частью ментальной подсистемы гибридной InteRRap-архитектуры агента. Она определяет цели и правила взаимодействия агентов, а также отношения между ними. Когнитивный агент - это интеллектуальная система, моделирующая поведение и взаимодействие субъектов проблемно-ориентированной деятельности в виртуальной среде. Особенностью когнитивных агентов является реализация полного цикла: «восприятие – познание – исполнение» в среде двух искусственно имитируемых реальностей – виртуальное пространство и семантическое пространство знаний.

Цель виртуализации процессов управления региональным развитием - формирования адаптивных траекторий безопасного функционирования социально-экономической системы региона с учетом его внутренней динамики и возмущений внешнего окружения на основе когнитивных мультиагентных моделей контроля и оценки уровней безопасности региональных компонентов в реальном масштабе времени. Концепция виртуализации управления безопасностью развития арктических регионов РФ может быть реализована на основе формирования сетцентрической системы виртуальных когнитивных центров управления безопасностью. Основные задачи виртуального когнитивного центра управления безопасностью: моделирование и стратегическое прогнозирование, планирование, построение моделей взаимодействия субъектов управления, формирование виртуальных организационных структур в области обеспечения различных видов безопасности функционирования региональных подсистем и их компонентов.

### **Логическая архитектура ЕВИП**

Основное назначение ЕВИП - удовлетворение информационных потребностей и обеспечение согласованного информационного взаимодействия субъектов и организационных структур безопасности посредством оперативного и своевременного предоставления соответствующих информационных ресурсов (данных) и сервисов для решения задач управления региональной безопасностью. Средством коммуникации субъектов безопасности с ЕВИП и друг с другом являются их онлайн-автоматизированные рабочие места и их виртуальные представители в ЕВИП - когнитивные программные агенты соответственно, функциональная структура и компонентный состав которых непосредственно и взаимно влияют на архитектуру и функционирование ЕВИП. Доступ к ресурсам ЕВИП и виртуальное сотрудничество субъектов безопасности в единой информационной среде осуществляется через унифицированную точку доступа, реализуемую в виде интегрированного Арктического Интернет-портала [www.ru-arctic.net](http://www.ru-arctic.net) (рис. 3), представляющего собой мультипредметный веб-ресурс, в рамках которого представляется возможным связать действующие системы ситуационно-кризисных и когнитивных центров управления безопасностью в Арктике, а также интегрировать в единое целое разнообразные информационные и аналитические ресурсы арктической направленности.

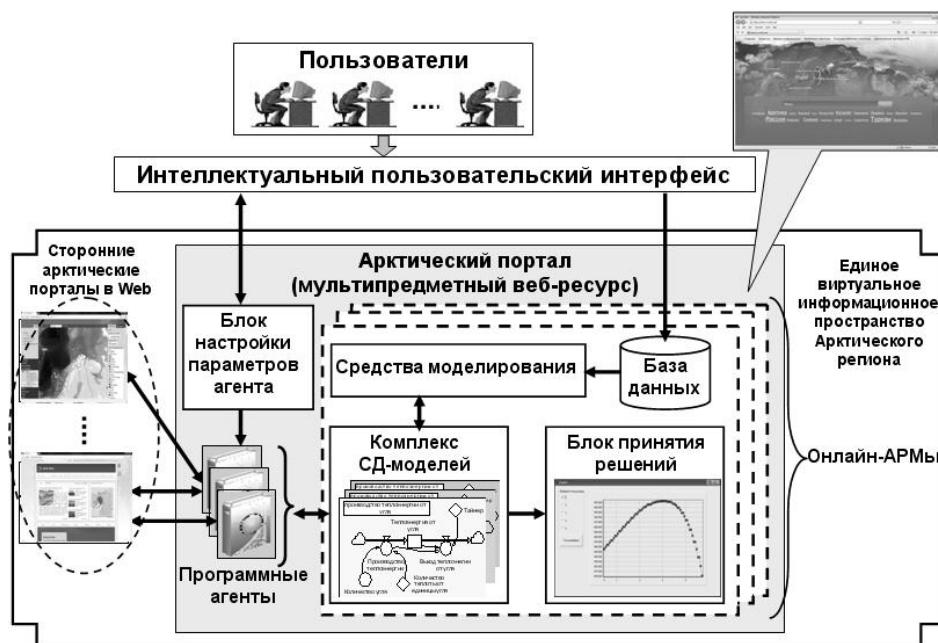


Рис. 3. Архитектура и компоненты системы RU-Arctic.net

В ходе исследований разработаны многоуровневая модульная структура и функциональные компоненты ЕВИП для задач управления региональной безопасностью в Арктике, которые представлены на рис. 4.

С точки зрения общей логики работы, разрабатываемая программная система имеет мультиагентную реализацию и ориентирована на открытые сети агентов. Каждый субъект региональной безопасности имеет возможность создать в системе одного или нескольких программных агентов, которые представляют его компетенции в ЕВИП и тип которых соответствует ведомственной принадлежности субъекта и вида безопасности, за обеспечение которой он несет ответственность.

Для использования ЕВИП субъектам региональной безопасности требуется:

- 1) завести себе узел в ЕВИП;
- 2) подключиться через унифицированную точку доступа к ЕВИП, либо через ведомственную информационную систему управления безопасностью, интегрированную в ЕВИП;
- 3) зарегистрировать себя и определить свои компетенции для создания онлайн-АРМ, а также настроить необходимые опции своего агента;
- 4) активировать агента.

После этого следует ожидать результатов деятельности агента, который автоматически выполняет всю работу по сбору, проблемно-ориентированному поиску и анализу оперативной информации об обстановке на контролируемом объекте, оценке рисков возникновения потенциальных угроз безопасности объектов управления, подбору субъектов для совместного решения задач управления безопасностью, формированию виртуальных организационных структур безопасности (коалиций агентов) и т.д.

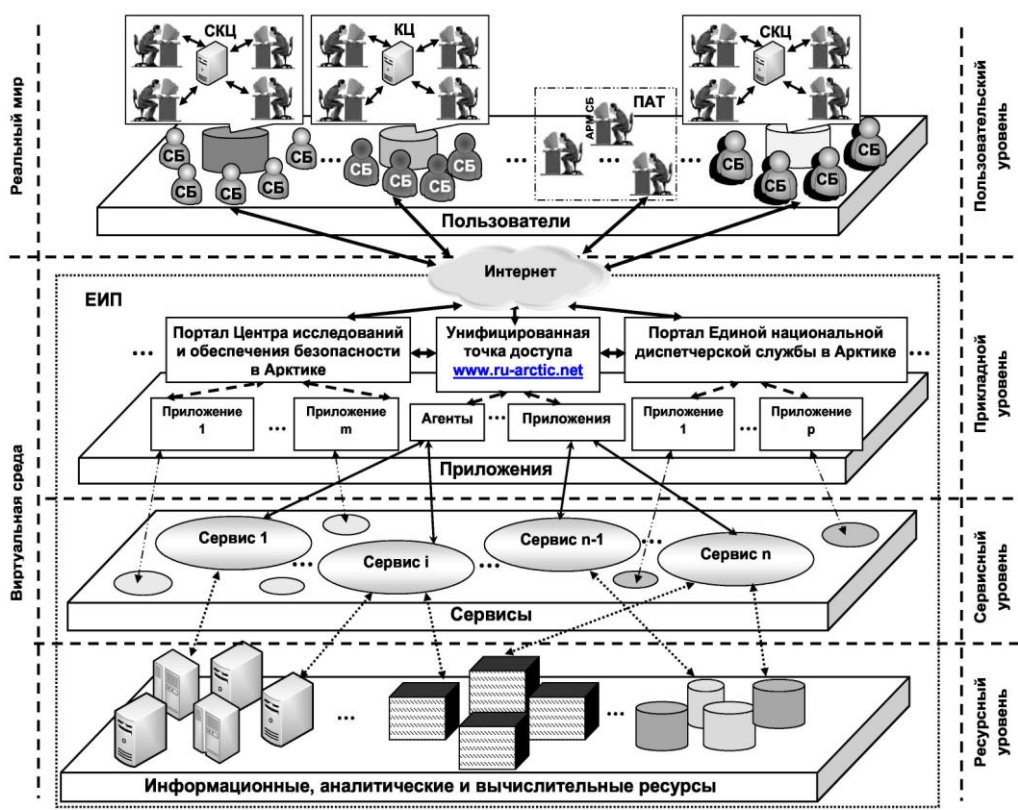


Рис. 4. Логическая архитектура и компоненты ЕВИП для задач управления региональной безопасностью

В процессе работы системы агент взаимодействует с субъектом безопасности - конечным пользователем, предоставляя на рассмотрение результаты своей деятельности или запрашивая уточняющую информацию о сформулированных пользователем задачах в случае поступления экстренной информации в систему, требующей оперативного реагирования, а также в случае изменения структуры или атрибутов ЕВИП, или недостаточности информации о необходимых действиях, которые нужно предпринять. При этом пользователь может выбрать, как это будет происходить: интерактивно в стиле «вопрос-ответ» или в автоматическом режиме. В результате такого взаимодействия формируется система знаний о стратегиях управления безопасностью конкретных процессов и объектов как в стабильных, так и в критических ситуациях.

### Иерархическая модель развертывания деятельности когнитивных агентов в мультиагентных виртуальных средах

Одной из центральных задач проектирования и разработки проблемно-ориентированных мультиагентных виртуальных систем является исследование функциональной структуры и динамики деятельности когнитивных агентов субъектов проблемно-ориентированной деятельности в мультиагентной

виртуальной среде. Здесь обычная, принятая в информатике модель деятельности типа "черного ящика" [13] оказывается недостаточной. В интересах построения и обоснования архитектур агентов как виртуальных деятелей необходимы исследования общих принципов и внутренних механизмов деятельности, что предполагает разработку обобщенной модели деятельности как сложной, автономной, самоорганизующейся системы.

Для моделирования поведения субъектов проблемно-ориентированной деятельности в открытых мультиагентных виртуальных средах предлагается иерархическая модель развертывания деятельности когнитивных агентов с имитационным аппаратом (рис. 5), представляющая собой многослойную семантическую сеть. Ядром данной модели является четырехуровневая схема развертывания деятельности: "*деятельность*  $\rightarrow$  *ситуация*  $\rightarrow$  *действие*  $\rightarrow$  *операция*" (в отличие от трехуровневой модели А.Н. Леонтьева [14]). Модель обеспечивает технологическую основу для синтеза функциональной структуры и анализа динамики взаимодействия когнитивных агентов в мультиагентных виртуальных системах, ориентированных на решение задач управления региональным развитием.

В данной модели на каждом уровне отражаются как радиальные связи (от периферии к центру) между регулятивными (в частности, интенциональными и поведенческими) и морфологическими компонентами деятельности, так и кольцевые связи между базовыми функциями организации деятельности. В общем случае можно указать, что:

*Деятельность* = *F* (*среда, потребности, мотивации, планирование, знания*);

*Ситуация* = *S* (*деятельность, обстоятельства, желания, моделирование, убеждения*);

*Действие* = *G* (*ситуация, объекты, цели, стратегии, умения*);

*Операция* = *H* (*действие, условия, задачи, тактики, навыки*),

где *F*, *S*, *G* и *H* – отношения полиморфизма ("один-ко-многим").

В отличие от представления деятельности типа "черного ящика", эта четырехуровневая модель может рассматриваться как "прозрачный ящик". В ней раскрываются внутренние механизмы деятельности путем анализа подсистем представления (моделирования внешней среды) и опыта, поведения (внешней регуляции) и интенциональной подсистемы (саморегуляции). Анализ деятельности можно проводить на основе как вертикальных отношений "мотивы – желания – цели – задачи", "планы – модели – стратегии – реакции", так и горизонтальных отношений "потребности – мотивы – планы – знания", "объекты удовлетворения потребностей – цели – стратегии – умения", "условия – задачи – тактики – навыки", определяющих автономные контуры самоорганизации (по Б.Г. Ананьеву). Соответственно, понятие агента как деятеля можно определить в зависимости от выбранного (или технически достижимого) уровня антропоморфизма неким подмножеством из указанного набора характеристик деятельности. Так, на верхнем уровне интерпретируемые интеллектуальными агентами потребности формируют сферу мотивации, а построение планов реализации мотивов требует пополнения знаний или пересмотра убеждений агента моделированием характеристик нижнего уровня и их связей с функциями среднего уровня.

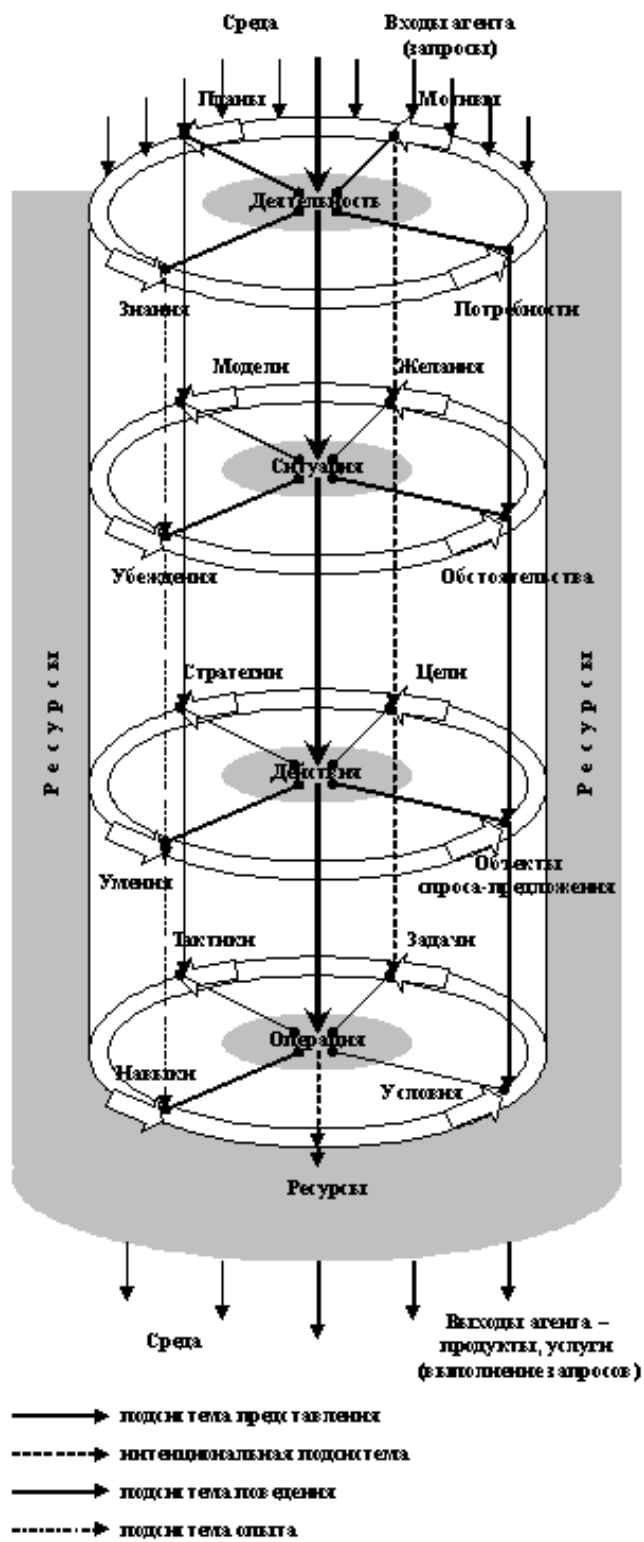


Рис. 5. Обобщенная модель развертывания деятельности когнитивных агентов

## **Заключение**

Таким образом, в ходе исследований предложено развитие мультиагентного подхода для решения задач информационного обеспечения управления безопасностью функционирования региональных социально-экономических систем на основе формирования и использования, проблемно-ориентированных мультиагентных виртуальных пространств, как ситуационно-коалиционных многоагентных систем. Предлагаемое технологическое решение обеспечивает виртуализацию процессов принятия решений и функций управления субъектов региональной безопасности, а также моделирование их целенаправленной деятельности.

Агентно-ориентированная виртуализация и создание проблемно-ориентированных мультиагентных виртуальных пространств – это новый виток развития и становления философии когнитивного управления сложными системами. Конвергенция когнитивных мультиагентных и веб-технологий обеспечивает базис для получения качественно новых технологических решений в области разработки средств информационно-аналитической поддержки управления безопасностью функционирования сложных динамических систем и процессов.

Управление региональной безопасностью на основе мультиагентных виртуальных пространств позволяет проиграть и оценить возможные варианты диффузии ситуации на треке развития региона на агентных имитационных моделях в многомерном пространстве критериев для последующего синтеза траекторий безопасного функционирования региональных социально-экономических систем, адекватных стратегиям регионального развития. В таком ключе концепция агентной виртуализации может быть расширена на решение широкого спектра задач, связанных с управлением региональным развитием.

Виртуальные пространства регионов – следующий этап на пути создания виртуальных тренажеров для чиновников, менеджеров, системных аналитиков, военных, предназначенных для интеллектуальной поддержки принятия решений по управлению региональными социально-экономическими системами на основе когнитивных мультиагентных моделей и технологий, а также для автоматизированного синтеза адаптивных траекторий развития региона с учетом реализации механизмов адаптации к динамике социально-экономической среды.

Полученные результаты смогут найти применение при реализации «Стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2020 года» на территории Мурманской области.

## **ЛИТЕРАТУРА**

1. Смирнов, А.И. Глобальная безопасность и «мягкая сила 2.0»: вызовы и возможности для России / А.И. Смирнов, И.Н. Кохтюлина. - М.: ВНИИ-геосистем, 2012.- 252 с.
2. Маслобоев, А.В. Интегрированная информационно-аналитическая среда поддержки управления региональной безопасностью: этапы и технологии реализации / А.В. Маслобоев, В.А. Путилов // Труды Института системного анализа РАН.- 2012.- Т.62.- №3.- С.61-73.

3. Когнитивные центры как информационные системы для стратегического прогнозирования / И.В. Десятов и др. // Информационные технологии и вычислительные системы.- 2011.- №1.- С.65-81.
4. Варшавский, В.И. Оркестр играет без дирижера: Размышления об эволюции некоторых технических систем и управлении ими. Изд.2, доп. / В.И. Варшавский, Д.А. Поспелов.- М.: URSS, 2009.- 224 с.
5. Мультиагентные технологии для разработки сетевых систем управления / А.В. Иващенко и др. // Известия Южного федерального университета. Серия: Технические науки.- 2011.- Т.116.- № 3.- С.11-23.
6. Душкин, Д.Н. Сетевые технологии: эволюция, текущее положение и области дальнейших исследований / Д.Н. Душкин, М.П. Фархадов // Автоматизация и современные технологии. 2012.- №1.- С. 21-29.
7. Жебрун, Н.Н. Использование сервис-ориентированных архитектур при построении информационных систем / Н.Н. Жебрун // Алгоритмы, методы и системы обработки данных.- 2005.- №10.- С.249-254.
8. Тарасов, В.Б. От многоагентных систем к интеллектуальным организациям: философия, психология, информатика / В.Б. Тарасов.- М.: Эдиториал УРСС, 2002.- 352 с.
9. Смирнов, А.В. Модели формирования коалиций кооперативных агентов: состояние и перспективы исследований / А.В. Смирнов, Л.Б. Шереметов // Искусственный интеллект и принятие решений.- 2011.- № 1.- С.36-48.
10. Маслобоев, А.В. Гибридная архитектура интеллектуального агента с имитационным аппаратом / А.В. Маслобоев // Вестник МГТУ: Труды Мурманского государственного технического университета.- 2009.- Т.12.- №1.- С.113-125.
11. Ломов, П.А. Интеграция онтологий с использованием тезауруса для осуществления семантического поиска / П.А. Ломов, М.Г. Шишаев // Информационные технологии и вычислительные системы.- 2009.- №3.- С.49-59.
12. Маслобоев, А.В. Концептуальная модель интегрированной информационной среды поддержки управления безопасностью развития региона / А.В. Маслобоев, В.А. Путилов // Вестник МГТУ: Труды Мурманского государственного технического университета.- 2011.- Т.14.- №4.- Мурманск: МГТУ, 2011.- С.842-853.
13. Шамис, А.Л. Поведение, восприятие, мышление: проблемы создания искусственного интеллекта / А.Л. Шамис.- М.: URSS, 2005.- 224 с.
14. Леонтьев, А.Н. Деятельность. Сознание. Личность. / А.Н. Леонтьев.- М.: Академия, 2005.- 352 с.

#### **Сведения об авторах**

*Путилов Владимир Александрович* – д.т.н., проф., директор,

e-mail: [putilov@iimm.kolasc.net.ru](mailto:putilov@iimm.kolasc.net.ru)

*Vladimir A. Putilov* - Dr. of Sci. (Tech.), Prof., Director

*Маслобоев Андрей Владимирович* – к.т.н., старший научный сотрудник,

e-mail: [masloboev@iimm.kolasc.net.ru](mailto:masloboev@iimm.kolasc.net.ru)

*Andrey V. Masloboev* - Cand. of Sci. (Tech.), Senior research fellow

УДК 681.5

К.В. Богатиков<sup>1</sup>, И.Е. Кириллов<sup>2</sup>, И.Н. Морозов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ФГУП ВНИИА «Автоматика» им. Духова Н.Л., г. Москва

<sup>2</sup> Институт информатики и математического моделирования Кольского НЦ РАН,  
Кольский филиал ПетрГУ

## СИНТЕЗ СТРУКТУР ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ НАДЕЖНОСТИ СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ АРКТИЧЕСКОГО РЕГИОНА\*

### Аннотация

В работе описана технология синтеза структуры оценки состояния надежности социально-экономической системы Арктического региона на основе использования сетей встречного распространения. Для определения состояний надежности социально-экономической системы в работе предлагается использовать элементы многопороговой логики.

### Ключевые слова:

*социально-экономическая система, оценка состояния, сеть встречного распространения.*

K.V. Bogatikov, I.E. Kirillov, I.N. Morozov

## STRUCTURE SYNTHESIS RELIABILITY ASSESSMENT OF SOCIAL AND ECONOMIC SYSTEM IN THE ARCTIC REGION

### Abstract

The article describes the technology of synthesis of structure reliability assessment of socio-economic system of the Arctic region through the use of counter-proliferation network. To determine the reliability of the state of social and economic system we propose to use the elements MULTITHRESHOLD logic.

### Keywords:

*socio-economic system, condition estimation, network counterpropagation.*

### Введение

Социально-экономическая система региона является по существу сложной иерархичной системой с огромным набором всевозможных состояний. Выделить данные состояния зачастую не представляется возможным, в силу влияющих на них тех или иных факторов. Для определения состояний и их диапазонов необходимо разрабатывать структуры оценки, позволяющие выделять необходимые состояния в виде целей достижения системой. Перспективной выглядит идея использования для этих целей сетей встречного распространения.

Во встречном распространении объединены два хорошо известных алгоритма: самоорганизующаяся карта Кохонена [1] и звезда Гроссберга [2-4]. Их объединение ведет к свойствам, которых нет ни у одного из них в отдельности.

Сеть встречного распространения функционирует подобно столу справок, способному к обобщению. В процессе обучения входные векторы ассоциируются с соответствующими выходными векторами. Эти векторы могут

---

\* Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 12-07-00138 - Разработка когнитивных моделей и методов формирования интегрированной информационной среды поддержки управления безопасностью Арктических регионов России).



быть двоичными, состоящими из нулей и единиц, или непрерывными. Когда сеть обучена, приложение входного вектора приводит к требуемому выходному вектору. Обобщающая способность сети позволяет получать правильный выход даже при приложении входного вектора, который является неполным или слегка неверным. Это позволяет использовать данную систему для оценки целеустремленного состояния социально-экономической системы арктического региона.

### Структура сети

Первоначально, для оценки состояний социально-экономической системы, предлагается выделить ее основные составляющие (показатели). Основные показатели приведены в табл. 1 [5].

Таблица 1

Базовые показатели социально-экономической системы

Показатели	Обозначение
Валовой региональный продукт (ВРП), %	$\Delta ВРП$
Среднедушевые денежные доходы населения в месяц, %	$\Delta ДН$
Численность населения, %	$\Delta ЧН$
Доходы консолидированного бюджета, без учета фин. помощи, %	$\Delta ДБ$

На рис. 1 изображена версия прямого действия сети встречного распространения.

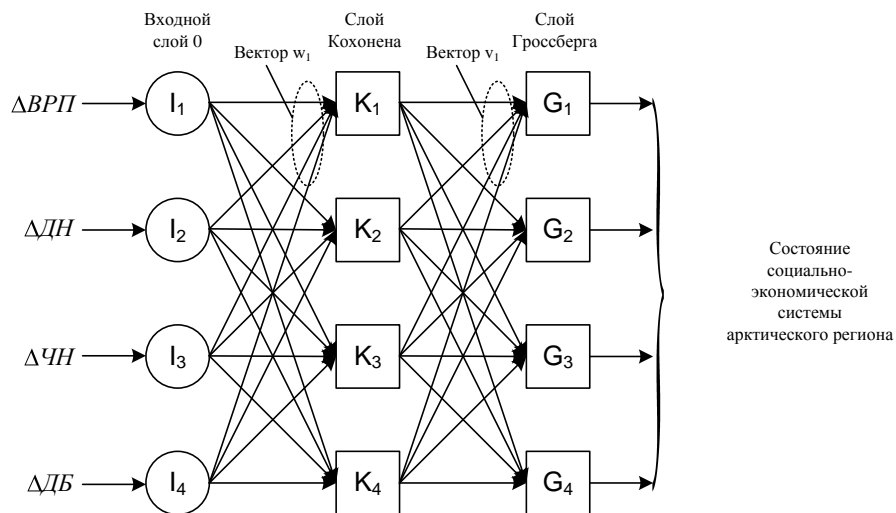


Рис. 1. Сеть с встречным распознаванием без обратных связей

Нейроны слоя 0 (показанные кружками) служат лишь точками разветвления и не выполняют вычислений. Каждый нейрон слоя 0 соединен с каждым нейроном слоя 1 (называемого слоем Кохонена) отдельным весом  $w_{np}$ . Эти веса в целом рассматриваются как матрица весов  $W$ . Аналогично, каждый нейрон в слое Кохонена (слое 1) соединен с каждым нейроном в слое Гроссберга (слое 2) весом  $v_{np}$ . Эти веса образуют матрицу весов  $V$ .

Как и многие другие сети, встречное распространение функционирует в двух режимах: в нормальном режиме, при котором принимается входной вектор  $X$  и выдается выходной вектор  $Y$ , и в режиме обучения, при котором подается входной вектор и веса корректируются, чтобы дать требуемый выходной вектор.

### *Слой Кохонена*

Для заданного входного вектора только один нейрон Кохонена выдает на выходе логическую единицу, все остальные выдают ноль.

Ассоциированное с каждым нейроном Кохонена множество весов соединяет его с каждым входом. Подобно нейронам большинства сетей выход NET каждого нейрона Кохонена является просто суммой взвешенных входов. Это может быть выражено следующим образом:

$$NET_j = w_{1j}x_1 + w_{2j}x_2 + \dots + w_{mj}x_m, \quad (1)$$

где  $NET_j$  – это выход NET нейрона Кохонена  $j$ .

$$NET_j = \sum_i x_i w_{ij} \quad (2)$$

или в векторной записи

$$N = XW, \quad (3)$$

где  $N$  – вектор выходов NET слоя Кохонена.

Нейрон Кохонена с максимальным значением NET является «победителем». Его выход равен единице, у остальных он равен нулю.

### *Слой Гроссберга*

Слой Гроссберга функционирует в сходной манере. Его выход NET является взвешенной суммой выходов  $k_1, k_2, \dots, k_n$  слоя Кохонена, образующих вектор  $K$ . Вектор соединяющих весов, обозначенный через  $V$ , состоит из весов  $v_{11}, v_{21}, \dots, v_{np}$ . Тогда выход NET каждого нейрона Гроссберга есть:

$$NET_j = \sum_i k_i w_{ij}, \quad (4)$$

где  $NET_j$  – выход  $j$ -го нейрона Гроссберга, или в векторной форме.

$$Y = KV, \quad (5)$$

где  $Y$  – выходной вектор слоя Гроссберга,  $K$  – выходной вектор слоя Кохонена,  $V$  – матрица весов слоя Гроссберга.

Если слой Кохонена функционирует таким образом, что лишь у одного нейрона величина NET равна единице, а у остальных равна нулю, то лишь один элемент вектора  $K$  отличен от нуля, и вычисления очень просты. Фактически каждый нейрон слоя Гроссберга лишь выдает величину веса, который связывает этот нейрон с единственным ненулевым нейроном Кохонена.

### Обучение слоя Кохонена

Слой Кохонена классифицирует входные векторы в группы. Это достигается с помощью такой подстройки весов слоя Кохонена, что близкие входные векторы активируют один и тот же нейрон данного слоя. Затем задачей слоя Гроссберга является получение требуемых выходов.

Всем весам сети перед началом обучения следует придать начальные значения. Общепринятой практикой при работе с нейронными сетями является присваивание весам небольших случайных значений. При обучении слоя Кохонена случайно выбранные весовые векторы следует нормализовать. Окончательные значения весовых векторов после обучения совпадают с нормализованными входными векторами. Поэтому нормализация перед началом обучения приближает весовые векторы к их окончательным значениям, сокращая, таким образом, обучающий процесс.

Наиболее желательное решение состоит в том, чтобы распределять весовые векторы в соответствии с плотностью входных векторов, которые должны быть разделены, помещая тем самым больше весовых векторов в окрестности большого числа входных векторов.

Одно из решений, известное под названием метода выпуклой комбинации (convex combination method), состоит в том, что все веса приравниваются одной и той же величине

$$w_i = \frac{1}{\sqrt{n}}, \quad (6)$$

где  $n$  – число входов и, следовательно, число компонент каждого весового вектора. Благодаря этому все весовые векторы совпадают и имеют единичную длину. Каждой же компоненте входа  $X$  придается значение

$$x_i = \alpha x_i + \frac{1 - \alpha}{\sqrt{n}}, \quad (7)$$

где  $n$  – число входов. В начале  $\alpha$  очень мало, вследствие чего все входные векторы имеют длину, близкую к  $\frac{1}{\sqrt{n}}$ , и почти совпадают с векторами весов.

В процессе обучения сети  $\alpha$  постепенно возрастает, приближаясь к единице. Это позволяет разделять входные векторы и окончательно приписывает им их истинные значения. Весовые векторы отслеживают один или небольшую группу входных векторов и в конце обучения дают требуемую картину выходов.

Другой подход состоит в добавлении шума к входным векторам. Тем самым они подвергаются случайным изменениям, схватывая в конце концов весовой вектор.

Также допустимо производить обучение со случайных весов, но на начальной стадии обучающего процесса подстраиваются все веса, а не только связанные с выигравшим нейроном Кохонена. Тем самым весовые векторы перемещаются ближе к области входных векторов. В процессе обучения коррекция весов начинает производиться лишь для ближайших к победителю нейронов Кохонена. Этот радиус коррекции постепенно уменьшается, так что в конце концов корректируются только веса, связанные с выигравшим нейроном Кохонена.

### *Режим интерполяции*

Мы обсудили алгоритм обучения, в котором для каждого входного вектора активировался лишь один нейрон Кохонена. Это называется методом аккредитации. Его точность ограничена, так как выход полностью является функцией лишь одного нейрона Кохонена.

В методе интерполяции целая группа нейронов Кохонена, имеющих наибольшие выходы, может передавать свои выходные сигналы в слой Гроссберга. Число нейронов в такой группе должно выбираться в зависимости от задачи, и убедительных данных относительно оптимального размера группы не имеется. Как только группа определена, ее множество выходов NET рассматривается как вектор, длина которого нормализуется на единицу делением каждого значения NET на корень квадратный из суммы квадратов значений NET в группе. Все нейроны вне группы имеют нулевые выходы.

Метод интерполяции способен устанавливать более сложные соответствия и может давать более точные результаты.

### *Обучение слоя Гроссберга*

Слой Гроссберга обучается относительно просто. Входной вектор, являющийся выходом слоя Кохонена, подается на слой нейронов Гроссберга, и выходы слоя Гроссберга вычисляются, как при нормальном функционировании. Далее, каждый вес корректируется лишь в том случае, если он соединен с нейроном Кохонена, имеющим ненулевой выход. Величина коррекции веса пропорциональна разности между весом и требуемым выходом нейрона Гроссберга, с которым он соединен. В символьной записи

$$v_{ijn} = v_{ijc} + \beta(y_j - v_{ijc})k_i, \quad (8)$$

где  $k_i$  – выход  $i$ -го нейрона Кохонена (только для одного нейрона Кохонена он отличен от нуля);  $y_j$  –  $j$ -ая компонента вектора желаемых выходов.

Первоначально  $\beta$  берется равным  $\sim 0,1$  и затем постепенно уменьшается в процессе обучения.

Веса слоя Гроссберга будут сходиться к средним величинам от желаемых выходов, тогда как веса слоя Кохонена обучаются на средних значениях входов. Обучение слоя Гроссберга – это обучение с учителем, алгоритм располагает желаемым выходом, по которому он обучается. Обучающийся без учителя, самоорганизующийся слой Кохонена дает выходы в недетерминированных позициях. Они отображаются в желаемые выходы слоем Гроссберга.

### **Оценка состояния надежности социально-экономической системы**

Выход разработанной сети встречного распространения будет давать номер типового состояния рассматриваемой социально-экономической системы региона. Данный номер сравнивается с номерами в базе данных (табл. 2) и далее осуществляется выбор текущего состояния системы.

Таблица 2

Форма представления состояний в базе данных

Состояние	Номер
$S_1$	0001
$S_2$	0010
...	...

Для оценки состояния надежности социально-экономической системы предлагается использовать многопороговую логику [6].

Многопоровую логику можно рассматривать как обобщение пороговой. Логическая полнота многопорогового элемента (МПЭ), являющегося функциональной ячейкой логического устройства, выполненного в базисе многопороговой логики, обусловлена наличием группы порогов, реализуемых данным МПЭ. Под МПЭ будем понимать элемент, функционирующий согласно выражению, приведенному в работе [7].

$$y = \frac{1}{2} \sum_{k=0}^K \text{sgn} \left[ (n) - a_k + 1 \right] \quad (9)$$

Функциональная схема МПЭ приведена на рис. 2.

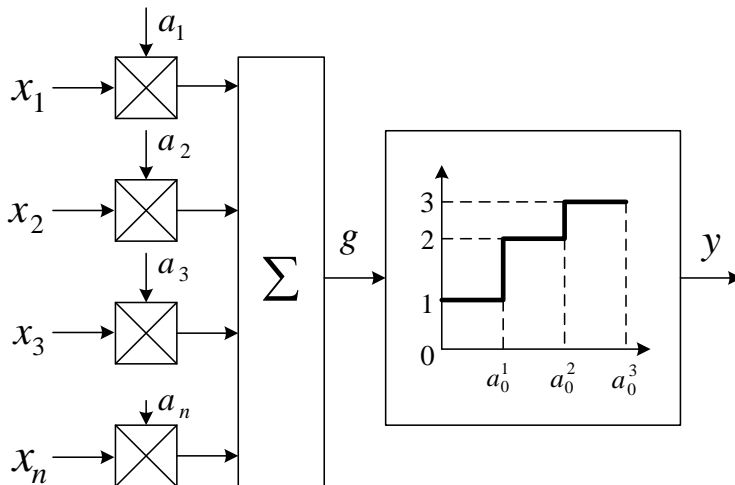


Рис. 2. Функциональная схема МПЭ

В соответствии с пороговыми значениями функции активации осуществляется выбор терм-множеств функции принадлежности состояний надежности рассматриваемой системы, который позволяет с помощью известных методик определить состояние надежности системы.

## **Заключение**

В результате работы предложена технология синтеза структуры оценки состояния надежности социально-экономической системы Арктического региона. Технология в своей основе построена на использовании сетей встречного распространения и позволяет осуществлять определение состояний системы при большом количестве входных векторов. В работе также предлагается использовать элементы многопороговой логики, позволяющие определить состояния надежности социально-экономической системы.

## **ЛИТЕРАТУРА**

1. Kohonen T. Self-organization and associative memory. 2d ed. New-York, Springer-Verlag. -1988.
2. Grossberg S. Some networks that can learn, remember and reproduce any number of complicated space-time patterns. Journal of Mathematics and Mechanics. -1969, 19:53-91.
3. Grossberg S. Embedding fields: Underlying philosophy, mathematics, and applications of psycho-logy, physiology, and anatomy. Journal of Cybernetics. - 1971, 1:28-50.
4. Grossberg S. Studies of mind and brain. Boston: Reidel. -1982.
5. Горохов, А.В. Имитационное моделирование развития арктических регионов РФ (на примере Мурманской области) с целью оценки экономических рисков / А.В. Горохов, М.В. Иванова, С.Н. Малыгина / Труды Кольского научного центра РАН. 4/2011(7). Информационные технологии. – Апатиты: Изд-во КНЦ РАН. -2011. – Вып.2. -С.151-155.
6. Теория нейронных сетей. Кн. 1: учебное пособие для вузов / под ред. А.И. Галушкина. - М.: ИПРЖР, 2000. -416 с: ил. (Нейрокомпьютеры и их применение). ISBN 5-93108-05-8.
7. Гутчин, И.Б. Бионика и надежность./ И.Б. Гутчин, А.С. Кузичев. - М.: Наука, 1967.

## **Сведения об авторах**

*Богатиков Константин Валерьевич* - инженер, ФГУП ВНИИА

«Автоматики» им. Духова Н.Л.

Россия, 115409, Москва, ул. Кошкина, д. 5, e-mail: [BGTKKV@mail.ru](mailto:BGTKKV@mail.ru)

*Konstantin V. Bogatikov* - engineer, Federal State Unitary Enterprise All-Russia Research Institute Of Automatics (VNIIA)

Russia, 115409, Moscow, st. Koshkina 5

*Кириллов Иван Евгеньевич* - к.т.н., младший научный сотрудник,

e-mail: [kirillov@rambler.ru](mailto:kirillov@rambler.ru)

*Ivan E. Kirillov* – Ph.D. (Tech. Sci.), junior researcher

*Морозов Иван Николаевич* - к.т.н., младший научный сотрудник,

e-mail: [moroz.84@mail.ru](mailto:moroz.84@mail.ru)

*Ivan N. Morozov* - Ph.D. (Tech. Sci.), junior researcher

УДК 681.5

**В.Н. Богатиков, И.Н. Морозов, И.Е. Кириллов**

Институт информатики и математического моделирования Кольского НЦ РАН,  
Кольский филиал ПетрГУ

**ПОДХОД К ОЦЕНКЕ СОСТОЯНИЙ СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМ ДЛЯ ЦЕЛЕЙ УПРАВЛЕНИЯ ИХ НАДЕЖНОСТЬЮ (НА ПРИМЕРЕ АРКТИЧЕСКОГО РЕГИОНА)\***

**Аннотация**

В работе предложен подход к оценке состояний социально экономических систем для целей управления их надежностью. Подход построен с использованием элементов теории нечетких множеств, что позволяет произвести количественную оценку состояния социально-экономических систем и сформировать модель социально-экономической системы, обладающую свойствами прогнозирования состояний системы и свойствами адаптивности к ее изменяющимся показателям.

**Ключевые слова:**

*нечеткая логика, оценка состояния, математическое моделирование.*

**V.N. Bogatikov, I.N. Morozov, I.E. Kirillov**

**APPROACH TO THE ASSESSMENT OF CONDITIONS OF SOCIAL AND ECONOMIC SYSTEMS FOR MANAGEMENT OF THEIR RELIABILITY (ON THE EXAMPLE OF THE ARCTIC REGION)**

**Abstract**

In work the approach to an assessment of conditions of socially economic systems for management of their reliability is offered. The approach is constructed with use of elements of the theory of indistinct sets that allows to make a quantitative assessment of a condition of social and economic systems and to create the model of social and economic system possessing properties of forecasting of conditions of system and properties of adaptability to its changing indicators.

**Keywords:**

*the fuzzy logic, condition estimation, mathematical modeling.*

**Введение**

Ядром системы обеспечения надежности социально-экономической системы является система диагностики состояний. В настоящее время существует уже достаточно много различных подходов к решению проблемы определения состояний.

Однако в настоящее время нет удовлетворительного решения данной проблемы определения состояний в силу сложности рассматриваемого класса систем. Само понимание состояния размыто и определяется конкретной сложившейся ситуацией, на основе большей частью эмпирической информации. Количество таких состояний не поддается строго формальной оценке и определяется в основном количеством ситуаций, возникающих в процессе

---

\* Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 12-07-00138 - Разработка когнитивных моделей и методов формирования интегрированной информационной среды поддержки управления безопасностью Арктических регионов России).

работы системы. Такой подход требует большого объема работы, который необходимо выполнить на этапах исследования социально-экономической системы для того, чтобы классифицировать состояния. При этом возникают сложности определения границ состояний, не говоря уже о том, что какие-либо изменения в социально-экономической системе могут потребовать дополнительных исследований новых различных ситуаций. Все это заставляет развивать новые подходы к проблеме оценки состояний систем.

Для решения вопросов, связанных с проведением формальных оценок состояния социально-экономической системы (на примере арктического региона) предлагается использовать подход, содержащий в своей основе элементы теории нечетких множеств.

### **Подход к оценке состояний социально-экономической системы арктического региона**

Первоначально, для оценки состояний социально-экономической системы, предлагается выделить ее основные составляющие (показатели). Данные показатели системы оказывают то или иное влияние друг на друга и формируют всевозможные состояния системы в целом.

Основные (базовые) показатели социально-экономической системы арктического региона и их взаимосвязь приведены в табл. 1 [1].

*Таблица 1*

Базовые показатели социально-экономической системы региона

Показатели		Взаимосвязь	
Валовой региональный продукт (ВРП)	Выручка (нетто) от продажи товаров (продукции, работ, услуг)	↑	↑
	Себестоимость проданных товаров (продукции, работ, услуг)		↓
	Среднедушевые денежные доходы населения		↑
	Среднегодовая численность, занятых в экономике		↑
	Инвестиции в основной капитал		↑
Доходы населения	ВРП	↑	↑
	Среднегодовая заработная плата		↑
	Уровень безработицы		↓
Численность населения	Миграционный прирост	↑	↑
	Естественный прирост		↑
	Уровень безработицы		↓
	Уровень социальной обеспеченности		↑
	Количество предприятий (раб. мест)		↑
Доходы бюджета	ВРП	↓	↓
	Среднегодовая заработная плата		↓
	Среднегодовая численность, занятых в экономике		↓
	Социальное потребление		↑
	Федеральная финансовая помощь		↑



Для оценки состояния социально-экономической системы региона в качестве исходных данных предлагается использовать статистические данные базовых показателей арктического региона за 1995-2009 гг.

При выделении диапазона изменения базовых показателей социально-экономической системы региона в качестве нормировки предлагается использовать процентное изменение того или иного показателя в сравнении выбранного года с предыдущим (табл. 2).

Таблица 2

Задание диапазона изменения базовых показателей

Показатели	Обозначение	Диапазон изменения
<b>Валовой региональный продукт (ВРП), %</b>	$\Delta ВРП$	<b>[-15;15]</b>
Выручка (нетто) от продажи товаров (продукции, работ, услуг), %	$\Delta В$	[-10;10]
Себестоимость проданных товаров (продукции, работ, услуг), %	$\Delta С$	[-7;7]
Среднегодовая численность занятых в экономике, %	$\Delta Ч$	[-3;3]
Инвестиции в основной капитал, %	$\Delta И$	[-14;14]
<b>Среднедушевые денежные доходы населения в месяц, %</b>	$\Delta ДН$	<b>[-8;8]</b>
Среднегодовая заработная плата, %	$\Delta ЗП$	[0;8]
Уровень безработицы, %	$\Delta Б$	[0;14]
<b>Численность населения, %</b>	$\Delta ЧН$	<b>[-5;3]</b>
Миграционный прирост (на 10 000 человек населения), %	$\Delta М$	[-8;8]
Естественный прирост (на 1000 человек населения), %	$\Delta Е$	[-3;3]
Уровень социальной обеспеченности	$СО$	[0,4;0,8]
Количество предприятий (на конец года), %	$\Delta П$	[-6;6]
<b>Доходы консолидированного бюджета, без учета фин. помощи, %</b>	$\Delta ДБ$	<b>[-10;10]</b>
Социальное потребление, в месяц, рублей; %	$\Delta СП$	[0;18]
Федеральная финансовая помощь, %	$\Delta ФП$	[0;20]

Таким образом, был задан наибольший диапазон изменения каждого из показателей, вычисляемый по различным годам. Условимся, что за пределы этого диапазона ни один из базовых показателей выйти не может.

Для адекватной оценки состояния социально-экономической системы необходимо исследовать все факторы, так или иначе влияющие на каждый из внутренних показателей. Рассмотрим внутренний показатель «Миграционный прирост» базового показателя «Численность населения».

На данный момент существует возможность разделить факторы, влияющие на внутренние показатели, на три группы.

В первую группу входят факторы неизменяемые в течение очень длительного времени (природные условия, географическое положение). Факторы, которые могут быть изменены постепенно, в течение длительного времени относят ко второй группе (создание инфраструктуры). Третья группа – факторы «быстрого» регулирования, имеющие возможность меняться в течение нескольких лет (льготы, повышение заработной платы и др.).

Несмотря на такое разделение основным для внутреннего показателя «Миграционный прирост» является создание новых рабочих мест и соответствующих условий жизни населения – с помощью данных факторов становится, возможно, регулирование миграционных процессов.

В соответствии с вышеизложенным, приведем факторы, определяющие миграцию, исходя из условий, что показатель «Миграционный прирост» будет рассмотрен с точки зрения управления (рис. 1).

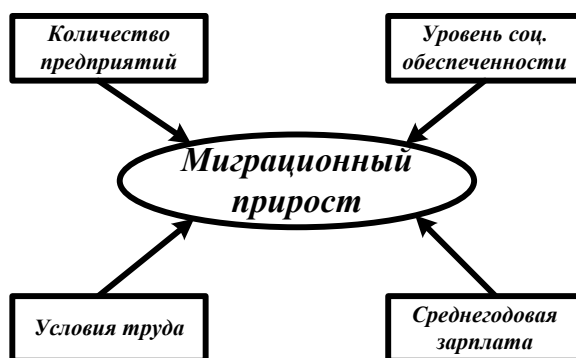


Рис. 1. Показатель «Миграционный прирост» с точки зрения управления

Для оценки показателя «Миграционный прирост» предлагается использовать подход, основанный на использовании элементов теории нечетких множеств. Применение теории нечетких множеств в данном случае позволит произвести оценку факторов (имеющих неявно выраженную информацию), влияющих на рассматриваемый показатель, с привлечением экспертов [2].

Формализация одной из лингвистических переменных представлена в табл. 3. На рис. 2 показаны функции принадлежности терм-множеств лингвистической переменной «количество предприятий».

Формализация лингвистической переменной  
«Количество предприятий  $\Delta\Pi$ »

Область регламентного состояния	Термножество	Область определения термножества	Функция принадлежности термножества
[-6; 6]	«Низкое»	[-6; 0]	$1, \quad \text{при } -6 \leq \Delta\Pi \leq -3$ $\frac{1}{1 + \exp(5 \cdot (\Delta\Pi - 1.5))} \quad \text{при } -3 < \Delta\Pi \leq 0$
	«Среднее»	[-3; 3]	$\frac{1}{1 + \exp(-5 \cdot (\Delta\Pi - 1.5))} \quad \text{при } -3 \leq \Delta\Pi \leq 0$ $\frac{1}{1 + \exp(5 \cdot (\Delta\Pi - 1.5))} \quad \text{при } 0 < \Delta\Pi \leq 3$
	«Высокое»	[0; 6]	$\frac{1}{1 + \exp(-5 \cdot (\Delta\Pi - 1.5))} \quad \text{при } 0 \leq \Delta\Pi \leq 3$ $1, \quad \text{при } 3 < \Delta\Pi \leq 6$

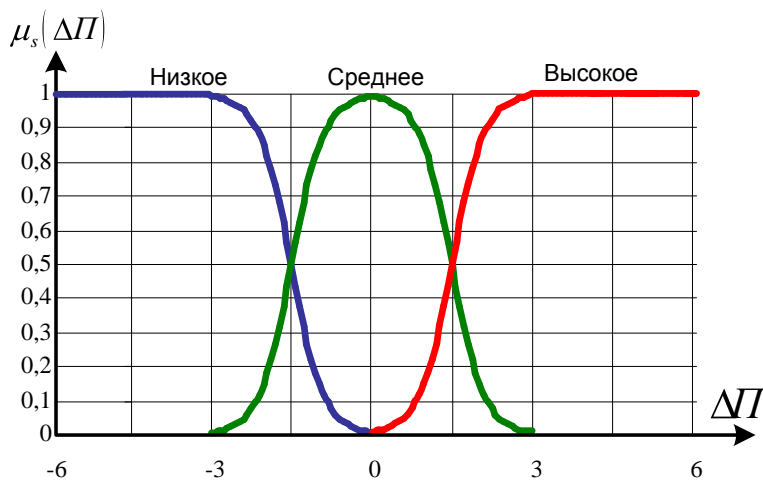


Рис. 2. Функции принадлежности термножеств лингвистической переменной «количество предприятий»

В соответствии с предпочтениями экспертов составлены правила нечеткого логического вывода формата ЕСЛИ-ТО. Пример правила:

1. Если «Количество предприятий  $\Delta\Pi$ » – «низкое», и «Уровень социальной обеспеченности  $CO$ » – «низкий», и «Среднегодовая заработная плата  $\Delta ЗП$ » – «низкая», и «Условия труда  $УТ$ » – «плохие», тогда «Миграционный прирост  $\Delta M$ » – «низкий».

Структура системы нечеткого вывода приведена на рис. 3.

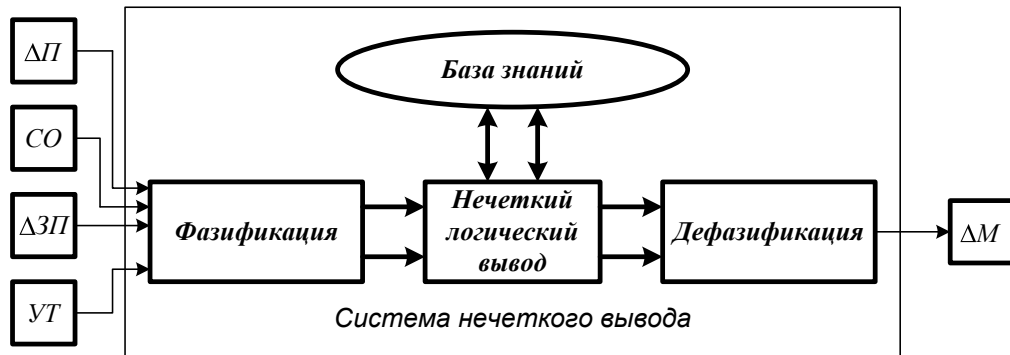


Рис. 3. Структура системы нечеткого вывода

Так как управляющие параметры должны иметь возможность изменяться в течение короткого периода времени, то предлагается использовать «упрощенную» структуру системы нечеткого вывода, исключив из входных управляющих параметров параметры «Количество предприятий  $\Delta П$ » и «Уровень социальной обеспеченности  $СО$ ». Такое упрощение является допустимым в связи с невозможностью изменения данных параметров в короткие промежутки времени.

В качестве реализации системы нечеткого вывода предлагается использовать нейро-фаззи сети (НФС).

Структура нейро-фаззи сети, реализующей упрощенную систему нечеткого вывода, показана на рис. 4 [3].

Входные переменные  $X_{BX}^1$  и  $X_{BX}^2$  НФС обозначены выше.

Для всех постоянных времени НФС будет однотипной.

В первом слое нейро-фаззи сети проводится фаззификация входных переменных. Выходы узлов первого слоя представляют собой значения функций принадлежности терм-множеств конкретных значений соответствующих входных переменных.

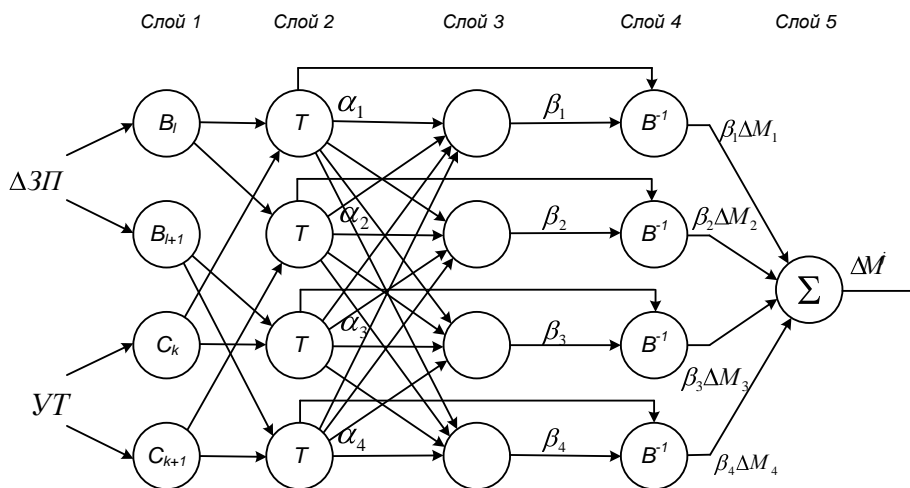


Рис. 4. Структура нейро-фаззи сети (НФС)

Выходами нейронов второго слоя являются степени истинности предпосылок каждого правила нечеткого вывода базы знаний системы:

$$\begin{aligned}\alpha_1 &= B_l \langle \text{ЗП} \rangle \wedge C_k \langle \text{Т} \rangle \\ \alpha_2 &= B_l \langle \text{ЗП} \rangle \wedge C_{k+1} \langle \text{Т} \rangle \\ \alpha_3 &= B_{l+1} \langle \text{ЗП} \rangle \wedge C_k \langle \text{Т} \rangle \\ \alpha_4 &= B_{l+1} \langle \text{ЗП} \rangle \wedge C_{k+1} \langle \text{Т} \rangle\end{aligned}\quad (1)$$

Выходы нейронов третьего слоя вычисляют величины:

$$\begin{aligned}\beta_1 &= \frac{\alpha_1}{\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4} \\ \beta_2 &= \frac{\alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4} \\ \beta_3 &= \frac{\alpha_3}{\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4} \\ \beta_4 &= \frac{\alpha_4}{\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4}\end{aligned}\quad (2)$$

Нейроны четвертого слоя выполняют операции:

$$\begin{aligned}\beta_1 \Delta M_1 &= \beta_1 \cdot B^{-1} \langle \psi_1 \rangle \\ \beta_2 \Delta M_2 &= \beta_2 \cdot B^{-1} \langle \psi_2 \rangle \\ \beta_3 \Delta M_3 &= \beta_3 \cdot B^{-1} \langle \psi_3 \rangle \\ \beta_4 \Delta M_4 &= \beta_4 \cdot B^{-1} \langle \psi_4 \rangle\end{aligned}\quad (3)$$

где

$$\begin{aligned}\Delta M_1 &= B^{-1} \langle \psi_1 \rangle = d_l + \frac{1}{c_l} \cdot \ln \left( \frac{1 - \alpha_1}{\alpha_1} \right) \\ \Delta M_2 &= B^{-1} \langle \psi_2 \rangle = d_l + \frac{1}{c_l} \cdot \ln \left( \frac{1 - \alpha_2}{\alpha_2} \right) \\ \Delta M_3 &= B^{-1} \langle \psi_3 \rangle = d_l + \frac{1}{c_l} \cdot \ln \left( \frac{1 - \alpha_3}{\alpha_3} \right) \\ \Delta M_4 &= B^{-1} \langle \psi_4 \rangle = d_l + \frac{1}{c_l} \cdot \ln \left( \frac{1 - \alpha_4}{\alpha_4} \right)\end{aligned}\quad (4)$$

Единственный нейрон пятого слоя вычисляет выход сети, т.е. выполняет операцию приведения к четкости центроидным способом:

$$\Delta M = \beta_1 \Delta M_1 + \beta_2 \Delta M_2 + \beta_3 \Delta M_3 + \beta_4 \Delta M_4 = \frac{\alpha_1 \Delta M_1 + \alpha_2 \Delta M_2 + \alpha_3 \Delta M_3 + \alpha_4 \Delta M_4}{\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4}. \quad (5)$$

Обучение данной нейро-фаззи сети проводится при помощи алгоритма обратного распространения ошибки (back propagation) [3, 4].

В результате предложенной методики, возможно, произвести оценку внутреннего показателя «Миграционный прирост» с использованием различных программных средств, в нашем случае это среда Matlab (рис. 5).

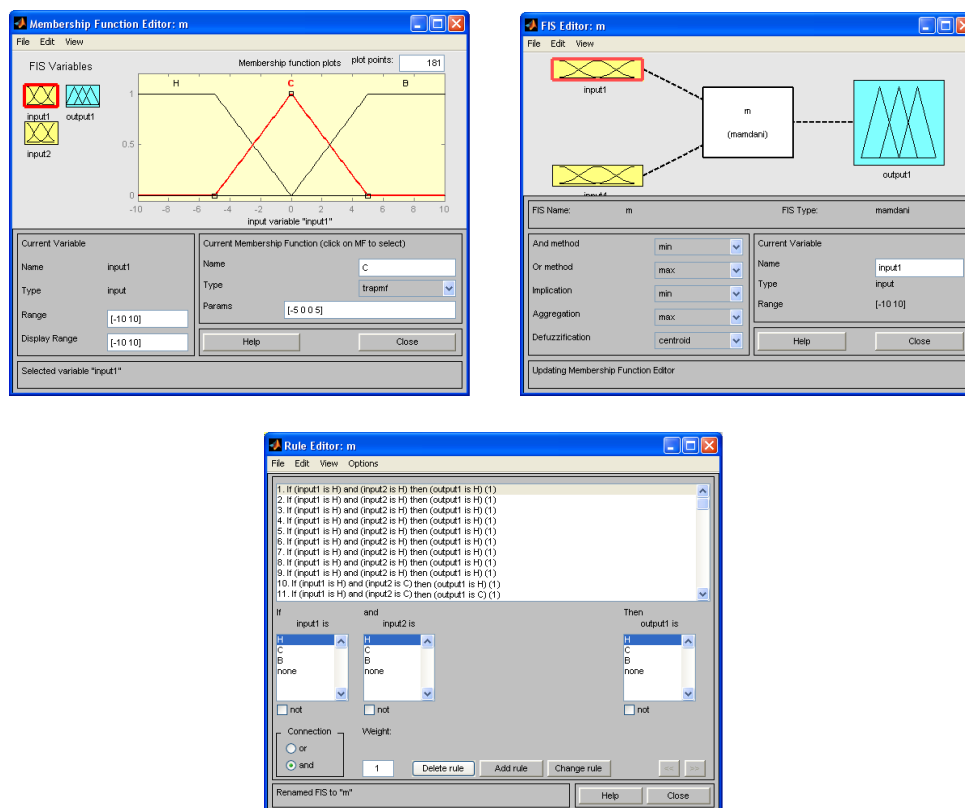


Рис. 5. Настройка параметров системы в среде Matlab

Результаты работы модели в сравнении со статистическими данными сведены в табл. 4.

Таблица 4

Результаты работы модели в сравнении со статистическими данными по показателю «Миграционный прирост»

Показатель	1995	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
Миграционный прирост (на 10 000 человек населения); статистические данные	-250,0	-165,0	-156,0	-143,0	-70,0	-51,0	-58,0	-60,0	-57,0	-88,0	-57,0
Миграционный прирост (на 10 000 человек населения); результаты работы предложенной системы	-252,0	-163,0	-151,0	-144,0	-71,0	-53,0	-57,0	-62,0	-57,0	-86,0	-56,0
Совпадение результатов, %	99,2	98,8	96,8	99,3	98,6	96,2	98,3	96,8	100	97,7	98,3

Совпадение результатов моделирования по сравнению со статистическими параметрами составляет в среднем 98,2%, максимальное отклонение показателя при моделировании составило 3,8%. Сравнение статистических данных с результатами моделирования показывает адекватность предложенной методики определения состояний социально-экономической системы арктического региона.

### **Заключение**

В результате предложенного подхода мы имеем возможность определить всевозможные состояния рассматриваемой системы и сформировать необходимое управляющее решение для конкретной ситуации в целях повышения надежности функционирования системы. Применение нейро-фаззи сетей позволяет создать модель социально-экономической системы арктического региона, обладающую свойствами прогнозирования возможных состояний при различном управлении системой, а также свойствами адаптивности в условиях произвольно меняющихся социально-экономических показателей.

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Горохов, А.В. Имитационное моделирование развития арктических регионов РФ (на примере Мурманской области) с целью оценки экономических рисков / А.В. Горохов, М.В. Иванова, С.Н. Малыгина // Труды Кольского научного центра РАН. Информационные технологии. – Апатиты: Изд-во КНЦ РАН. - 4/2011(7). – Вып. 2. -С.151-155.
2. Мелихов, А.Н. Ситуационные советующие системы с нечеткой логикой / А.Н. Мелихов, Л.С. Бернштейн, С.Я. Коровин. - М.: Наука, 1990. – 272 с.
3. Оссовский, С. Нейронные сети для обработки информации / С. Оссовский /Пер. с польского И.Д. Рудинского.– М.: Финансы и статистика, 2002. – 304 с.
4. Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта / А.Н. Аверкин и др. // под ред. Д.А. Поспелова. - М.: Наука, 1986. - 396 с.

### **Сведения об авторах**

*Богатилов Валерий Николаевич* - д.т.н., ведущий научный сотрудник,

e-mail: [ynbgtk@iimm.kolasc.net.ru](mailto:ynbgtk@iimm.kolasc.net.ru)

*Valery N. Bogatkov* - Dr. of Sci. (Tech.), leading researcher

*Морозов Иван Николаевич* - к.т.н., младший научный сотрудник,

e-mail: [moroz.84@mail.ru](mailto:moroz.84@mail.ru)

*Ivan N. Morozov* - Ph.D. (Tech. Sci.), junior researcher

*Кириллов Иван Евгеньевич* - к.т.н., младший научный сотрудник,

e-mail: [kirillov@rambler.ru](mailto:kirillov@rambler.ru)

*Ivan E. Kirillov* – Ph.D. (Tech. Sci.), junior researcher

УДК 004.94

**К.В. Богатиков, И.Е. Кириллов, И.Н. Морозов**

Институт информатики и математического моделирования Кольского НЦ РАН,  
Кольский филиал ПетрГУ

## МЕХАНИЗМ САМООРГАНИЗАЦИИ АГЕНТНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ\*

### Аннотация

В данной статье представлено описание подхода к созданию распределенной трехуровневой имитационной модели сложных динамических систем. Рассматриваются вопросы самоадаптации данной структуры при изменениях, проходящих в управляемой среде.

### Ключевые слова:

*имитационное моделирование, агентные системы, нейросети.*

**K.V. Bogatikov, I.E. Kirillov, I.N. Morozov**

## THE MECHANISM OF ADAPTATION AGENT MANAGEMENT

### Abstract

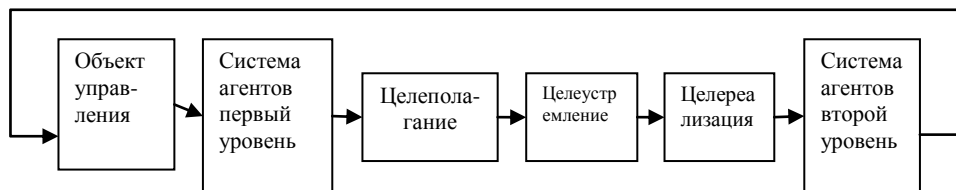
This paper describes a distributed approach to the three-level simulation models of complex dynamic systems. The issues of self-adaptation of the structure with changes taking place in a controlled environment.

### Keywords:

*simulation modeling, agent-based systems, neural networks.*

### Структура агентной системы

Решение задач управления сложными, динамически изменяющимися системами всегда вызывало ряд сложностей при её реализации. В работе предлагается схема системы управления сложными, динамическими системами, основанная на применении агентной технологии и позволяющая реализовать механизм самоорганизации. Будем рассматривать решение задач связанных с управлением безопасностью сложных систем. В общем виде структура системы управления (СУ) представлена на рис 1.



*Рис. 1. Структура системы управления*

Основная сложность заключается в том, что большинство систем находится под влиянием внешних и внутренних факторов. Как следствие этих влияний, возникает необходимость изменения структуры и функциональности системы. В них могут появляться новые элементы, или исчезать старые. Качественная

---

\* Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 12-07-00138 - Разработка когнитивных моделей и методов формирования интегрированной информационной среды поддержки управления безопасностью Арктических регионов России).



составляющая элементов систем, так же может быть различна, и при этом меняться со временем. Возникает необходимость в наделении системы управления свойством самоорганизации. Предлагается реализовать механизм самоорганизации, в рамках агентной системы, на основе порождающих функций агентов верхнего уровня.

Вторая сложность, возникающая при решении данного класса задач, заключается в отсутствии или нехватке информации необходимой при принятии управленческих решений в таких системах. Решение этой задачи возлагается на механизмы адаптации, закладываемых в поведение агентов, в рамках задач, решение которых возлагается на конкретный класс агентов.

На рис. 2 приводится схема управления, на которой указано располо-

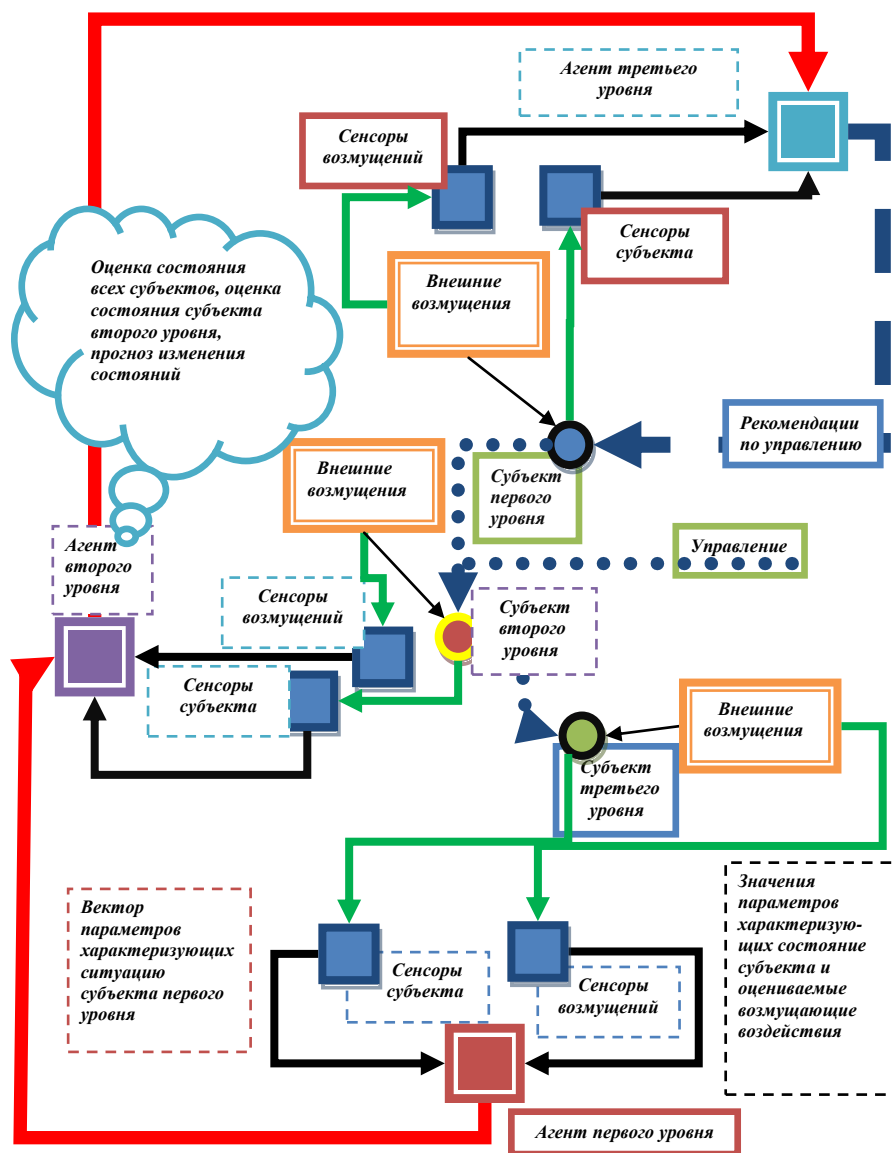


Рис. 2. Развернутая структура агентной СУ

жение агентных составляющих в «пространстве» относительно реальных субъектов системы, для которой решается задача управления безопасностью.

В данной схеме роль датчиков и регуляторов выполняет агентная система, кроме функций сбора информации и исполнения решений данная система будет выполнять еще три функции: целеполагание, целеустремление и целереализация. Данные функции предназначаются для реализации управления реальной системой.

Суть функционирования приведенной системы как системы управления следующая: на нижнем уровне системы функционируют выделенные в результате декомпозиции субъекты, состояние каждого можно определить по значениям их контролируемых параметров, а также по значениям внешних возмущающих воздействий. Все значения, влияющие на состояние субъекта определяются с помощью сенсоров субъекта и сенсоров возмущений, которые в свою очередь передают данные значения на агенты первого уровня, т.е. имеющиеся в системе сенсоры и агенты первого уровня выполняют роль датчиков в СУ субъектом третьего уровня.

После того как значения вектора параметров определяющих состояние субъекта третьего уровня через агенты первого уровня передаются на агенты второго уровня, агенты второго уровня выполняет процедуру оценки текущего состояния субъекта третьего уровня, а также прогнозирует развитие ситуации с помощью нейросетевого аппарата.

На основании определенных состояний субъектов третьего уровня, показаний своих собственных сенсоров, агент второго уровня определяет свое собственное состояние и передает информацию агенту третьего – верхнего уровня, который оперируя показаниями своих сенсоров, данными полученными от агента второго уровня, определяет состояние всей системы в целом.

В описании функционирования данной системы, приведенном выше, нет разъяснений о том, как генерируются управляющие решения. Перед тем как дать эти разъяснения приведем описание возможных агентов функционирующих на всех уровнях. Для этого рассмотрим еще одно схематичное отображение предлагаемой структуры управления, представленное на рис. 3.

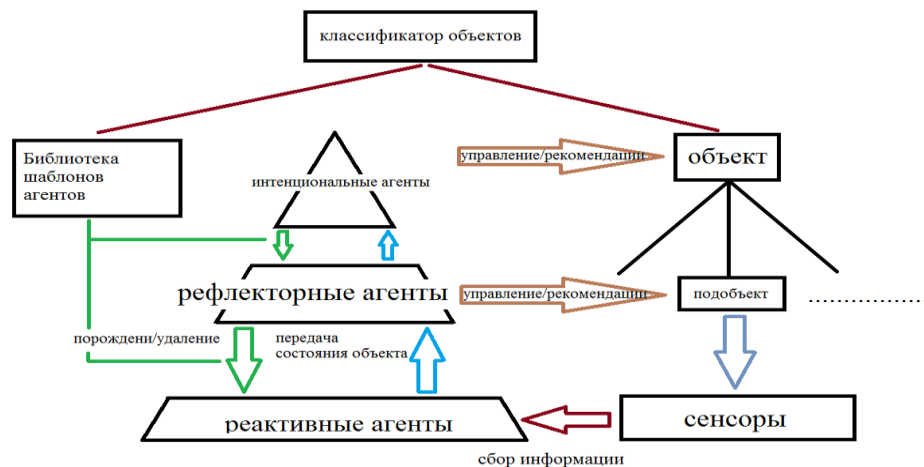


Рис. 3. Иерархическая структура определения и управления состояниями системы

Из данного рисунка видно, что в системе присутствуют три типа агентов, соответствующих различным уровням. На самом нижнем уровне функционируют реактивные агенты, порожденные агентами верхнего уровня, которые собирают информацию с сенсоров оценивающих состояния объектов нижнего уровня, преобразовывают её к определенному виду и передают агенту-родителю. Реактивные агенты не имеют ни сколько-нибудь развитого представления о внешней среде, ни механизма многошаговых рассуждений, ни достаточного количества собственных ресурсов. Реактивные агенты обладают очень ограниченным диапазоном предвидения. Они не способны планировать свои действия, их структура обратной связи, не содержит механизмов прогноза.

На втором уровне, порождающим реактивные агенты функционируют агенты, порождаемые верхним уровнем, агенты данного типа называются рефлекторными, они управляют жизненным циклом реактивных агентов и обрабатывают информацию, полученную от них. Рефлекторные агенты не имеют внутренних источников мотивации и собственных целей, а их поведение характеризуется простейшими (одношаговыми) выводами или автоматизмами [1]. Они представляют собой граничный случай понятия когнитивного агента и могут использоваться как «вспомогательные агенты». Данные агенты способны отвечать на вопросы и выполнять задания, которые ставят перед ними другие агенты, но решение этих задач не приводит к появлению у них собственных целей. Типичными примерами таких вырожденных агентов являются системы поиска в базах данных и простейшие логические регуляторы.

На самом верхнем уровне находятся интенциональные агенты, которые являются родителями агентов второго уровня, а так же принимают основные решения для реализации целей управления безопасностью. Подобные агенты наделены собственными механизмами мотивации. Это означает, что в них так или иначе моделируются внутренние убеждения, желания, намерения и мотивы, порождающие цели, которые и определяют их действия [1].

Предлагается использовать модели поведения агента, основанные на оценке состояний, рассмотренные в работах [2, 3, 4, 5].

**Модель поведения агента.** Агент может находиться в  $m$  состояниях  $y = \{y_i, i = \overline{1, m}\} \in Y$ , образующих его модель ограничений.

$p$  – потенциал агента, тогда  $y \in Y(p) \subseteq R^m$ .

$u \in U$  – управление со стороны центра. Проявление потенциала агента будет зависеть от управления  $u$ .

$\xi \in \Theta = [a, b] \subset R^1$  - представление агента о свойствах ситуации целеустремленного состояния, где  $a$  – разделяемые всеми агентами и центром представления (общее знание) и им известные;  $b$  – представления, известные только  $i$ -му агенту, в полезности которых он убежден,  $b = b(u)$ .

Наделим множество  $Y(p)$  следующими свойствами:

- выпукло;
- замкнуто.

Это означает  $Y(p_1) \subseteq Y(p_2) \subseteq \dots \subseteq Y(p_n) \subseteq \dots \subseteq W(p)$ ,

где  $W(p)$  – множество возможных состояний, характеризующих предельные потенциальные возможности агента,  $p_1, p_2, \dots, p_n, \dots$  – последовательность потен-

циальных возможностей агента, возрастающих за счет управления  $u$ .

Монотонность по  $\Theta$  - множество состояний  $Y(p(u), \xi)$  является расширяющимся на множестве свойств  $\Theta$ , то есть  $Y(p(u), \xi_1) \subset Y(p(u), \xi)$  при  $u \in U$ ,  $\xi, \xi_1 \in \Theta$ ,  $\mu(\xi) > \mu(\xi_1)$ , где  $\mu(\bullet)$  – субъективные оценки агента полезности своих представлений.

Монотонность по  $u \in U$  множества состояний  $Y(p(u), \xi)$  на  $\Theta$ , что означает  $W(p(u), \xi) \cap W(p(u), \xi_1) = \emptyset$ ,  $\mu(\xi) \neq \mu(\xi_1)$ ,  $\xi, \xi_1 \in \Theta$ .

Будем предполагать, что множество  $Y(p(u), \xi)$  непрерывно по Хаусдорфу на множестве представлений агента о свойствах ситуации целеустремленного состояния  $\Theta$  и множестве управлений со стороны центра  $U$ , соответственно, при любых  $u \in U$  и  $\xi \in \Theta$ .

Таким образом, становится ясно, что в ходе управления сложными, динамическими системами будет проявляться множество возможных потенциалов агента для конкретного состояния субъекта. При изменении качественных свойств субъекта, необходимо предусмотреть меры по изменению качественных свойств потенциала агентов или возможность появления агентов иной, новой структуры.

Далее приведем *модель внешнего окружения агента*, поскольку именно внешнее окружение влияет на ситуацию, которую оценивает агент, а следовательно, на его потенциал. Процесс функционирования любой системы можно рассматривать как последовательную схему смены ее состояний на некотором интервале времени  $(t_0, t_k)$ . Состояние системы в каждый момент времени  $t$  из этого интервала характеризуется набором параметров этой системы, на которые накладываются ограничения  $\bar{\varphi}(\bar{T}, \bar{K}, \bar{U}) \leq 0$ , зависящие от множеств параметров  $\{T_i, K_j, U_l\}$  (технологических –  $\{T_i, i=1 \dots I\}$ ; конструктивных –  $\{K_j, j=1 \dots J\}$ ; управления –  $\{U_l, l=1 \dots L\}$ ). Выход за эти ограничения означает переход процесса во внештатную ситуацию. Эти ограничения, «вырезают» на множестве всех состояний процесса  $n$ -мерную область, в которой процесс не выходит во внештатные ситуации – это область всех работоспособных состояний процесса:  $S_p \subseteq S$ .

Обобщая все вышеизложенное можно отметить, что основными задачами агента будут являться: оценка состояния системы, определение нового состояния, определения пути его достижения и выполнение действий направленных на перевод системы в нужное состояние, т.е. целеполагание, целеустремление и целереализация.

### Целеполагание

В основе целеполагания лежит модель системы в состояниях, представленная в работах [4, 5]. В общем случае все состояния системы можно разделить на две большие группы:

- работоспособные состояния, в которых система способна выполнять все функции (качество работы системы соответствует нормативным требованиям) или часть функций (при этом качество работы системы ухудшилось, но лежит в диапазонах нормы);
- неработоспособные состояния.

В качестве модели состояний системы предлагается аналог марковской модели – нечеткой модели состояний. Узлами графа могут быть индексы безопасности и риска – нечеткие оценки состояния системы. Ветви графа представляют интенсивности перехода.

Используя структурное подобие вероятностного графа и нечеткого графа, для моделирования процессов смены состояний рассматривается один из методов расчета Марковских процессов – топологический метод [5]. Подобие графов позволяет использовать одни и те же формулы для расчета:

- индексы надежности состояния для нечеткой системы;
- индексы коэффициентов готовности и простоя;
- индексы времени наработки на отказ и времени восстановления;
- выполнять вычисления тех же интегральных оценок состояний надежности для нечеткого графа.

Если при этом учитывать свойства функций принадлежности, появляется возможность проводить диагностирование информационной системы, с этой целью предполагается использовать топологический метод расчета надежности. Основные положения топологического метода могут быть применены для определения показателей надежности неустановившегося режима.

Основные этапы алгоритма оценки состояний объекта и расчета показателей надежности по нечеткой модели будут следующие:

- ввод информации о реальной ситуации на объекте;
- оценка индексов надежности состояний;
- оценка нечетких интенсивностей переходов из состояний в состояния;
- расчет показателей надежности системы.

Предлагаемый подход к оценке состояний сложной информационной системы на основе нечеткой Марковской модели отличается от вероятностной модели Маркова:

- во-первых, необходим меньший объем статистического материала. В основном нужны экспертные оценки;
- во-вторых, более гибкая система адаптации;
- в-третьих, больше возможностей выполнять диагностирование объекта уже на этапе расчета интегрального показателя надежности.

### **Целеустремление**

Процесс целеустремления строится в предположении, что система находится в некотором начальном состоянии и может оценить возможные состояния на некотором перспективном горизонте своего существования. При реализации целеустремления ставится задача выбора наилучшего состояния в будущем. Для этой цели может быть использован механизм определения последовательной смены состояний на основе управляемых Марковских процессов с доходами.

Необходимо отметить, что в данном случае процесс целеустремления является моделью некоторых психофизиологических механизмов управления поведением высших живых существ.

Понятие "Целеустремленная Система" (ЦС) обозначает систему, осуществляющую достижение состояний, которые определяет входящая в нее целеполагающая подсистема. Средством достижения цели или желаемого

состояния является осуществление ею определенного поведения, реализуемого на основе агентной системы.

В наиболее общем случае задача теперь состоит в том, чтобы определить оптимальную стратегию поведения системы, то есть стратегию, при которой ее доход будет максимальным. Конечность числа этапов в данной задаче отражается в том, что важна смена состояний системы в течении  $N$  периодов.

Задача поиска стратегии превращается в задачу динамического программирования. Если через  $f_n(i)$  обозначить максимальный средний ожидаемый доход, который можно получить за этапы от  $n$  до  $N$  включительно, то несложно вывести рекуррентное соотношение, связывающее  $f_n(i)$  с числами  $f_{n+1}(j)$ , где  $j = 1, 2, \dots, m$

$$f_n(i) = \max_k \{ \sum_{j=1}^m \text{Ind}_{ij}^k [r_j^k + f_{n+1}(j)] \}, n = 1, 2, \dots, N,$$

где  $k$  - номер используемой стратегии.

Это уравнение основывается на том, что суммарный доход  $r_{ij}^k + f_{n+1}(j)$  получается в результате перехода из состояния  $i$  на этапе  $n$  в состояние  $j$  на этапе  $n+1$  с вероятностью  $p_{ij}^k$ . Введем следующее вспомогательное обозначение:

$$v_i^k = \sum_{j=1}^m \text{Ind}_{ij}^k r_{ij}^k$$

Тогда написанное выше рекуррентное уравнение можно переписать следующим образом:

$$f_N(i) = \max_k \{ v_i^k \}$$

$$f_n(i) = \max_k \{ v_i^k + \sum_{j=1}^m \text{Ind}_{ij}^k f_{n+1}(j) \}, n = 1, 2, \dots, N-1.$$

Этот алгоритм, использующий вычисления величин  $f_n(i)$  и лежит в основе решения задачи принятия решений с конечным числом этапов. Более подробно об этом можно прочитать в [6, 7].

## Целереализация

Целереализация предполагает использование многоагентной системы, как исполнительного механизма системы управления. В зависимости от уровня сложности решения задачи реализацию достижения заданного состояния, необходимо решать задачу синтеза исполнительной многоагентной системы.

В многоагентных системах весь спектр задач распределяется между всеми агентами, каждый из которых считается членом организации или группы. В соответствии с распределением задач каждому агенту осуществляется присвоение некоторой роли. Сложность роли, которую должен реализовывать агент, определяет возможности агента. Для организации процесса распределения задачи в многоагентных системах осуществляется декомпозиция глобальной задачи. Обратный процесс композиции найденных решений происходит под управлением некоторого единого «центра».

Необходимо отметить, что в результате декомпозиции для каждого состояния, список задач унифицирован. Это соответствует определенной структуре ролей агентной системы. При изменении структуры целеполагания, изменится и структура ролей агентной системы. Многоагентная система проектируется сверху вниз, исходя из ролей определенных для агентов и результатов разбиения глобальной задачи на подзадачи.

В случае использования децентрализованного искусственного интеллекта распределение заданий происходит в процессе взаимодействия агентов и носит больше спонтанный характер. Нередко это приводит к появлению в многоагентных системах резонансных, синергетических эффектов.

## Механизм самоорганизации агентной структуры

Для того, что бы определиться каким образом возможно изменение структуры СА рассмотрим более подробно принцип её функционирования, начиная с нижнего уровня и ситуации при которых происходит её изменение. На рис. 2 приведена структура описывающая принцип функционирования агента нижнего уровня, выполняющего функции сбора и передачи информации. Данный агент порождается агентом верхнего уровня при поступлении заявки на регистрацию от объекта, к которому он будет прикреплен.

В момент порождения агента субъект приславший заявку должен указать контролируемые параметры для оценки состояния субъекта, данные параметры будут оцениваться сенсорами, а так же значения служащие связями между данным субъектом и другими субъектами его уровня (вход-выход). Входные данные для субъекта будут являться управляющим воздействием, с помощью которого можно менять его состояние.

После получения заявки, с указанными данными агент второго уровня формирует структуру агента сборщика и направляет его к субъекту. Если структура субъекта изменяется, появляется или пропадает необходимость в использовании некоторых сенсоров, через агент субъекта, можно послать заявку на «перерегистрацию» агента, но при этом весь набор статистической информации накопленной на агенте второго уровня за время функционирования агента первого уровня сохраняется.

В случае, когда для одного из субъектов необходимо отменить регистрацию в системе, с помощью самого агента первого уровня посылается заявка для отмены регистрации, и агент самоликвидируется.

Случай с модификацией уровня агентов сборщиков (уровня реактивных агентов рис. 3) является элементарным, это связано с простотой действий выполняемых агентами-сборщиками и с простотой их структуры.

Агент второго уровня (рефлекторный агент рис. 3) имеет более сложную структуру и гораздо большее число выполняемых функций по сравнению с агентом первого уровня. Одна из задач – порождения агентов первого уровня и модификации их структуры, описана выше. Особый интерес вызывает возможность и необходимость настройки механизмов прогнозирования на основе использования нейросетей. Рассмотрим случай, когда необходимо выполнять настройку нейросети или модификацию её структуры.

В начальный момент функционирования агента субъекта количество статистической информации почти всегда не достаточно чтобы выполнить настройку нейросети сложной структуры, поэтому в момент регистрации субъекта первого уровня формируется нейросеть с наиболее простой структурой, зависящей от количества прогнозируемых параметров.

При этом периодически будет оцениваться качество прогноза (сравнение прогноза с реальными результатами функционирования объекта). Если качество прогноза будет отличаться на заданное значение погрешности от реальных результатов функционирования субъекта, то будет выполняться функция изменения структуры самой нейросети (для этого будут использоваться алгоритмы настройки весов, и генерации структуры нейросети имеющие место в пакете Matlab). Таким образом, агент второго уровня будет сам выполнять настройку и модификацию нейросетей используемых для прогнозирования изменения параметров субъекта.

## Заключение

В заключении следует отметить, что система агентов, снабженная механизмом самоорганизации и адаптации, будет обладать рядом весомых преимуществ по сравнению с другими системами. Рассмотренная система будет иметь возможность изменения своей структуры в «синхронном» режиме с изменением структуры управляемой системы.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Классификация агентов. - Режим доступа:  
<http://www.aiportal.ru/articles/multiagent-systems/agent-classification.html>
2. Виноградов, Г.П. Моделирование поведения агента с учетом субъективных представлений о ситуации выбора / Г.П. Виноградов, В.Н. Кузнецов // Искусственный интеллект и принятие решений. -2011, № 3. -С.58-72.
3. Виноградов, Г.П. Модель принятия решений целеустремленного поведения агента в слабоструктурированных средах / Г.П. Виноградов, В.Н. Кузнецов, В.Н. Богатиков // Программные продукты и системы. – 2012. - №2. - С.9–16.
4. Богатиков, В.Н. Применение нечетких цепей Маркова к оценке состояний надежности сложных информационных систем / Богатиков В.Н., Пророков А.Е. // IX Всероссийская школа-семинар «Прикладные проблемы управления макросистемами, г. Апатиты, 26 – 30 марта 2012 г. - Апатиты: Изд-во КНЦ РАН. -2012. –С.10-11.
5. Маслобоев, А.В., Богатиков, В.Н. Технология количественной оценки надежности многоагентных распределенных информационных систем на основе нечеткой Марковской модели / А.В. Маслобоев, В.Н. Богатиков // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики.- 2012.- №5(81). - С.94-105.
6. Баруча-Рид, А.Т. Элементы теории марковских процессов и их приложения /А.Т. Баруча-Рид. - М.: Наука, 1969. - 512 с.
7. Таха, Х. Введение в исследование операций / Х. Таха. - М.: Издательский дом «Вильямс», 2001. - 912 с.

## Сведения об авторах

*Богатиков Константин Валерьевич* - инженер, ФГУП ВНИИА

«Автоматики» им. Духова Н.Л.

Россия, 115409, Москва, ул. Кошкина, д. 5, e-mail: [BGTKKV@mail.ru](mailto:BGTKKV@mail.ru)

*Konstantin V. Bogatikov* - engineer, Federal State Unitary Enterprise All-Russia Research Institute Of Automatics (VNIIA),

Russia, 115409, Moscow, st. Koshkina 5

*Кириллов Иван Евгеньевич* - к.т.н, младший научный сотрудник,

e-mail: [kirillov@rambler.ru](mailto:kirillov@rambler.ru)

*Ivan E. Kirillov* - Ph.D. (Tech. Sci.), junior researcher

*Морозов Иван Николаевич* - к.т.н., младший научный сотрудник,

e-mail: [moroz.84@mail.ru](mailto:moroz.84@mail.ru)

*Ivan N. Morozov* - Ph.D. (Tech. Sci.), junior researcher



УДК 004.052(075)

**М.В. Мальков**

Институт информатики и математического моделирования Кольского НЦ РАН

## **О НАДЕЖНОСТИ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ\***

### **Аннотация**

В обзоре рассмотрен такой показатель качества информационных систем как надежность. Рассмотрены проблемы обеспечения надежности функционирования информационных систем. Кратко описаны модели и методы расчета надежности. Особое внимание уделено Марковским моделям расчета надежности.

### **Ключевые слова:**

*информационная система, надежность, модель, метод, модель Маркова.*

**M.V. Malkov**

## **ABOUT RELIABILITY OF INFORMATION SYSTEMS**

### **Abstract**

This review relates to the reliability of information systems. Different problems concerning provision of the reliability are considered. Models and methods to calculate the reliability are briefly described. Special attention is paid to Markov's model of reliability calculation.

### **Keywords:**

*information system, reliability, model, method, Markov's model.*

Основными показателями качества информационных систем являются надежность, достоверность и безопасность. В этом обзоре мы уделим внимание такому показателю качества как надежность. Надежность - свойство системы сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения. Надёжность - это более узкая характеристика, чем качество. Надежность - это сложное свойство, включающее в свой состав несколько единичных свойств: безотказность, готовность, сохраняемость, ремонтпригодность, а также безопасность и живучесть [1].

Проблема надежности технических систем существует уже несколько десятилетий, и она особенно обострилась с широким внедрением сложных систем массового обслуживания (СМО). Создание и использование такой техники без специальных мер по обеспечению ее надежности не имеет смысла. Опасность заключается не только в том, что новая сложная техника не будет работать, но главным образом в том, что отказы в ее работе, в том числе и неправильная работа, может привести к катастрофическим последствиям. С учетом этого при проектировании, изготовлении и эксплуатации систем должны предприниматься соответствующие меры, обеспечивающие повышение надежности этих систем.

---

\* Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 12-07-00138 - Разработка когнитивных моделей и методов формирования интегрированной информационной среды поддержки управления безопасностью Арктических регионов России).

Для решения проблемы надежности потребовалась разработка научных основ нового научного направления - наука о надёжности. Предмет её исследований - изучение причин, вызывающих отказы объектов, определение закономерностей, которым отказы подчиняются, разработка способов количественного измерения надёжности, методов расчёта и испытаний, разработка путей и средств повышения надёжности. Наука о надёжности развивается в тесном взаимодействии с другими науками, такими как:

- математическая логика (позволяет на языке математики представить сложные логические зависимости между состояниями системы и её комплекующих частей);
- теория вероятностей, математическая статистика и теория вероятностных процессов. Эти дисциплины дают возможность учитывать случайный характер возникающих в системе событий и процессов, формировать математические основы теории надёжности;
- теория графов, исследования операций, теория информации, техническая диагностика, теория моделирования, основы проектирования систем и технологических процессов - такие научные дисциплины, без которых невозможно было бы развитие науки о надёжности [9].

Под расчетом надежности понимают определение численных показателей по тем или иным числовым данным.

Все системы в теории надежности классифицируются по ряду признаков. Важными классификационными группами являются: восстанавливаемые; невосстанавливаемые; обслуживаемые; необслуживаемые системы.

### **Показатели надежности**

Показатель надежности - это количественная характеристика одного или нескольких свойств, определяющих надежность системы. В основе большинства показателей надежности лежат оценки наработки системы, то есть продолжительности или объема работы, выполненной системой. Показатель надежности, относящийся к одному из свойств надежности, называется единичным. Комплексный показатель надежности характеризует несколько свойств, определяющих надежность системы.

### **Обеспечение надежности функционирования информационных систем (ИС)**

Информационная система - это сложная человеко-машинная система, включающая в свой состав эргатические звенья, технические средства и программное обеспечение. Все методы обеспечения надежности и достоверности ИС можно отнести к двум классам. Один включает в себя методы, обеспечивающие безошибочность (безотказность) функциональных технических, эргатических и программных звеньев ИС, то есть, в конечном счете, повышающие их надежность. Другой - методы, обеспечивающие обнаружение и исправление ошибок, возникающих в информации, то есть методы контроля достоверности информации и ее коррекции, косвенно также повышающие функциональную надежность систем.

Существуют различные виды обеспечения надежности: экономическое; временное; организационное; структурное; технологическое; эксплуатационное; социальное; эргатическое; алгоритмическое; синтаксическое; семантическое.

Обеспечение можно определить как совокупность факторов (элементов, методов, приемов, процедур, ресурсов и т. п.), способствующих достижению поставленной цели. Экономическое и временное обеспечения, обусловливаемые необходимостью соответственно материальных и временных затрат, используются для реализации процедур обеспечения достоверности. Организационное, эксплуатационное, техническое, социальное и эргатическое обеспечения применяются преимущественно для повышения надежности систем, а структурное и алгоритмическое обеспечения - для обоих классов методов.

При анализе надёжности целесообразно рассматривать три этапа:

- 1) проектирование;
- 2) изготовление;
- 3) эксплуатация.

Факторы, влияющие на надёжность при проектировании:

- количество и качество элементов в системе оказывает влияние на надёжность. Увеличение количества используемых элементов приводит к резкому ухудшению надёжности;

- режим работы элементов. Самые надёжные элементы, работающие в тяжёлом, не предусмотренном для их применения режиме, могут стать источником частых отказов. Для каждого элемента устанавливаются технические условия на режим работы этого элемента;

- применение стандартных и унифицированных элементов резко повышает надёжность системы.

Факторы, влияющие на надёжность в процессе изготовления:

- качество материалов;
- качество хранения материалов и комплектующих изделий;
- соблюдение технологии изготовления и сборки: термообработка, антикоррозийные покрытия и т.п.

Факторы, влияющие на надёжность в процессе эксплуатации:

- квалификация обслуживающего персонала;
- внешние условия: климатические условия, вибрации, перегрузки;
- на надёжность влияет фактор времени. Продолжительность эксплуатации аппаратуры с момента выпуска до капитального ремонта может составлять несколько лет. К концу этого периода повышается опасность возникновения отказов отдельных элементов системы.

### **Практическая реализация надежных ИС**

Обеспечение надежности технических компонентов информационных систем реализуется аппаратным и программным способами. В первом случае ИС использует аппаратную избыточность: все операции выполняются параллельно на одинаковых компонентах системы, а результаты их работы затем сравниваются, что позволяет выявить ошибки; в случае выхода из строя какого-либо компонента его резервные аналоги продолжают работу без остановки, а отказавший компонент заменяется на работоспособный. Программный способ предусматривает: последовательное во времени выполнение одних и тех же информационных процессов и дублирование данных; автоматическое восстановление отказавших операционных систем, приложений и искаженных данных.

Для обеспечения надежности технических средств чаще всего производится: резервирование (дублирование) технических средств; использование стандартных протоколов работы устройств ИС; применение специализированных технических средств защиты информации. Для обеспечения надежности функционирования ИС требуется тщательное тестирование. Например, для компьютеров в качестве наиболее эффективных мер комплексного обеспечения надежности ИС можно назвать кластеризацию компьютеров и использование отказоустойчивых компьютеров [5].

В теории надежности весьма важную роль играет деление элементов и систем на восстанавливаемые и невосстанавливаемые. Содержательный смысл этих понятий очевиден. Они позволяют обоснованно решать задачи надежности.

При аналитическом методе основными показателями надежности являются: вероятность безотказной работы и средняя наработка на отказ, которые определяются по известным интенсивностям отказов элементов, входящих в данную информационную систему. Однако для АСУ, информационных сетей и вычислительной техники этих понятий для характеристики надежности недостаточно. В практике создания и использования АСУ применяются дополнительные понятия, без учета которых нельзя в полной мере представить комплексное понятие “надежность”. Рассмотрим эти понятия:

1. Живучесть - свойство объекта сохранять работоспособность (полностью или частично) в условиях неблагоприятных воздействий, не предусмотренных нормальными условиями эксплуатации. Главный смысл требования к живучести объекта состоит не только в том, чтобы он длительное время непрерывно без отказа работал в нормальных условиях эксплуатации и, чтобы его можно было быстро отремонтировать, но также и в том, чтобы он в ненормальных условиях эксплуатации сохранял работоспособность, хотя бы и ограниченную.

2. Достоверность информации, выдаваемой объектом. При работе вычислительной машины или тракта передачи информации могут отсутствовать отказы. Поэтому объект может обладать высокой безотказностью, хорошей долговечностью, сохраняемостью и ремонтпригодностью. Однако в нём могут иметь место сбои, искажающие информацию. “Портится” не аппаратура, а информация. Это не менее опасная “поломка” [9].

При исследовании надежности часто ставится задача определить причины, приводящие к формированию той или другой стороны надежности. Без этого невозможно наметить правильную программу работ по повышению надежности. Это приводит к делению надежности на:

- аппаратную надежность, обусловленную состоянием аппаратуры;
- программную надежность объекта, обусловленную состоянием программ;
- надежность объекта, обусловленную качеством обслуживания;
- надежность функциональная [9].

Надежность функциональная - надежность выполнения отдельных функций, возлагаемых на систему. Известно, что АСУ, как правило, система многофункциональная, т.е. она предназначается для выполнения ряда функций, различных по своей значимости. Требования к надежности выполнения

различных функций могут быть различными. Поэтому может оказаться целесообразным задавать различные требования к выполнению различных функций. Примером функциональной надёжности в АСУ может быть надёжность передачи определённой информации в системе передачи данных.

Как правило, методика расчета показателей надежности сводится к следующему:

- составляется система дифференциальных уравнений в соответствии с графом состояний системы;
- выбираются начальные условия решения задачи;
- определяются показатели надежности системы.

Система уравнений составляется согласно правилу: производная вероятности данного состояния равна алгебраической сумме произведений интенсивностей всех возможных переходов этого состояния на вероятность состояний, из которых выходят линии перехода. Знак у слагаемого положительный, если линия перехода входит в данное состояние, и отрицательный, если линия перехода выходит из этого состояния [2].

### **Модели и методы расчета надежности**

На этапе исследования и проектирования систем при построении и реализации машинных моделей (аналитических и имитационных) используются различные методы и модели для расчета надежности.

### **Метод Монте-Карло**

На практике достаточно широко используется метод статистического моделирования Монте-Карло, который базируется на использовании случайных чисел, т.е. возможных значений некоторой случайной величины с заданным распределением вероятностей. Статистическое моделирование представляет собой метод получения с помощью ЭВМ статистических данных о процессах, происходящих в моделируемой системе. Для получения представляющих интерес оценки характеристик моделируемой системы с учетом воздействий внешней среды статистические данные обрабатываются и классифицируются с использованием методов математической статистики.

Сущность метода статистического моделирования сводится к построению для процесса функционирования исследуемой системы некоторого моделирующего алгоритма, имитирующего поведение и взаимодействие элементов системы с учетом случайных входных воздействий и воздействий внешней среды, и реализации этого алгоритма с использованием программно-технических средств ЭВМ.

Различают две области применения метода статистического моделирования:

- для изучения стохастических систем;
- для решения детерминированных задач.

Основной идеей, которая используется для решения детерминированных задач методом статистического моделирования, является замена детерминированной задачи эквивалентной схемой некоторой стохастической системы, выходные характеристики которой совпадают с результатом решения детерминированной задачи. В результате статистического моделирования

системы получается серия частных значений искомых величин или функций, статистическая обработка которых позволяет получить сведения о поведении реального объекта или процесса в произвольные моменты времени. Если количество реализаций достаточно велико, то полученные результаты моделирования системы приобретают статистическую устойчивость и с достаточной точностью могут быть приняты в качестве оценок искомых характеристик процесса функционирования системы [4].

Случайные величины обычно моделируют с помощью преобразований одного или нескольких независимых значений случайной величины, равномерно распределенной в интервале  $(0,1)$ . Моделирование случайных процессов строится на основе базовых распределений случайных величин. Одним из таких процессов является марковские процессы [4].

### **Модель Шика - Волвертона**

В основе модели Шика - Волвертона лежит предположение, согласно которому частота ошибок пропорциональна не только количеству ошибок в программах, но и времени тестирования, т.е. вероятность обнаружения ошибок с течением времени возрастает. Частота ошибок (интенсивность обнаружения ошибок) предполагается постоянной в течение интервала времени  $t$  и пропорциональна числу ошибок, оставшихся в программе по истечении  $(i-1)$ -го интервала; но она пропорциональна также и суммарному времени, уже затраченному на тестирование (включая среднее время выполнения программы в текущем интервале). В данной модели наблюдаемым событием является число ошибок, обнаруживаемых в заданном временном интервале, а не время ожидания каждой ошибки. Данная модель относят к группе дискретных динамических моделей.

### **Модель Муса**

Модель Муса относят к динамическим моделям непрерывного времени. Это значит, что в процессе тестирования фиксируется время выполнения программы (тестового прогона) до очередного отказа. Но считается, что не всякая ошибка может вызвать отказ, поэтому допускается обнаружение более одной ошибки при выполнении программы до возникновения очередного отказа.

В модели Муса различают два вида времени:

1) суммарное время функционирования, которое учитывает чистое время тестирования до контрольного момента, когда проводится оценка надежности;

2) оперативное время выполнения программы, планируемое от контрольного момента и далее при условии, что дальнейшего устранения ошибок не будет (время безотказной работы в процессе эксплуатации).

Для суммарного времени функционирования предполагается:

- интенсивность отказов пропорциональна числу неустранимых ошибок;
- скорость изменения числа устраненных ошибок, измеряемая относительно суммарного времени функционирования, пропорциональна интенсивности отказов.

Один из основных показателей надежности, который рассчитывается по модели Муса, - средняя наработка на отказ. Этот показатель определяется, как математическое ожидание временного интервала между последовательными отказами и связан с надежностью.

### **Модель переходных вероятностей**

Эта модель основана на Марковском процессе (см. ниже), протекающем в дискретной системе с непрерывным временем. Процесс, протекающий в системе, называется марковским (или процессом без последствий), если для каждого момента времени вероятность любого состояния системы в будущем зависит только от состояния системы в настоящее время и не зависит от того, каким образом система пришла в это состояние. Процесс тестирования ИС рассматривается как марковский процесс [6].

### **Марковская модель**

В теории массового обслуживания к наиболее изученным и исследованным относятся модели, у которых случайный процесс функционирования относится к классу Марковских процессов, т.е. Марковские модели.

При исследовании ИС аналитическим моделированием наибольшее значение имеют Марковские случайные процессы с дискретными состояниями и непрерывным временем. Процесс называется процессом с дискретными состояниями, если его возможные состояния можно заранее перечислить, т.е. состояния системы принадлежат конечному множеству и переход системы из одного состояния в другое происходит мгновенно. Процесс называется процессом с непрерывным временем, если смена состояний может произойти в любой случайный момент [3].

Процесс возникновения отказов, а также другие характеристики надёжности носят случайный характер. Для исследования случайных явлений используются вероятностные методы. Таким образом, отличительным признаком надежности как свойства технической системы является то, что она характеризуется вероятностными процессами, протекающими во времени.

Марковские случайные процессы названы по имени русского математика А.А. Маркова, впервые начавшего изучение вероятностной связи случайных величин и создавшего теорию, которую можно назвать “динамикой вероятностей”. В дальнейшем основы этой теории явились исходной базой общей теории случайных процессов, а также таких важных прикладных наук, как теория диффузионных процессов, теория надежности, теория массового обслуживания и т.д. В настоящее время теория марковских процессов и ее приложения широко применяются в самых различных областях таких наук, как механика, физика, химия и др.

Марковские случайные процессы относятся к частным случаям случайных процессов. В свою очередь, случайные процессы основаны на понятии случайной функции.

Если случайная последовательность обладает марковским свойством, то она называется цепью Маркова. Если в случайном процессе состояния дискретны, время непрерывно и свойство последствия сохраняется, то такой случайный процесс называется марковским процессом с непрерывным временем [3].

Множество состояний системы марковской цепи, определенным образом классифицируется с учетом дальнейшего поведения системы. Актуальность такого моделирования сохраняется для систем, в которых протекают так называемые процессы без последствия. Процессы без последствия находят место при функционировании многих технических систем. К таковым, в первую очередь, относится широкий класс самых разнообразных объектов, имеющих общее название систем массового обслуживания (СМО).

В многоэлементных системах с большим числом состояний аналитическое моделирование на основе теории марковских процессов становится весьма громоздким. В этом случае используется так называемый метод динамики средних, который в основе имеет также марковость процесса. Этот метод существенно упрощает аналитическое моделирование для случаев определения средних характеристик состояний моделируемой системы. В этой теме дано обоснование метода и приводятся примеры его применения. В практике часто возникает задача моделирования процессов случайной смены состояний в исследуемом объекте. Вид очередного состояния может определяться случайным образом, смена состояний может происходить в случайные или не случайные моменты времени.

Практически любой случайный процесс является марковским или может быть сведен к марковскому. В последнем случае достаточно в понятие состояния включить всю предысторию смен состояний системы.

Марковские процессы делятся на два класса:

- дискретные марковские процессы (марковские цепи);
- непрерывные марковские процессы.

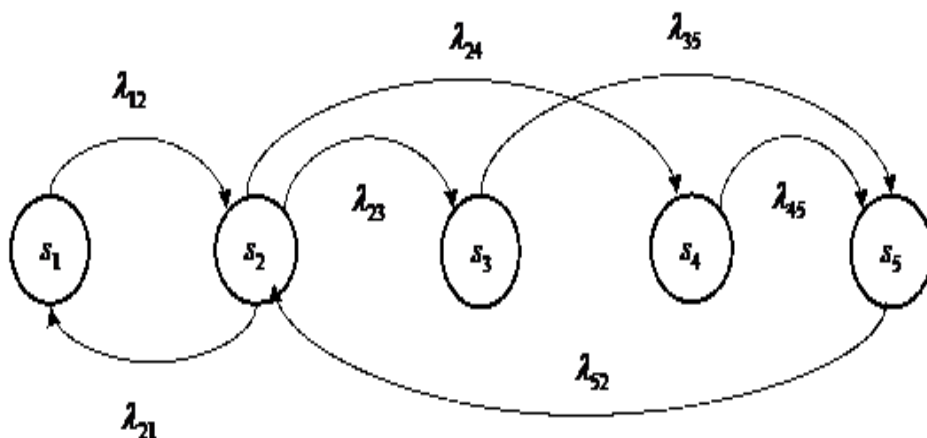
Марковская цепь может быть представлена графом, вершины которого соответствуют состояниям цепи, а дуги ненулевым вероятностям переходов. Для описания поведения системы в виде марковской модели следует определить понятие состояния системы; выявить все состояния, в которых может находиться система. Указать, в каком состоянии находится система в начальный момент; построить граф (пример графа на рис.) состояний и возможные переходы из состояния в состояние – стрелками, соединяющими состояния (на рисунке вершины графа обозначают состояние  $S_i$ , а дуги - переходные вероятности); разметить граф, т.е. для каждого перехода указать интенсивность  $\lambda(t)$  потока событий, переводящих систему из состояния  $S_i$  в состояние  $S_j$ .

Для стационарных Марковских процессов интенсивности переходов не зависят от времени. Понятие состояния зависит от целей моделирования. В одном случае, например, оно может быть определено по состояниям элементов, каждый из которых может быть «свободен» или «занят»; в другом случае состояние системы определяется числом заявок, находящихся на обслуживании и в очередях.

В классе марковских процессов выделяют процессы с дискретными состояниями, называемые марковскими цепями. Когда множество состояний процесса  $S=\{S_1, \dots, S_2\}$  конечно, марковскую цепь называют конечной.

Конечная марковская цепь может быть определена в непрерывном или дискретном времени. В первом случае переходы процесса из одного состояния в другое связываются с произвольными моментами времени  $t_0, t_1, t_2$  и цепь называют непрерывной; во втором – только в фиксированные моменты времени, обозначаемые порядковыми номерами  $t=0, 1, 2, \dots$  и цепь называется дискретной (рис.).





Пример графа состояний

Дискретная марковская цепь определяется:

- множеством состояний  $S = \{S_1, \dots, S_k\}$ ;
- матрицей вероятностей переходов  $P$ , элементы которой характеризуют вероятности перехода процесса из состояния  $S_i$  в состояние  $S_j$ ;
- вектором начальных вероятностей  $V_0 = \{P_1^{(0)}, \dots, P_k^{(0)}\}$ , определяющим вероятности  $P_i^{(0)}$  того, что в начальный момент времени  $t=0$  процесс находится в состоянии  $S_i$ .

Марковская цепь порождает множество реализаций случайного процесса  $f(t)$ , который представляется последовательностью состояний  $f(t) = S_i^{(0)}, S_i^{(1)}, S_i^{(2)}, \dots$  соответствующих моментам времени  $t=1, 2, \dots$ . В зависимости от возможности перехода из одних состояний в другие, марковские цепи делятся на поглощающие и эргодические цепи.

Эргодическая марковская цепь представляет собой множество состояний, связанных матрицей переходных вероятностей таким образом, что из какого бы состояния процесс ни исходил, после некоторого числа шагов он может оказаться в любом состоянии. По этой причине состояния эргодической цепи называются эргодическими (возвратными). Процесс, порождаемый эргодической цепью, начавшись в некотором состоянии, никогда не завершается, а последовательно переходит из одного состояния в другое, попадая в различные состояния с разной частотой, зависящей от переходных вероятностей. Поэтому основная характеристика эргодической цепи – вероятности пребывания процесса в состояниях  $S_j$ ,  $j=1, \dots, k$ , или относительные частоты попадания процесса в состояния  $S_j$  и доля времени, которую процесс проводит в каждом из состояний. В качестве дополнительных характеристик эргодических цепей используются математическое ожидание, и дисперсия времени (числа шагов) первого попадания в состояние  $S_j$  из состояния  $S_i$ , и предельная корреляция числа попаданий в состояние  $S_i$  и  $S_j$ . Эти характеристики определяются методами алгебраической теории марковских цепей.

Эргодические цепи широко используются в качестве моделей надежности систем. В этом случае состояния цепи соответствуют состояниям системы различающихся составом исправного и отказавшего оборудования. Переходы между состояниями связаны с отказами и восстановлением устройств и реконфигурацией связей между ними, выполняемой для сохранения работоспособности системы. Оценки характеристик эргодической цепи дают представление о надежности поведения системы в целом. Кроме того, эргодические цепи широко используются в качестве базовых моделей взаимодействия устройств с задачами, поступающими на обработку.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Оценка качественных и количественных характеристик информационных систем. - Режим доступа: <http://daxnow.narod.ru>
2. Надёжность информационных систем. – Режим доступа: <http://www.methods-rgrtu.ru/index.php>
3. Марковские модели. – Режим доступа: [http://life-prog.ru/view\\_modelirovanie.php?id=19](http://life-prog.ru/view_modelirovanie.php?id=19)
4. Методы и алгоритмы построения элементов систем статистического моделирования. - Режим доступа: <http://www.coolreferat.com/>
5. Теоретические основы Марковских цепей.  
- Режим доступа: <http://www.sevostyanovpa.ru/uploads/LecMarkovProc0.pdf>
6. Динамические модели надежности.  
- Режим доступа: [http://info-tehnologii.ru/kac\\_sr/Mod\\_nad/DiN/index.html](http://info-tehnologii.ru/kac_sr/Mod_nad/DiN/index.html)
7. Базовые сведения о надежности информационных технологий управления.  
- Режим доступа: <http://www.bestreferat.ru/referat-202583.html>
8. Модель оценивания работоспособности информационной системы в условиях неопределенности. – Режим доступа: [http://sir35.narod.ru/Cmagin/K31122/Part\\_1\\_5\\_31122.htm](http://sir35.narod.ru/Cmagin/K31122/Part_1_5_31122.htm)
9. Надёжность функционирования автоматизированных систем.  
- Режим доступа: <http://gendocs.ru/v4171/>

#### Сведения об авторе

*Мальков Михаил Васильевич* - к.ф.-м.н., научный сотрудник,  
e-mail: [malkov@iimm.kolacs.net.ru](mailto:malkov@iimm.kolacs.net.ru)  
*Michael V. Malkov* - Ph.D. (Phys.&Math. Sci.), researcher

УДК 004.9

К.А. Степанов<sup>1</sup>, А.В. Вицентий<sup>1,2</sup>, А.Г. Олейник<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Институт информатики и математического моделирования Кольского НЦ РАН

<sup>2</sup> Кольский филиал ПетрГУ

## ВЛИЯНИЕ РЕГИОНАЛЬНЫХ ФАКТОРОВ НА НАДЕЖНОСТЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ В УСЛОВИЯХ АРКТИКИ И ВЫСОКИХ ШИРОТ\*

### Аннотация

В работе рассмотрены факторы, влияющие на надежность функционирования информационных систем в арктической зоне Российской Федерации.

### Ключевые слова:

*надежность информационных систем, арктическая зона, региональные факторы.*

K.A. Stepanov, A.V. Vicentiy, A.G. Oleynik

## INFLUENCE OF REGIONAL FACTORS ON THE INFORMATION SYSTEMS RELIABILITY IN THE ARCTIC AND HIGH LATITUDES

### Abstract

In this paper the influence of regional factors on the information systems reliability in the arctic and high latitudes are reviewed and analyzed. The directions of information systems reliability increasing are given.

### Keywords:

*information systems reliability, frigid zone, regional factors.*

### Введение

Современный уровень развития информационных технологий предполагает широкое использование компьютерной техники в различных областях деятельности, а происходящие в мире процессы развития информационных коммуникаций становятся объективным фактором, способствующим созданию глобального информационного общества. Уровень развития информационного пространства существенно влияет на экономику, обороноспособность и политику. Целью информатизации является наиболее полное удовлетворение информационных потребностей общества во всех сферах деятельности. Особенно актуальной в настоящих условиях является проблема повышения уровня системной надежности в рамках образования единого информационного пространства Арктических регионов Российской Федерации.

На сегодняшний день, от стабильной работы информационных систем (ИС) стали зависеть многие сферы деятельности: производство товаров, сфера оказания услуг, менеджмент, бухгалтерия, научные исследования и т. д. Расчёт надёжности информационных систем, является обязательным требованием,

---

\* Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 12-07-00138 - Разработка когнитивных моделей и методов формирования интегрированной информационной среды поддержки управления безопасностью Арктических регионов России).

предусмотренным государственными и международными стандартами и руководящими документами о декларировании промышленной безопасности и оценки риска.

Проблема обеспечения надежности функционирования является актуальной практически для всех современных информационных и технических систем. Можно привести примеры различных систем, для которых решение проблемы надежности напрямую связано с вопросом целесообразности существования такой системы.

Усложнение современных ИС идет по различным направлениям. С одной стороны, в состав систем входит все большее число элементов. С другой стороны, усложняется их структура, определяющая взаимодействие элементов в процессе функционирования и поддержания работоспособности. При этом усложнение систем является прямым следствием постоянно возрастающей важности выполняемых ими функций, их сложности и многообразия. При прочих равных условиях система, состоящая из большого числа элементов и имеющая более сложную структуру и сложный алгоритм функционирования, является менее надежной по сравнению с более простой системой. Такое положение требует разработки специальных методов обеспечения надежности информационных систем, включая разработку математических методов расчета надежности и ее экспериментальной оценки.

#### **Актуализация оценки надёжности функционирования информационных систем**

Оценка надёжности необходима практически на всех этапах жизненного цикла систем. Целью оценки является получение достоверной информации [1], применяемой для принятия и обоснования управленческих решений в таких областях, как:

- обеспечение надёжности и безопасности функционирования (действия при ЧС, планирование безопасности труда и т.д.);
- обеспечение высокого качества выпускаемой продукции (для предприятий);
- оптимизация затрат на обеспечение надежности и безопасности проектируемых или эксплуатируемых систем.

Актуальность данного направления исследований диктуется постоянным количественным и пространственным ростом распределённых информационных систем, а так же основами государственной политики Российской Федерации в Арктике на период до 2020 года и дальнейшую перспективу, утвержденными Президентом Российской Федерации Дмитрием Медведевым 18 сентября 2008 г. (Пр - 1969).

Согласно данному документу в сфере информационных технологий и связи необходимо [2]:

- внедрить современные информационно-телекоммуникационные технологии и средства (в том числе подвижные) связи, телерадиовещания, управления движением судов и полетами авиации, дистанционного зондирования Земли, проведения площадных съемок ледового покрова, а также системы гидрометеорологического и гидрографического обеспечения и обеспечения научных экспедиционных исследований;

- создать надежную систему оказания навигационных, гидро-метеорологических и информационных услуг, обеспечивающую эффективный контроль хозяйственной, военной, экологической деятельности в Арктике, а также прогнозирование и предупреждение чрезвычайных ситуаций, снижение ущерба в случае их возникновения, в том числе за счет применения глобальной навигационной спутниковой системы ГЛОНАСС и многоцелевой космической системы;

- основные меры по реализации государственной политики в сфере информационных технологий и связи в Арктической зоне Российской Федерации должны быть направлены на разработку и широкое использование новейших технологий, в том числе космических средств различного назначения и многопроцессорных универсальных территориально-распределенных сетей;

Опираясь на вышеописанные положения можно выделить несколько направлений развития информационного пространства в Арктике: создание современных информационно-телекоммуникационных систем связи, с применением космических технологий; создание надёжной системы оказания информационных услуг.

### **Структурная модель влияния региональных факторов на компоненты информационных систем**

В условиях работы в высоких широтах появляются дополнительные факторы, влияющие на надёжность работы компьютерных систем [3-6], которые следует учитывать. Надёжность единого информационного пространства арктической зоны Российской Федерации (ЕИПАЗРФ) в работе понимается как устойчивость системы приема-передачи информации к внешним воздействиям и внутренним возмущениям, а также как гарантия получения информации:

- 1) в полном и неискаженном виде;
- 2) только заданными адресатами;
- 3) в удовлетворительные сроки [19].

Из практической работы давно известным фактом является негативное воздействие региональных особенностей высоких широт на надёжную работу программно-аппаратной части компьютерных систем и человека. Однако данное воздействие остаётся малоизученным, и поэтому учёт его влияния на информационные системы на данном этапе представляется проблематичным. Появляется необходимость разработки структурной модели влияния региональных факторов на компоненты ИС.

Для определения влияния региональных факторов необходимо, прежде всего, определить общую структуру ИС. В общем случае любую ИС можно рассматривать как человеко-машинную систему, которая может быть представлена в виде набора ресурсов следующим образом:

- VR - вычислительный ресурс;
- SR - ресурс хранения;
- CR - коммуникационный ресурс;
- IR - информационный ресурс;
- HR - человеческий ресурс;
- AR - алгоритмический ресурс.

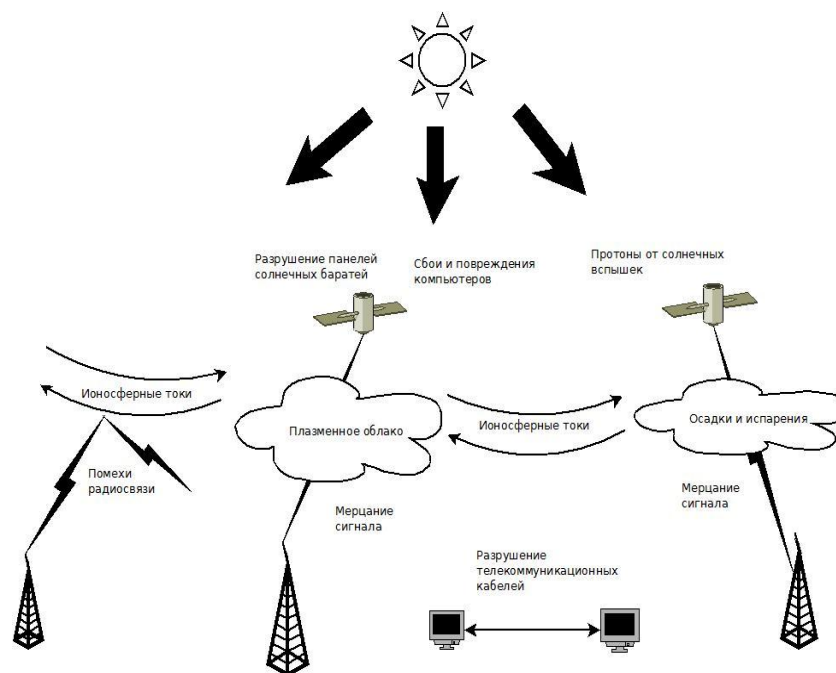
Согласно вышесказанному информационная система - это система, представленная множествами ресурсов (VR,SR,CR,IR,HR,AR) и связями между ними (Si).

Опираясь на предложенную модель системы можно выделить следующие региональные факторы, оказывающие наибольшее влияние на ее функционирование в условиях Арктической зоны РФ:

- факторы космической природы;
- нарушение фотопериодики;
- суровые климатические условия.

Наличие негативного влияния этих факторов известно, однако, сложность заключается в определении степени влияния, которое каждый из факторов оказывает на определённую группу ресурсов. На данный момент проводится работа по определению взаимосвязей между факторами и группами ресурсов информационной системы.

По мере технологического прогресса происходит ускорение развития и усложнение технической инфраструктуры на Земле и в космосе, поэтому всё ошутимее дают о себе знать не замечавшиеся ранее факторы, которые влияют на её функционирование и способны создать серьёзные угрозы безопасности в различных сферах человеческой деятельности. К таким факторам, интенсивно изучаемым в настоящее время, относятся явления космической погоды [7, 8], обусловленные воздействием солнечной активности на Землю и окружающее её пространство (рис.).



*Воздействие факторов космической погоды на технические системы на Земле и в космосе*

Из Солнца непрерывно истекает солнечный ветер, в его атмосфере происходят выбросы массы и вспышки, которые генерируют частицы высоких энергий. Солнечный ветер обтекает магнитосферу Земли и является источником геомагнитной возмущённости. На Солнце образуются так называемые корональные дыры, они видны как тёмные области в короне. Это участки открытых силовых линий, из которых истекает высокоскоростной солнечный ветер.

Когда Земля попадает в сектор межпланетного магнитного поля, соответствующий корональной дыре на Солнце, на планете начинаются магнитные бури. Солнечный ветер неоднороден и нестационарен, что сказывается на состоянии магнитного поля Земли, которое откликается на любые изменения, как в характеристиках солнечного ветра - скорости, плотности и давлении, так и в направлении межпланетного магнитного поля. Самыми мощными и наиболее опасными для Земли являются выбросы солнечной массы, которые имеют гигантские размеры [16] и довольно часто - петельную структуру, что связано со скрученными магнитными полями. Эти и другие активные явления на Солнце воздействуют на Землю и околоземное пространство, охватывая магнитосферу, атмосферу и ионосферу, проявляются на поверхности планеты и влияют на среду обитания и деятельность человека. К таким явлениям относятся возмущения магнитного поля Земли, наиболее сильные из которых характеризуются как магнитные бури силой от 1 до 9 баллов (планетарный Кр-индекс), разнообразные ионосферные возмущения, выпадения частиц из магнитосферы в верхние слои атмосферы, связанные с ними полярные сияния и т.д.

К основным практически важным с точки зрения обеспечения надёжности работы ИС факторам космической природы относятся:

- космическая радиация (коротковолновое солнечное излучение);
- солнечные космические лучи (СКЛ);
- галактические космические лучи (ГКЛ);
- магнитосферная радиация;
- степень ионизации и нагрева ионосферы и атмосферы;
- вариации геомагнитных и геоэлектрических полей [9].

Несмотря на то, что их влияние невидимо человеческому глазу, ему подвержены многие современные технологические системы, и, через сложную систему взаимодействия, живые организмы. В этой связи выделяют следующие эффекты «космической погоды»:

1) воздействие космической радиации на аппаратуру космических аппаратов и самолетов, радиационная угроза для космонавтов и экипажей высотных самолетов;

2) изменения в условиях распространения радиоволн и помехи в системах связи и навигации, создаваемые ионосферой;

3) изменение орбит спутников из-за нагрева верхней атмосферы;

4) геоиндуцированные (паразитные) токи в протяженных проводящих объектах и системах: трубопроводах, кабелях, линиях электропередач и связи, железных дорогах в приполярных широтах;

5) модификация химического состава и свойств атмосферы земли;

6) воздействие на биологические объекты и человека.

## Радиация

Под радиацией (часто также используется термин «ионизирующее излучение») понимают потоки элементарных частиц, ядер и электромагнитных квантов в широком диапазоне энергий, взаимодействие которых с веществом вызывает ионизацию его атомов и молекул.

Воздействие космической радиации является одной из основных причин выхода из строя космических аппаратов, а также существенным ограничивающим фактором при выборе рабочих орбит искусственных спутников Земли.

Оценка характера радиационных повреждений в технических системах производится следующим образом. Накопление в материалах электрических и структурных повреждений, вызываемых отдельными частицами, создает эффект полной поглощенной дозы. Он особенно опасен для современных электронных компонентов и интегральных схем, состоящих из микроскопически малых электронных элементов. Дефекты кристаллической решетки, накопление зарядов в слоях диэлектриков, изменения характеристик границ раздела приводят к деградации электрических и функциональных характеристик (возрастают обратные токи переходов, энергопотребление, ухудшаются временные характеристики и т. п.) вплоть до полного отказа отдельных элементов. Обычно стойкость интегральных схем составляет порядка  $10^2$  Гр.

Выделяют также эффект неионизирующей дозы - упругого и неупругого взаимодействия излучения с атомами вещества, сдвигающего их из узлов кристаллической решетки и приводящего к структурному повреждению материалов, открытых непосредственному воздействию излучения (солнечных панелей, различных датчиков, пленок).

Эффект объемной электризации связан с тем, что релятивистские электроны, проникающие достаточно глубоко сквозь обшивку, тормозятся уже на внутренних элементах и образуют так называемый «объемный заряд» в диэлектриках. Если потоки электронов достаточно велики, то заряд не успевает рассасываться, достигает критических величин и вызывает микропробой, что ведет к нарушению работы бортовой электроники.

Прохождение даже одиночных энергичных заряженных частиц через современную электронику может вызвать ряд негативных эффектов, называемых одиночными сбоями. Если в полупроводниковом элементе (например, ячейке памяти) возникает большое количество свободных зарядов вдоль трека пролетевшей частицы, то он может изменить свое логическое состояние, происходит одиночный сбой. Также могут возникать ложные срабатывания, кратковременные импульсные сигналы на выходах аналоговых и цифровых схем и пр. Такие изменения могут быть обратимыми (SEU — single event upset) или необратимыми (latch-up). При необратимых изменениях элемент «защелкивается» в новом состоянии и остается в нем до отключения питания. В некоторых случаях (power latch-up) возможно разрушение элемента или всего кристалла из-за увеличения тока и перегрева кристалла. Способность заряженной частицы вызвать одиночный сбой определяется главным образом такой характеристикой как линейная передача энергии (ЛПЭ) - интенсивно теряющие энергию частицы оставляют большую энергию в микроскопических элементах и поэтому основной вклад в этот вид помех дают энергичные протоны и ядра гелия (более тяжелые ядра редки).



Магнитосферные и ионосферные электрические токи создают на поверхности Земли вариации геомагнитного и геоэлектрического поля, вызывающие так называемые геоиндуцированные токи (ГИТ) в длинных (многокилометровых) проводящих системах. Если в магнитоспокойное время эти вариации незначительны, то в магнитоактивные периоды ГИТ могут достигать десятки и даже сотни ампер, влияя на работу систем энергоснабжения, а также целого ряда других наземных технических систем, в которых длинные проводящие линии являются необходимым компонентом (трубопроводы, линии связи, железные дороги).

### **Внутренняя и внешняя электризация**

Потоки заряженных частиц космической плазмы, падающие на тело (космический аппарат, КА), вызывают его поверхностное электростатическое зарядение (внешнюю электризацию), которое продолжается до тех пор, пока тело не приобретает равновесный потенциал (называемый «плавающим»), при котором электрический ток между плазмой и телом становится равным нулю. Если потенциал распределяется неоднородно по диэлектрическим частям поверхности космического аппарата, то это может привести к электрическим разрядам. Таким же образом может формироваться и дифференциальное зарядение внутренних поверхностей его конструкции, часто называемое внутренней электризацией. Образующиеся в момент разрядов электромагнитные помехи и токи, проникая в электронные цепи бортовых приборов, нарушают работу аппаратуры.

Самым простым примером космических радиационных эффектов на поверхности Земли можно считать спонтанные сбои в работе обычного персонального компьютера, вызываемые высокоэнергичным компонентом ГКЛ. Темп сбоев растет с широтой и высотой. На низких широтах он меняется от одного сбоя в месяц на уровне моря, до нескольких сбоев в неделю в горах на высоте около 3 км. Темпы сбоев в полярных областях и на экваторе отличаются приблизительно в 6 раз.

Темп одиночных сбоев в бортовой авиационной микроэлектронике быстро растет с высотой и достигает своего максимума на высотах от 9 до 20 км в области максимальной интенсивности вторичных частиц ГКЛ, возникающих при взаимодействии первичных космических лучей с атмосферой. В кроссполярных перелетах число одиночных сбоев возрастает, по крайней мере, в 15 раз по сравнению с низкоширотными трассами.

Наиболее сильны геомагнитные возмущения вблизи магнитных полюсов в зоне овала полярных сияний и на прилегающих территориях. Зоной сильных геомагнитных возмущений обычно охвачены северные регионы России, территории Северной Америки и Скандинавии. Однако во время очень мощных событий на Солнце в октябре - ноябре 2003 г. полярные сияния были видны в Москве и даже на широте Одессы. Следовательно, сильные геомагнитные возмущения способны охватить значительную часть территории Российской Федерации.

В периоды сильных геомагнитных возмущений токопроводящие объекты инфраструктуры подвергаются опасному воздействию со стороны геомагнитно-индуцированных токов [17]. Такие токи возникают из-за эффекта

электромагнитной индукции при изменениях магнитного поля Земли во время магнитной бури. В результате вихревое электрическое поле пронизывает всё пространство, и если имеется замкнутый проводящий контур, то в нём появляются электродвижущая сила (ЭДС) и электрический ток. Вихревое электрическое поле во время магнитной бури имеет вид короткого импульса, длящегося несколько минут. Величина разности потенциалов может достигать 10 В/км и более, так что на концах проводника длиной примерно 20 км за короткое время возникает напряжение примерно в 220 В.

Во время магнитной бури вихревое электрическое поле пронизывает всё околоземное пространство, атмосферу и саму Землю. В результате, во всех проводящих системах возникают так называемые геомагнитно-индуцированные токи, которые представляют собой наиболее опасный фактор, воздействующий на работу объектов инфраструктуры. К проводящим системам в этом случае следует отнести природные системы, такие как суша, океан, атмосфера, ионосфера, магнитосфера, и технические системы - протяжённые линии электропередач, линии связи, нефте- и газопроводы, железнодорожные линии электропитания, рельсы и другие структуры. Чем больше пространственный масштаб энергосистемы, тем больше сила индукционного тока и тем сильнее эффект воздействия.

Наиболее ярким примером влияния геомагнитных излучений на Землю является солнечная буря 1859 г. [10]. Она была самой сильной из всех когда-либо зафиксированных. Эта геомагнитная буря, вызвала отказ телеграфных систем по всей Европе и Северной Америке. Северные сияния наблюдались по всему миру, даже над Карибами. Если бы геомагнитная буря такой мощности произошла сегодня, в эпоху развитой технической инфраструктуры, то, по оценке специалистов, она имела бы очень тяжёлые последствия [14, 15, 18].

В конце октября - начале ноября 2003 года в результате всплеска солнечной активности [11, 12] на севере Европы произошли аварии на трансформаторных станциях, приведшие к отключению электричества в северных районах Швеции, а один из весьма дорогостоящих спутников НАСА - ADEOS-2 - вышел из строя. Радиационный шторм был такой силы, что НАСА отдало распоряжение космонавтам на Международной космической станции надеть скафандры для дополнительной защиты.

Во время солнечной бури в январе 2005 года авиакомпания United Airlines пришлось корректировать маршруты своих самолетов, проходивших в районе Северного полюса.

В 1989 году небольшая солнечная буря парализовала электрические сети в канадской провинции Квебек.

В линиях связи и сопутствующих линиях дистанционного питания геомагнитная индукция приводит к значительным сторонним токам и напряжениям. Так, в ходе магнитной бури 10 - 11 февраля 1958 г. сторонние токи в линиях связи в Мурманской области превышали 100 мА, а напряжение - 500 В, что вызвало прерывание телеграфной и телефонной связи на многих направлениях. Современные волоконно-оптические линии связи не подвержены прямому геомагнитному воздействию, но протяженные системы электропитания таких линий все еще остаются уязвимыми.

## **Влияние на человека**

Поскольку информационную систему можно представлять как человеко-машинную систему, то важным в условиях работы на крайнем севере, остается «человеческий фактор» [13]. Организм человека начинает вести себя совершенно по-иному, не так, как в привычных и более комфортных для проживания условиях средних и южных широт.

Негативное влияние на человеческий организм на крайнем севере оказывают следующие факторы:

- нарушение фотопериодики (смена полярного дня и ночи);
- экстремально низкие температуры;
- высокая влажность;
- высокая геомагнитная активность;
- сильные ветра;
- слабая защищенность от солнечного излучения.

Человек «привык» к закономерной и неизбежной смене дня и ночи. Такая смена в организме - циркадные (околосуточные) ритмы: ритмичной становится активность всех функциональных систем организма.

В Арктике полярный день сменяется полярной ночью, которые длятся месяцами, а между ними действует более естественная смена дня и ночи, определяющая привычную продолжительность суток. Внутрисистемные связи в организме нарушаются, возникают десинхронозы, которые лежат в основе формирования хронопатологии у человека. Клинически это может проявляться в виде:

- снижения умственной работоспособности;
- снижения физической работоспособности;
- нарушения сна;
- эмоциональной нестабильности;
- непредсказуемости поведения человека.

В период полярной ночи из-за недостатка внешних раздражителей может возникать состояние сенсорной депривации, развиваются тяжелые депрессивные состояния. Когда же наступает полярный день, от яркого непрерывного излучения Солнца становится сложно укрыться. Особенно от этого страдают люди с повышенной нервной возбудимостью: они становятся раздражительными, начинает повышаться артериальное давление. Подобные явления приводят к естественной дестабилизации информационных систем, обслуживаемых человеком, и уменьшению их надёжности.

Такие региональные факторы как низкие температуры, высокая влажность, сильные ветра, обильные осадки не являются чем-то необычными для Арктики. Все эти явления воздействуют не только на человека, но и могут стать причиной отказов оборудования, сбоев на линиях связи, перебоев с электропитанием, что в свою очередь негативно сказывается на функциях информационных систем. В состав ИС часто так же входит оборудование, работающее автономно в труднодоступных участках. В случае выхода из строя такого оборудования, его оперативная замена или ремонт представляется проблематичным.

## Заключение

Проведённый обзор региональных особенностей АЗ РФ показал, что при современном уровне развития и распространения компьютерных технологий необходимо учитывать возможное влияние, оказываемое региональными факторами как на отдельные компоненты информационных систем, так и на показатели надёжности функционирования единого информационного пространства АЗ РФ в целом. Причём это влияние распространяется на человека, на наземные технические средства и даже на космические технологии.

Также анализ литературных источников показал, что разработки, направленные на обеспечение надёжного функционирования информационных систем в условиях Арктики, в России почти не проводятся, и данное направление остаётся перспективным полем для научных и инженерных исследований.

Возможными подходами к решению проблем надёжности функционирования информационных систем в условиях арктической зоны Российской Федерации являются:

- обеспечение избыточности ресурсов;
- повторное выполнение операций;
- восстановление памяти;
- динамическое изменение конфигурации;
- восстановление файлов;
- создание контрольных точек восстановления;
- предупреждение отказов питания;
- регистрация ошибок.

В космических технологиях для защиты от радиационной угрозы применяются различные конструктивные решения, обеспечивающие максимально возможную пассивную защиту наиболее чувствительных узлов, используются наиболее устойчивые к радиации микросхемы, производится резервирование некоторых жизненно важных узлов. Также разрабатываются специальные методы контроля за электрическим и логическим состоянием электронных схем, за величинами токов и напряжений питания, за зависанием или непредусмотренными операциями бортовых программ, контроль состояния оперативной памяти и прочее.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Оценка надёжности информационных систем. - Режим доступа: <http://www.nsc.ru/ws/УМ2007/12875/mzx.htm>
2. Основы государственной политики Российской Федерации в Арктике на период до 2020 года и дальнейшую перспективу. - Режим доступа: <http://www.scrf.gov.ru/documents/98.html>
3. Калитёнков, Н.В. Радиосвязь в районе а4: влияние геомагнитных возмущений на частотный спектр и амплитуду кв радиосигналов на трассах, пересекающих авроральную зону /Н.В. Калитёнков, А.Н. Калитёнков // Тез. 11-й научно-техн. конф. МГТУ, г. Мурманск, 19-29 апреля 2000 г. - Мурманск: МГТУ, 2000.- 615 с.
4. Ziegler J.F. Terrestrial cosmic rays, IBM J.Res. Develop, 40, 1996. -С.19-39.
5. Богатиков, В.Н. Теоретический подход к оценке состояний надёжности сложных информационных сетей / В.Н. Богатиков, А.Г. Олейник, А.Е. Пророков // Труды Кольского научного центра РАН. Информационные технологии. –Апатиты: Изд-во КНЦ РАН. - 4/2011(7). – Вып.2.–С.56-64 с.

6. Мальков, М.В. Развитие информационно-телекоммуникационной среды в Арктике / М.В. Мальков // Труды Кольского научного центра РАН. Информационные технологии. – Апатиты: Изд-во КНЦ РАН. -4/2011(7). – Вып.2. –С.10-18.
7. Кузнецов, В.Д. Физика солнечно-земного взаимодействия и проблемы безопасности энергетической инфраструктуры страны / В.Д. Кузнецов, Н.А. Махутов // Вестник российской академии наук, 2012.– Т.82, № 2. - С.110–123.
8. Bothmer, M. Space Weather – Physics and Effects / M. Bothmer, I.A Daglis // Chichester: Praxis Publishing Ltd., 2007. - 438 с.
9. Плазменная гелиогеофизика: в 2-х т. / ред.: Л.М. Зеленый, И.С. Веселовский. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. Глава 8. Солнечно-земные связи и космическая погода / под ред. А.А. Петруковича. -С.175-257.
10. Солнечная буря 1859 года. - Режим доступа:  
<http://dokumentika.org/zemli/solnechnaya-burya-1859-goda>
11. Джеймс Грин, Стэн Оденуолд. Влияние солнечных бурь на Землю. -Режим доступа: <http://galspace.spb.ru/index165.html>
12. Ермолаев, Ю.И. Всё бешеной буря, всё злее и злей. -Режим доступа: [http://rffi.molnet.ru/rffi/ru/scientific\\_articles/o\\_15362#1](http://rffi.molnet.ru/rffi/ru/scientific_articles/o_15362#1)
13. Булгакова, О. Поликлиника за полярным кругом / Томский научный центр СО РАН. - Режим доступа: <http://www.copah.info/articles/science/poliklinika-zapolyarnym-krugom>
14. Clauer C.R., Siscoe G. The Great Historical Geomagnetic Storm of 1859: A Modern Look // Adv. Space Res, 2006. -V.38(2). -pp.115–388.
15. Cliver E.W., Svalgaard L. The 1859 solar-terrestrial disturbances and the current limits of extreme space weather activity // Solar Physics, 2004. -V.224. -pp.407–422.
16. Кузнецов, В.Д. Выбросы массы // Плазменная гелиогеофизика / под ред. Зелёного Л.М., Веселовского И.С. -М.: Физматлит, 2008. -Т.1. -С.81–98.
17. Elias A.G., Silbergleit V.M. Strong geomagnetic disturbances and induced currents on Earth surface // Progress In Electromagnetics Research Letters. 2008. -V.1. -pp.139–148.
18. Kappenman J.G. Great Geomagnetic Storms and Extreme Impulsive Geomagnetic Field Disturbance Events – An Analysis of Observational Evidence including the Great Storm of May 1921 // Adv. Space Res, 2006. -V.38 (2). -pp.188–199.
19. Вицентий, А.В. Разработка модели единого информационного пространства для оценки надежности его функционирования /А.В. Вицентий // Труды Кольского научного центра РАН. Информационные технологии. – Апатиты: Изд-во КНЦ РАН. -4/2011(7). – Вып.2. – С.65-70.

#### **Сведения об авторах**

*Степанов Кирилл Андреевич* – аспирант, e-mail: [kirilicsbox@mail.ru](mailto:kirilicsbox@mail.ru)  
*Kirill A. Stepanov* - post-graduate

*Вицентий Александр Владимирович* - к.т.н., научный сотрудник,  
e-mail: [alx\\_2003@mail.ru](mailto:alx_2003@mail.ru)  
*Alexander V. Vicentiy* - Ph.D. (Tech. Sci.), researcher

*Олейник Андрей Григорьевич* - д.т.н., зам. директора,  
e-mail: [oleynik@iimm.kolasc.net.ru](mailto:oleynik@iimm.kolasc.net.ru)  
*Andrey G. Oleynik* - Dr. of Sci, deputy director

УДК 004.9, 004.5

**П.А. Ломов, М.Г. Шишаев, В.В. Диковицкий**

Институт информатики и математического моделирования Кольского НЦ РАН,  
Кольский филиал ПетрГУ

## **УПРОЩЕННОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ OWL-ОНТОЛОГИЙ ДЛЯ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ В ГРАФИЧЕСКИХ ПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКИХ ИНТЕРФЕЙСАХ\***

### **Аннотация**

Визуализация и использование OWL-онтологий при разработке и функционировании на их основе пользовательских интерфейсов может требовать существенных затрат труда и времени разработчиков, а также наличия у них особых знаний и навыков работы с онтологиями, базирующихся на дескрипционных логиках. В статье предлагается технология создания для произвольной OWL-онтологии ее упрощенного представления, ориентированного на визуализацию в виде графовой структуры при разработке пользовательских интерфейсов программных средств. Рассматривается структура такого представления, а также порядок отображения в ней аксиом исходной OWL-онтологии.

### **Ключевые слова:**

*онтология, OWL, SKOS, SPARQL, интерфейс.*

**P.A. Lomov, M.G. Shishaev, V.V. Dikovitsky**

## **SIMPLIFIED REPRESENTATION OF OWL OF ONTOLOGIES FOR THEIR USE IN GRAPHIC USER INTERFACES**

### **Abstract**

Use of OWL ontologies as the base of graphical user interface of information systems and web resources is difficult work, which demand from the developer except programming skills some knowledge of ontology engineering and description logics. The paper is devoted to technology of OWL ontology simplification and creating as the result the user presentation ontology, which could be directly use as the base of graphical user interface. Structure of user presentation ontology and process of mapping of primary OWL ontology axioms to it are described.

### **Keywords:**

*ontology, OWL, SKOS, SPARQL, interface.*

### **Введение**

На сегодняшний день использование онтологий является ключевым аспектом в семантическом представлении и обработке информации. Круг технологий, связанных с применением онтологических моделей, весьма широк и включает в себя мультиагентные системы, автоматическое извлечение знаний из текстов на естественном языке, поиск информации, интеллектуальное аннотирование и другие. Как правило, онтологии рассматриваются как машинопонимаемые спецификации предметной области или задачи, которые позволяют обеспечить использование единой системы понятий людьми и/или программными агентами. В этой связи очень привлекательным является также

---

\* Работа выполнена в рамках проекта № 2.8 программы фундаментальных исследований ОНИТ РАН «Интеллектуальные информационные технологии, системный анализ и автоматизация».

использование онтологий при разработке и функционировании пользовательского интерфейса [1-4], что так или иначе предполагает визуализацию совокупности элементов онтологии, как правило, в виде графовой структуры. Это дает возможность пользователю оперировать известными ему понятиями, осуществлять интуитивно понятную навигацию между ними и итеративно формировать сложный запрос, внося в него дополнительные объекты поиска, определяя ограничения и не используя при этом каких-либо искусственных поисковых языков.

В то же время большую популярность, благодаря богатым выразительным свойствам и вместе с тем формальной разрешимости, получил язык веб-онтологий (OWL, Ontology Web Language). Предложенный и развиваемый консорциумом W3C, OWL на сегодняшний день является де-факто стандартом описания онтологий для их использования в Интернет. Однако онтологии, описанные с помощью данного языка (OWL-онтологии), являются, по сути, системой логических утверждений (аксиом) дескрипционной логики. В этой связи их визуальное представление в виде графовой структуры далеко не всегда тривиально и требует от разработчика, так называемого понимания онтологии (ontology comprehension) [5, 6], что может потребовать существенных усилий, а также взаимодействия с автором онтологии.

Целью данной работы является снижение трудоемкости визуального представления OWL-онтологий для их использования в качестве основы ГПИ информационных систем или веб-ресурсов. Преодолеть трудности, связанные с визуализацией OWL-онтологий, можно двумя способами. Первый заключается в упрощении OWL-онтологии при ее визуальном представлении, то есть учитывать только те аксиомы, которые могут быть представлены в виде вершин и ребер графа. Такой способ применяется в большинстве современных программных средств визуализации онтологий GraphViz [7], TGVizTab [8], OWLViz [9], OntoSphere [10]. Второй способ, напротив связан с излишним усложнением визуального представления, что затруднит его понимание пользователем.

Для устранения приведенных недостатков существующих подходов в данной работе предлагается технология создания для произвольной исходной OWL-онтологии ее упрощенной модификации - онтологии пользовательского представления (ОПП), визуализация которой в рамках ГПИ не требовала бы от разработчика сложного анализа исходной OWL-онтологии, но в то же время сохраняла ее семантику и тем самым позволяла формировать вложенные запросы. Рассматривается структура ОПП, а также порядок представления в нем системы OWL аксиом и формирование на ее основе поисковых запросов.

### **Онтология пользовательского представления**

Ввиду того, что понятие онтологии может трактоваться достаточно широко, заметим, что в данной работе под OWL-онтологией понимается логическая теория, явно частично отражающая подразумеваемое значение формального словаря [13]. Формальный словарь образует множество классов или концептов, обозначающих понятия предметной области, и отношения (как правило, бинарные), определяемые между классами. С каждым классом и отношением сопоставляется функция интерпретации, отображающая класс во

множество объектов реального мира, а отношение - в декартовое произведение такого множества на самого себя. В OWL функции интерпретации задаются неявно через утверждения дескрипционной логики. Последние в свою очередь формально ограничивают множества интерпретации классов и отношений и, тем самым, частично определяют их семантику.

Таким образом, OWL-онтологию можно рассматривать как совокупность утверждений дескрипционной логики, задающих ограничения на множества интерпретаций классов и отношений. Полагается, что эти утверждения, (ввиду того, что формулируются специалистом предметной области) верно, отражают смысл понятий, поэтому их называют аксиомами, а онтологию, которую они составляют – логической теорией. Среди основных аксиом, определяющих формальную семантику понятий, можно выделить:

- аксиомы тождественности (equivalent-to), далее обозначаются знаком « $\equiv$ ». Формально они определяют равенство множеств интерпретации классов. Например, ЭВМ  $\equiv$  КОМПЬЮТЕР, декларирует то, что любая сущность, отнесенная к классу «ЭВМ», будет также отнесена к классу «КОМПЬЮТЕР» и наоборот;

- аксиомы наследования (subclass/superclass), далее обозначаются « $\sqsubseteq$ » и « $\supseteq$ ». Определяют вхождение множества интерпретации одного класса (подкласса) во множество другого (суперкласса). Например, «ЭВМ»  $\sqsubseteq$  «ФИЗИЧЕСКИЙ-ОБЪЕКТ» означает, что если сущность принадлежит к классу «ЭВМ», то она также будет отнесена и к классу «ФИЗИЧЕСКИЙ-ОБЪЕКТ», но не наоборот;

- аксиома несвязности (disjoint) классов, указывает на то, что множества интерпретации классов не пересекаются. Например, аксиома «ЭВМ» disjoint «МАШИНА» означает, что если сущность будет причислена к классу «ЭВМ», то она не будет входить в класс «МАШИНА» и наоборот;

- аксиома перечисления (enumeration), позволяет задать класс экстенционально, то есть путем перечисления всех его экземпляров. Это предполагает, что данный класс не содержит других экземпляров, кроме, указанных непосредственно.

Для того чтобы использовать какую-либо OWL-онтологию в программных разработках или исследованиях следует ясно представлять интерпретации ее классов и отношений. В противном случае любая ее модификация может привести к появлению противоречивых аксиом и, как следствие, возможности получения неверных результатов ее логического анализа и ошибкам или сбоям в работе основанных на ней программ. В свою очередь проблема понимания онтологии (ontology comprehension), как это отмечено в работе [5], является на данный момент достаточно новой и требует дальнейшего исследования.

Для использования OWL-онтологии в качестве основы ГПИ предлагается формировать на ее основе более простую для понимания онтологию пользовательского представления (ОПП). ОПП должна быть изоморфна исходной онтологии в следующем (не строгом математическом) смысле: с одной стороны ОПП должна включать элементы исходной онтологии, существенные для визуализации в рамках ГПИ, и быть достаточно простой, для того чтобы ее визуализация являлась чисто технической задачей. С другой



стороны – набор ее элементов должен позволять формировать не только простые (поиск подклассов/экземпляров класса), но и вложенные запросы к исходной онтологии. Наряду с этим в нее также можно включить элементы, позволяющие отразить информацию о поисковых потребностях пользователя, и на ее основе определить предпочтительный способ визуального представления понятийной системы предметной области. Это позволит должным образом персонифицировать ГПИ и тем самым повысить удобство работы с ним конечного пользователя.

Разработку онтологии пользовательского представления (ОПП) имеет смысл производить не «с нуля», а взяв за основу какую-либо из уже существующих моделей представления знаний. Это облегчит создание ОПП, а также позволит при оперировании ее элементами использовать существующие для выбранной в качестве основы модели инструментальные средства.

С точки зрения авторов на роль такого основания подходит модель простой системы организации знаний (Simple Knowledge Organisation Scheme, SKOS). Ее основными элементами являются:

- концепт (Concept) – обозначает какое-либо понятие предметной области, близок по смыслу с классом или экземпляром класса в OWL;
- коллекция (Collection) – набор концептов, схожих по некоторому признаку;
- отношения «шире»/«уже» (broader/narrower) – вместе со своими транзитивными вариантами «broaderTransitive» и «narrowerTransitive» позволяют задавать иерархию на концептах, схожи с отношениями «подкласс»/«суперкласс» (subclass/superclass) в OWL;
- метки «prefLabel», «altLabel» и «hiddenLabel» – представляют основное, альтернативное и служебное наименование концепта.

Отношения семантической близости (Mapping relation) определяют различные варианты указания близости концептов, принадлежащих различным концептуальным схемам (Concept scheme). В OWL для этой цели используется аксиома тождественности (equivalentTo), указывающая на равенство множеств интерпретации классов.

Необходимо заметить, что сама модель SKOS описывается ее авторами языком OWL и представляет собой простую OWL-онтологию [12]. Ее категории элементов, такие как концепт (Concept), коллекция (Collection), концептуальная схема (ConceptScheme), представляются в виде OWL классов, а отношения между ними и различные описательные элементы в виде объектных отношений и аннотационных свойств OWL соответственно. Конкретные элементы SKOS модели представляются экземплярами, соответствующих OWL классов. Такое представление SKOS позволяет осуществлять взаимодействие с ней через те же программные интерфейсы, что ориентированы на работу с OWL-онтологиями, например, OWL API [13]. Кроме того, модель SKOS имеет статус рекомендации W3C, которая является куратором развития стандартов и технологий, используемых в сети Интернет.

Что же касается визуализации элементов SKOS, то в данном случае их совокупность достаточно просто представляется в виде графа, вершинами которого являются SKOS концепты, а дугами отношения между ними. В свою очередь для аксиом OWL, включающих пересечение, объединение, отрицания OWL классов, а также различные ограничения на свойства, определение соответствующих

элементов графа требует их предварительного анализа.

Таким образом, модель SKOS является удобной основой для построения из исходной OWL-онтологии изоморфной ей онтологии пользовательского представления.

### Отображение в онтологии пользовательского представления элементов OWL-онтологий

Несмотря на то, что наборы элементов OWL и SKOS являются схожими, далеко не всегда OWL-онтологию можно непосредственно представить в виде модели SKOS. Главным образом это связано с тем, что язык OWL является более выразительным языком, чем язык модели SKOS. Поэтому при отображении синтаксических конструкций первого в конструкции второго неизбежно приходится опускать некоторые элементы, тем самым обедняя семантику исходного выражения. Решения же вопроса о том, чем необходимо пожертвовать из исходного выражения следует принимать с учетом того обстоятельства, что из визуализации результата пользователь смог бы понять смысл понятия и смог бы составить запрос на поиск его экземпляров.

С точки зрения способов представления в SKOS аксиомы OWL разделим на две группы – простые и составные. Простые аксиомы имеют в правой части один именованный или неименованный класс, определенный ограничением на одно свойство, а составные - несколько именованных и/или неименованных классов. Для ясности заметим, что в языке OWL неименованным или анонимным является класс, не имеющий интернационализованного идентификатора ресурса (IRI, Internationalized Resource Identifier) и заданный через ограничение его экстенционала, например, в виде объединения, пересечения классов, ограничений на свойство, а также их комбинаций. Простые аксиомы могут быть непосредственно представлены в виде совокупности элементов SKOS модели, тогда как в случае составных необходим их предварительный анализ. В ходе такого анализа происходит выявление компонентов аксиомы, значимых при визуализации, а также определение соответствующих им совокупностей элементов модели SKOS (рис. 1).

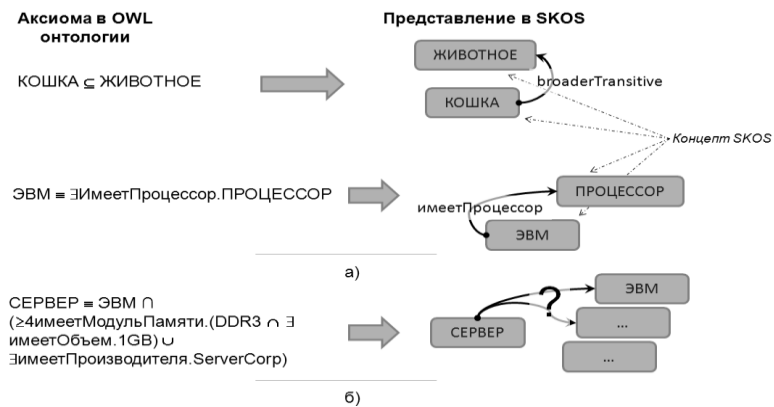


Рис. 1. Представление в SKOS и визуализация:  
а) простых; б) составных аксиом OWL

Исходя из изложенного, определим общий порядок формирования ОПП на основе исходной OWL-онтологии, состоящий из следующих шагов:

1. Обработка машиной логического вывода исходной онтологии и сохранения в ней выведенных утверждений в явном виде.

2. Создание для каждого именованного класса исходной OWL-онтологии, соответствующего SKOS-концепта в ОПП.

3. Задание отношений иерархии на множестве полученных концептов ОПП путем определения между ними транзитивных отношения SKOS «шире» (*broaderTransitive*), в соответствии с иерархией между именованными классами исходной OWL-онтологии.

4. Создание для каждого свойства в исходной OWL-онтологии аналогичного свойства в ОПП.

5. Определение принадлежности свойств к классам в исходной OWL-онтологии и привязка соответствующих свойств в ОПП к SKOS концептам.

6. Анализ оставшихся сложных аксиом в формальных определениях классов и свойств в исходной OWL-онтологии и их представление в ОПП.

Начальная обработка исходной онтологии машиной вывода позволит производить последующий ее анализ с учетом выведенных утверждений, которые являются не менее важными при визуализации, чем определенные явно. Шаг 5 необходим ввиду возможного наличия неименованных классов в областях значений и/или определений свойств, так как в модели SKOS отношение может быть привязано только к SKOS концептам, которые соответствуют именованным классам OWL-онтологии. Рассмотрим принципы разбора и визуализации составной аксиомы на примере аксиомы:

$\text{СЕРВЕР} \equiv \text{ЭВМ} \cap (\geq 4 \text{имеетМодульПамяти}(\text{DDR3} \cap \exists \text{имеетОбъем}.\text{1GB}) \cup \exists \text{имеетПроизводителя}.\text{ServerCorp})$ .

Опуская формальную сторону можно сказать, что она определяет понятие «Сервер» как ЭВМ, которая либо имеет не менее 4 модулей памяти типа DDR3 и объемом 1 гигабайт, либо произведена некоторой фирмой «ServerCorp». Исходя из этого, можно предположить, что поиск экземпляров данного класса в исходной онтологии можно производить двумя способами:

- искать среди экземпляров класса «ЭВМ» те, что имеют отношения принадлежности с экземплярами, представляющими необходимые модули памяти;

- искать среди экземпляров класса «ЭВМ» те, что имеют отношение «имеетПроизводителя» с экземплярами класса «ServerCorp».

Визуальное представление данных альтернатив даст возможность пользователю легко интерпретировать смысл понятия и сформулировать критерии поиска экземпляров данного класса в исходной онтологии. Рассмотрим далее подробно разбор данной аксиомы и ее представление в ОПП. Введем понятие «Субаксиома», которым будем обозначать часть какой-либо аксиомы, заданной именованным или неименованным классом, а также их комбинацией. Разложим аксиому на несколько субаксиом, приведя ее предварительно к дизъюнктивной нормальной форме. В этом случае аксиома будет состоять из одной или нескольких субаксиом, соединенных дизъюнкцией (рис. 2).

Аксиома в ДНФ:

$$\text{СЕРВЕР} \equiv (\text{ЭВМ} \cap \geq 4 \text{имеетМодульПамяти} . (\text{DDR3} \cap \exists \text{имеетОбъем} . 1\text{GB})) \cup (\text{ЭВМ} \cap \exists \text{имеетПроизводителя} . \text{ServerCorp})$$

Субаксиомы:

Субакс. 1:  $\text{ЭВМ} \cap \geq 4 \text{имеетМодульПамяти} . (\text{DDR3} \cap \exists \text{имеетОбъем} . 1\text{GB})$

Субакс. 2:  $\text{ЭВМ} \cap \exists \text{имеетПроизводителя} . \text{ServerCorp}$

Рис. 2. Разделение аксиомы на субаксиомы

Каждая субаксиома определяет альтернативные способы трактовки смысла некоторого понятия, а также разные способы поиска экземпляров, соответствующего ему класса. Субаксиомы представляются в виде SKOS концептов, которые связываются отношением «related» со SKOS концептом, соответствующим именованному классу, определяемому ими. Имя SKOS концепта, представляющего субаксиому (далее SKOS концепт-субаксиома) формируется путем конкатенации имен, входящих в субаксиому классов. В нашем примере (рис. 3) имена концептов будут иметь вид «ЭВМ – имеетПроизводителя» и «ЭВМ - имеетМодульПамяти». В свою очередь аксиому целиком представим как именованную SKOS коллекцию, членами которой будут соответствующие SKOS концепты-субаксиомы. В качестве имени такой коллекции назначается имя класса, определяемого аксиомой.

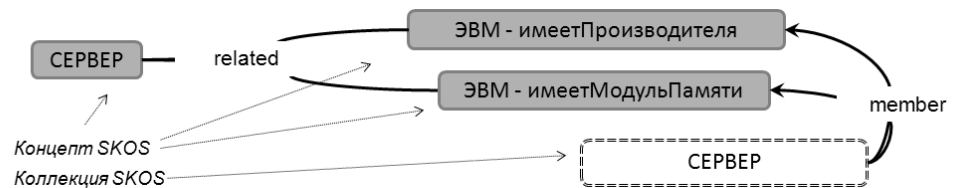


Рис. 3. Пример представления аксиомы в виде SKOS концептов-субаксиом

С каждой субаксиомой связывается также список свойств, который составляют свойства, присущие классам, входящим в нее. Если в субаксиоме присутствует неименованный класс, заданный в виде ограничения на свойство, то его следует рассматривать как именованный, которому присуще данное свойство. Рассмотрим пример привязки свойств к субаксиоме (рис. 4).

В данном случае в исходной OWL-онтологии производится поиск аксиом, задающих объектные и типизированные свойства, у которых в область определения входит класс «ЭВМ». Найденные свойства «привязываются» к концепту-субаксиоме. Далее рассматривается неименованный класс « $\exists$ имеетПроизводителя».

ServerCorp», который определяет сущности, имеющие хотя бы одно отношение «имеетПроизводителя» с сущностями, отнесенными к классу «ServerCorp». Данный неименованный класс рассматривается как именованный «имеетПроизводителя» с присущим ему свойством «имеетПроизводителя», которое также добавляет в список свойств концепта-субаксиомы.

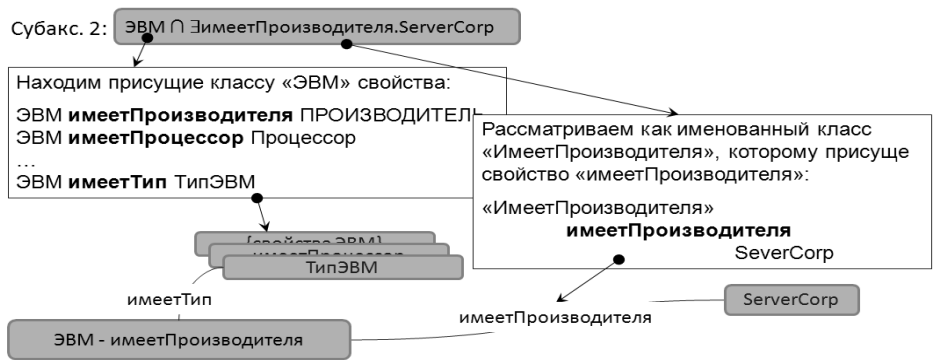


Рис. 4. Разбор субаксиомы

Заметим также, что для прикрепляемых свойств рекурсивно запускается анализ их области значения (property range), которую также может определять простая или составная аксиома. В случае простой аксиомы, включающей только один именованный класс, рекурсия завершается, а SKOS концепт, соответствующий классу в области значений, связывается со свойством. В противном случае аксиома в области значений разбивается на субаксиомы, каждая из которых привязывается к свойству как альтернативное значение. Для субаксиом в свою очередь также запускается процесс поиска присущих им свойств (рис. 5).

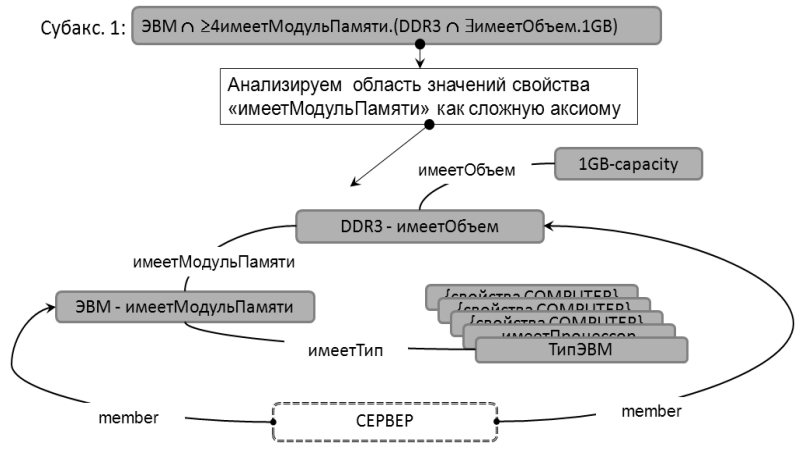


Рис. 5. Разбор аксиомы в области значений (property domain) объектного OWL свойства

Заметим, что концепты SKOS, созданные в процессе анализа областей значений прикрепленных свойств, также включаются в SKOS коллекцию, представляющую исходную анализируемую аксиому. В рассматриваемом примере такой SKOS коллекцией является коллекция «Сервер» (рис. 5).

Далее рассмотрим представление в ОПП основных видов аксиом (тождественности, наследования, несвязности и перечисления) для задания OWL классов. Аксиомы тождественности, определяющие классы, представляются в виде отношения SKOS «related» между SKOS концептом, соответствующим OWL

классу, и с субаксиомами, как это было показано ранее (рис. 3). Аксиомы наследования, если являются простыми и включают один именованный класс, то представляются иерархическими транзитивными SKOS отношениями «шире» (broaderTransitive) и «уже» (narrowerTransitive). Если они являются составными, то анализируются и представляются также как аксиомы тождественности.

Если при задании OWL класса использована аксиома несвязности, то ее можно рассматривать как аксиому тождественности, включающей отрицания, которая представляется в ОПП способом, представленный на рис. 6.

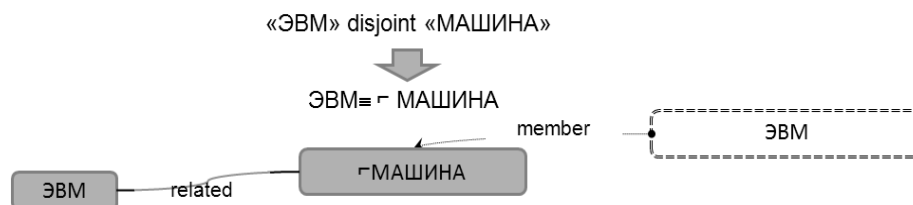


Рис. 6. Представление аксиомы разделения (disjoint)

Что касается классов, заданных путем перечисления, то они представляются в ОПП аналогично именованным классам, заданным с помощью аксиомы «equivalent-to», то есть в виде SKOS концептов, с которыми связываются отношением «related» SKOS концепты, соответствующие перечисляемым экземплярам данного класса.

Рассмотренный порядок в данном разделе, представления OWL-онтологии в ОПП, позволяет явно отразить в последней семантику OWL аксиом в виде совокупностей SKOS элементов. Визуализация всей ОПП сводится к отображению в виде графовой структуры SKOS концептов и отношений между ними. При общем отображении онтологии можно скрыть концепты, которые являются членами каких-либо SKOS коллекций, ввиду того, что они соответствуют неименованным OWL классам исходной онтологии, и их отображение усложнит понимание структуры онтологии. При выборе же конкретного SKOS концепта имеет смысл отобразить их, чтобы позволить пользователю получить более полное представление о понятии.

### Формирование поисковых запросов на основе онтологии пользовательского представления

Основным средством формулировки запросов к массивам данных, представленным в модели RDF и в том числе OWL-онтологиям, а также протоколом для передачи ответов на такие запросы в рамках инициативы Semantic web является SPARQL (Protocol and RDF Query Language). Принимая во внимание, что ОПП будет использоваться как основа ГПИ, необходимо обеспечить возможность формирования SPARQL запросов на ее основе к исходной OWL-онтологии.

Данный раздел посвящен описанию элементов языка OWL и SKOS, используемых для хранения информации, необходимой для формирования запроса, а также общий порядок его компоновки. Заметим, что рассматривается формирование SPARQL запросов типа «SELECT», нацеленных на извлечение

данных из массива RDF в виде подграфов – наборов элементов, связанных между собой отношениями. Такие подграфы также называют решениями (Solutions).

Рассмотрим принципы формирования запроса на основе представления в ОПП понятия «Сервер» (рис. 7).

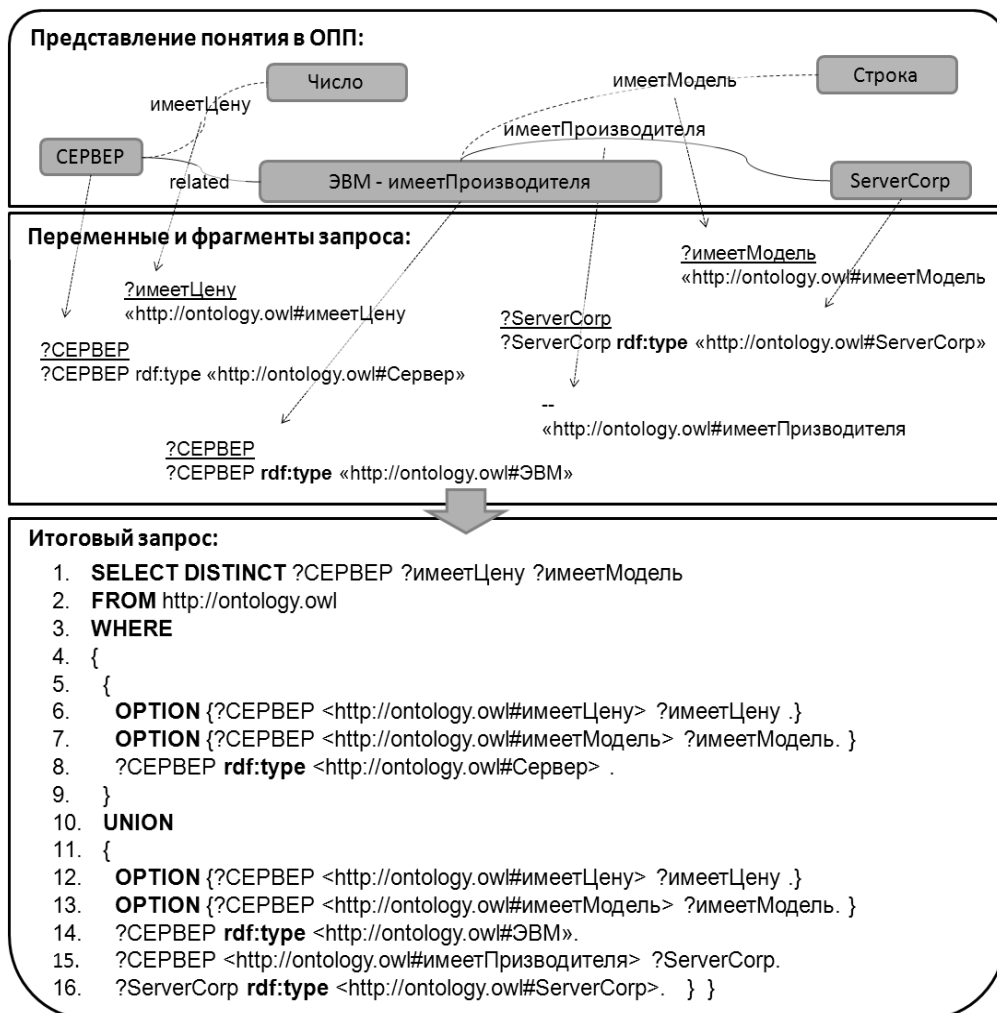


Рис. 7. Формирования запроса на основе ОПП

Запрос формируется программным модулем – компоновщиком запроса, которому передаются элементы ОПП, выбранные пользователем с помощью ГПИ. Компоновщик в свою очередь формирует запрос из фрагментов и SPARQL переменных, которые были сгенерированы и сопряжены с элементами ОПП на этапе отображения в нее исходной OWL-онтологии в виде аннотационных свойств (Annotation property) языка OWL. Генерация переменных происходит по следующим правилам:

- для SKOS концепта, соответствующего именованному классу, SPARQL переменная определяется, как сокращенный IRI. Наряду со SKOS концептом сопрягается фрагмент запроса, определяющий соответствующий ему

именованный класс. Например, SKOS концепту, представляющему именованный класс с IRI <<http://ontology.com#СЕРВЕР>> будет соответствовать переменная ?СЕРВЕР и фрагмент запроса: ?СЕРВЕР rdf:type <<http://ontology.com#СЕРВЕР>>;

- для SKOS концептов, соответствующих субаксиомам, определяется такая же переменная, что и для SKOS концептов, с которыми они связаны отношением «related», а фрагмент запроса может содержать несколько строк, определяющих все именованные классы, входящие в субаксиому;

- с объектными свойствами переменные не сопрягаются, а в качестве фрагмента запроса выступает IRI свойства. В этом случае, формирование строки запроса, определяющей объекта-носителя свойства и объекта-значения, является задачей компоновщика;

- для типизированных свойств переменная определяется аналогичным способом, что и для SKOS концептов, то есть как сокращенный IRI свойства. В запросах она будет использоваться для хранения конкретного значения свойства. В качестве фрагмента запроса, как и в случае объектных свойств, будет выступать полный IRI типизированного свойства.

Сформированный компоновщиком запрос может содержать внутри части WHERE несколько секций, между которыми указывается ключевое слово «UNION». Далее будет называть их UNION-секциями. UNION-секции представляют разные способы поиска экземпляров в соответствии с теми субаксиомами, которые выбрал пользователь. Результаты, полученные в ходе выполнения различных способов поиска, объединяются. Например, на рис. 7 в запросе определено 2 способа поиска экземпляров, как членов класса «Сервер» (строки 5-9) и как членов класса «ЭВМ», имеющих отношение с экземплярами класса «ServerComp» (строки 11-17). При выборе каждой дополнительной субаксиомы пользователем компоновщик будет подставлять в запрос дополнительную UNION-секцию, «соединяя» ее с предыдущей ключевым словом «UNION». Заметим, что различные способы поиска могут вернуть одинаковые результаты. Для предотвращения этого в часть «SELECT» подставляется модификатор запроса «DISTINCT» (строка 1), предотвращающий дублирование.

В ходе формирования запроса пользователь, помимо способов поиска, также определяет данные для представления в результате выполнения запроса. Таковыми могут являться значения типизированных свойств и IRI экземпляров, к которым они привязаны. В этом случае компоновщик добавляет SPARQL переменные, соответствующие значениям типизированных свойств и экземплярам, в часть «SELECT», а также добавляет одинаковые секции «OPTION» (далее OPTION-секции), реализующие получение искомым значений свойств, во все UNION-секции. Заметим, что ключевое слово «OPTION» указывает на то, что указанное после него условие необязательно должно быть удовлетворено, то есть если для некоторого подграфа-решения оно не выполняется, то такой подграф все равно будет являться одним из результатов выполнения запроса. Для наглядности рассмотрим пример на рис. 7. В данном случае пользователь выбрал SKOS концепт для поиска экземпляров соответствующего ему класса исходной OWL-онтологии. В ответ на это компоновщик добавил переменную «?СЕРВЕР», сопряженную со SKOS концептом «СЕРВЕР» в часть «SELECT» (строка 1). Наряду с этим пользователь



выбрал для отображения значения типизированных свойств «имеетЦену» и «имеетМодель» у найденных экземпляров. Компоновщик в свою очередь добавил в часть «SELECT» переменные ?имеетЦену и ?имеетМодель (строка 1), а в UNION-секции одинаковые наборы строк (строки 6-7 и 12-13). Использование модификатора «OPTION» в данном случае позволит представить информацию об экземплярах, для которых, например, определена только цена, а указание модели отсутствует и наоборот.

Наряду с данными для представления пользователь при формировании запроса может также указывать дополнительные ограничения поиска в виде требования наличия отношения между объектами запроса, а также наличия у объекта запроса типизированного свойства с некоторым значением. Компоновщик в этом случае определяет SPARQL переменные, которые соответствуют элементам ОПП, определяющим область определения и область значения объектного или типизированного свойства и формирует строку запроса. Например (рис. 7), в ответ на выбор отношения «имеетПроизводителя» и SKOS концепта «ServerCorp» компоновщик во второй UNION-секции сформировал фрагмент запроса (строки 15-16), ограничивающий выборку экземпляров теми, которые имеют отношение «имеетПроизводителя» с экземплярами класса «ServerCorp».

Следует заметить, что рассмотренные в данном разделе принципы также применяются и для формирования вложенных запросов. Например, если бы пользователь в запросе (рис. 7), выбрал бы концепты-субаксиомы для «ServerCorp», то во второй UNION-секции (строки 11-17) были бы заданы вложенные UNION-секции, соответствующие способам поиска экземпляров класса «ServerCorp».

### **Программная реализация предложенной онтологии**

Для практического применения представленной в работе технологии было разработано программное средство, осуществляющее преобразование произвольной OWL - онтологии в ОПП и визуализацию последней в виде графовой структуры. Разработка программного средства была выполнена на языке программирования JAVA в интегрированной среде разработки Eclipse. Программное средство включает модуль создания ОПП – ontologyConverter (рис.8) и ее визуализации – upo2Prefuse.

Модуль upo2Prefuse осуществляет графическое представление полученной в результате ОПП. Данный модуль использует в своей работе фреймворк для получения интерактивной визуализации данных Prefuse, а также java-библиотеку OWL2Prefuse -конвертер OWL-онтологии в структуры данных Prefuse.

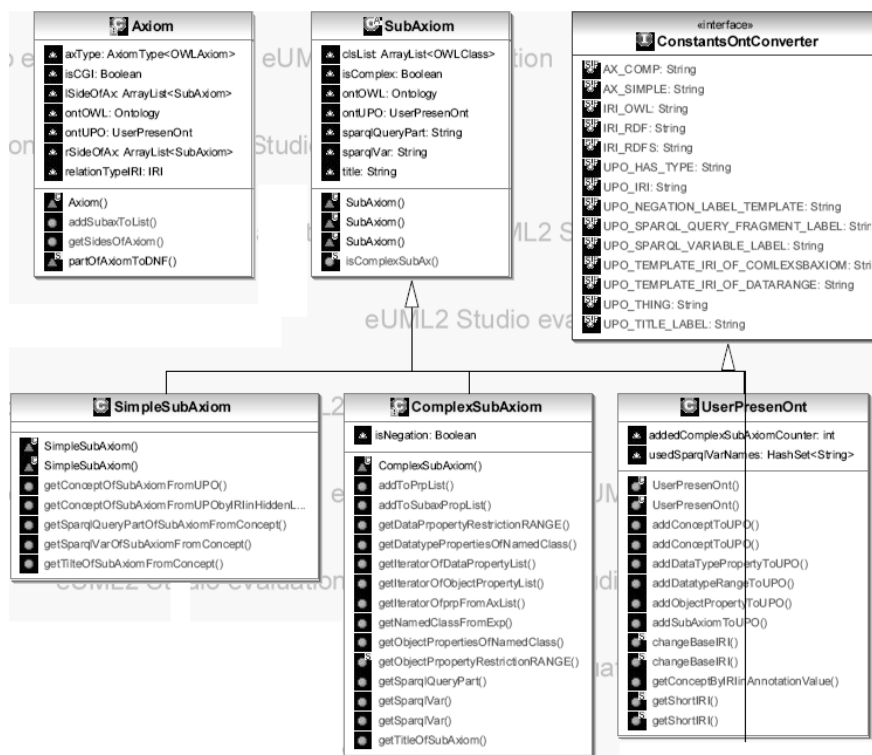


Рис. 8. Диаграмма классов java-пакета ontologyConverter

Визуальное представление тестовой OWL-онтологии, полученное в результате ее обработки с помощью разработанного программного средства, представлено на рис. 9.

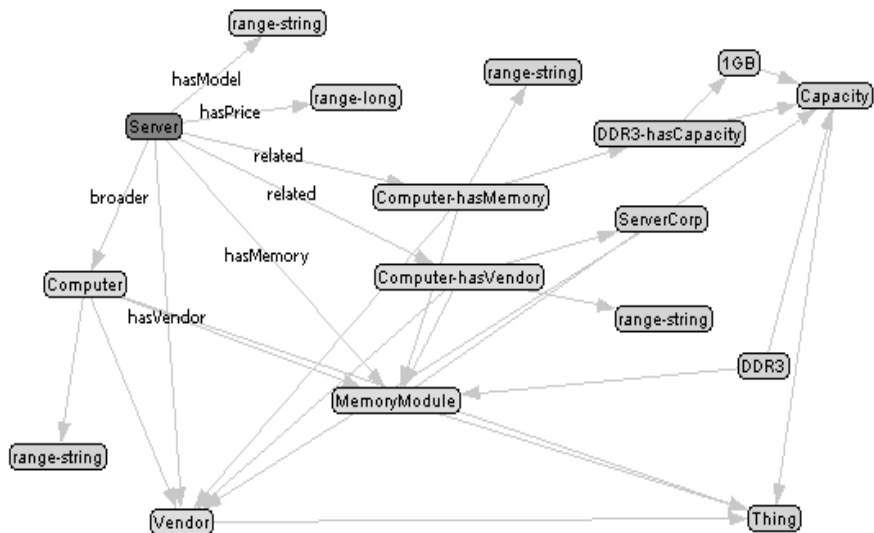


Рис. 9. Визуализация тестовой онтологии с разработанного программного средства

При сравнении с результатами визуализации той же онтологии с помощью плагина OntoGraph (рис. 10) можно отметить наличие представления составных аксиом, а также неявных отношений между классами, которые следуют из таких аксиом.

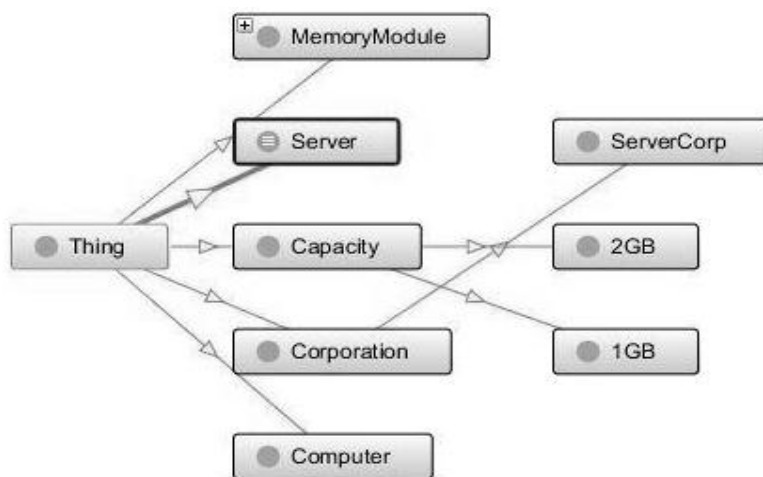


Рис. 10. Визуализация тестовой онтологии с помощью инструмента OntoGraph

Таким образом, можно сделать вывод о том, что предлагаемая технология позволяет получить более полное графическое представление OWL-онтологии, а соответственно более функциональный графический интерфейс на ее основе.

## Заключение

В данной работе рассмотрена технология создания для OWL-онтологии ее упрощенной модификации – онтологии пользовательского представления (ОПП), направленной на непосредственную визуализацию ее элементов в рамках ГПИ. В качестве основы ОПП используется модель SKOS, совокупности элементов которой могут быть легко представлены в виде графовой структуры. Основное внимание в статье уделено процессу разбора и отображения основных видов аксиом исходной OWL-онтологии в ОПП. Авторы полагают, что предлагаемая технология создания и использования ОПП позволит упростить проектирование и разработку ГПИ информационной системы или веб-ресурса, в основе которого используется сложная OWL-онтология предметной области, за счет отсутствия необходимости анализа составных аксиом и определения способа их визуализации.

К основным направлениям дальнейшей работы можно отнести исследование возможностей хранения в ОПП данных о поисковых потребностях пользователя, а также определение с их учетом различных способов визуального отображения элементов ОПП. Это позволит специфицировать представление знаний об одной или нескольких предметных областях для конкретных пользователей в соответствии с их задачами, что является особенно важным для мультипредметных веб-ресурсов, в которых могут использоваться несколько онтологий с большими системами понятий.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. An Ontology-based Visual Tool for Query Formulation Support / Т. Catarci и др. // In Proceedings of the 16th European Conference on Artificial Intelligence, 2004.
2. Guiding the user: An ontology driven interface / S. Bechhofer и др. // UIDIS, 1999. -pp.158-161.
3. Feikje, H. Evaluating an Ontology-Driven WYSIWYM Interface / H. Feikje, M. Chris, E. Peter // Proceedings of the 5th International Conference on Natural Language Generation, 2008. -pp.138-146.
4. Грибова, В.В. Управление проектированием и реализацией пользовательского интерфейса на основе онтологий / В.В. Грибова, А.С. Клещев // Проблемы управления, 2006. -№2. -С.58-62.
5. Bergh, J. R., Ontology comprehension / J.R. Bergh //University of Stellenbosch, Master Thesis, 2010.
6. Bauer, J. Model exploration to support understanding of ontologies / J. Bauer // Master's thesis, Technische Universität Dresden, 2009.
7. Graphviz. Open source graph drawing tools proceedings / J. Ellson и др. // Graph Drawing, 2002. – pp.483-484.
8. Ontology visualization methods – A survey / A. Katifori и др. // ACM computing surveys, 39(4):10, 2007.
9. Alani, H. TGVizTab: An Ontology Visualisation Extension for Protégé / H. Alani // Knowledge Capture 03 - Workshop on Visualizing Information in Knowledge Engineering Sanibel Island, FL: ACM (2003). - pp.2-7.
10. Bosca, A., OntoSphere: More than a 3D ontology visualization tool / A. Bosca, D. Bonino, P. Pellegrino. // In SWAP, the 2nd Italian semantic web workshop, 2005.
11. Guarino, N. Formal Ontology and Information Systems/ N. Guarino // Proc. 1st Int'l Conference on Formal Ontology in Information Systems, 3-15. IOS Press/Ohmsha, 1998.
12. Jupp, S., SKOS with OWL: Don't be Full-ish! / S. Jupp, S. Bechhofer, R. Steens. – Режим доступа:  
[http://www.webont.org/owled/2008/papers/owled2008eu\\_submission\\_22.pdf](http://www.webont.org/owled/2008/papers/owled2008eu_submission_22.pdf)
13. Bechhofer, S. Cooking the Semantic Web with the OWL API / S. Bechhofer, P. Lord, R. Volz // In 2nd International Semantic Web Conference, ISWC, volume 2870 of Lecture Notes in Computer Science, Sanibel Island, Florida, October 2003. Springer.

#### Сведения об авторах

*Ломов Павел Андреевич* – к.т.н., младший научный сотрудник,

e-mail: [lomov@iimm.kolasc.net.ru](mailto:lomov@iimm.kolasc.net.ru)

*Pavel A. Lomov* - Ph.D. (Tech. Sci.), junior researcher

*Шишаев Максим Геннадьевич* – д.т.н., зав. лабораторией,

e-mail: [shishaev@iimm.kolasc.net.ru](mailto:shishaev@iimm.kolasc.net.ru)

*Maksim G. Shishaev* - Dr. of Sci (Tech.), head of laboratory

*Диковицкий Владимир Витальевич* - стажер-исследователь,

e-mail: [dikovitsky@iimm.kolasc.net.ru](mailto:dikovitsky@iimm.kolasc.net.ru)

*Vladimir V. Dikovitsky* - junior researcher

УДК 004.9, 004.58

**В.В. Диковицкий**

Институт информатики и математического моделирования Кольского НЦ РАН,  
Кольский филиал ПетрГУ

## **МЕТОД ИНФОРМАЦИОННОГО ПОИСКА НА ОСНОВЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ РАСШИРЯЕМОЙ БАЗЫ ЗНАНИЙ\***

### **Аннотация**

В работе представлен метод поиска, позволяющий повысить релевантность за счет автоматизированного исключения заведомо неперспективных результатов. Использование базы знаний информационной системы позволяет учесть контексты используемых ограничений, а автоматизация данного процесса снимает необходимость в выработке и вводе ограничений пользователем.

### **Ключевые слова:**

*информационный поиск, база знаний, семантика.*

**V.V. Dikovitsky**

## **INFORMATION RETRIEVAL METHOD BASED ON DYNAMICAL KNOWLEDGE BASE**

### **Abstract**

In this paper presents an Information retrieval method, which increases the relevance through automated exception unpromising results. Using a knowledge base of information system allows counting context of the query restrictions. Automation of this process eliminates to need users to enter restrictions.

### **Keywords:**

*information retrieval, knowledge base, semantics.*

### **Введение**

Рост объема информации, циркулирующей в современных информационных системах, обуславливает необходимость совершенствования методов информационного поиска. В работе представлен метод информационного поиска, позволяющий повысить его точность [1] за счет исключения нерелевантных запросу результатов. Ограничение результатов поиска реализуется существующими поисковыми системами с помощью языка запросов [5]. Однако использование языка запросов вызывает трудности для пользователя в силу необходимости выработки и ручного ввода ограничений при формировании запроса. Так же от мощности и семантики множества ограничений зависит точность поиска – пользователь, не обладающий знаниями всех контекстов используемых ограничений, исключает заведомо перспективные результаты. И наоборот, отсутствие ограничений вынуждает пользователя просматривать множество нерелевантных документов. Использование базы знаний (БЗ) информационной системы позволяет учесть контексты используемых ограничений, а автоматизация данного процесса снимает необходимость в выработке и вводе ограничений непосредственно пользователем.

---

\* Работа выполнена в рамках проекта № 2.8 программы фундаментальных исследований ОНИТ РАН «Интеллектуальные информационные технологии, системный анализ и автоматизация».

## Метод информационного поиска

В процессе формулировки запроса существуют несколько трудностей для пользователя. Первая из них – сформировать свою информационную потребность в виде запроса, при этом в отношении пользователя запрос должен быть кратким. Со стороны информационной системы запрос должен содержать ключевые слова требуемого документа в случае статистических методов поиска и наиболее полное и точное семантическое описание в случае семантического поиска. Исключения составляют фактографические системы, где ответом может быть число, слово или предложение, а также системы, оперирующие синтаксической ролью слов запроса, в таких системах пользователю предлагается сформулировать и ввести свой запрос на естественном языке. В случае избытка результатов поиска, а также в случаях, когда информационная потребность не может быть четко сформулирована целесообразно сокращать множество результатов путем исключения заведомо ненужных. Данный подход используется традиционными поисковыми системами, однако механизм его работы весьма несовершенен – отсекаются из рассмотрения документы, содержащие любую словоформу слова запроса, перед которым есть специальный символ. При этом могут исключаться из рассмотрения результаты, содержащие слово вовсе не в контексте запроса. Таким образом, точность поиска коррелирует с мощностью множества исключающих слов и их семантикой в контексте текущего запроса. Семантическая составляющая позволяет учесть контекст запроса и не допустить исключения из рассмотрения результатов, в которых ограничения содержатся в другом контексте.

Второй важный аспект - необходимость ввода пользователем множества ограничений для каждого запроса. Для пользователя это весьма трудоемкая задача, требующая знания возможных контекстов слов запроса и терминологии предметных областей. Использование машинопонимаемых знаний в виде семантической сети, содержащей отношения объектов предметной области и ограничения, разделяющие предметные области, позволяет автоматизировать процесс формирования расширенного запроса пользователя. Ограничения представляется возможным хранить в виде отношений над концептами семантической сети, составляющей базу знаний информационной системы.

Метод поиска включает 3 составляющих: Способ представления документа, способ представления запроса и функцию соответствия между ними. Документ представлен фрагментом базы знаний и множеством ключевых слов в индексной базе, выделенных семантическим анализатором на этапе индексации (рис. 1).

Запрос представлен в виде набора ключевых слов. Запрос и контекст запроса в базе знаний составляют информационную потребность пользователя.

Процесс поиска документов, соответствующих запросу состоит из следующих этапов:

1. Формирование запроса в терминах базы знаний:

1.1. Формирование множества  $Q'$  (1), содержащего концепты БЗ, с символьными именами, соответствующими термам запроса  $Q$ :

$$Q' = KB \cap Q = \langle T, L \rangle, L = \langle T_i, T_l, W \rangle, \quad (1)$$

где  $T$  - множество концептов базы знаний,  $L$  - множество отношений над концептами,  $W$  - множество весов отношений,  $Q$  - множество термов, содержащихся в запросе.

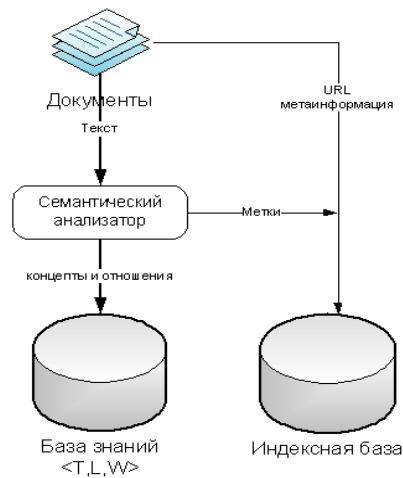


Рис. 1. Представление документов

1.2. Расширение запроса с учетом весов отношений, ограничивающих контекст запроса:

$$Q' = \langle T, L \rangle \cup T', \forall t \in T \exists L_i \in L: T_i \in T \wedge T_j \in T', T_i \neq T_j, \quad (2)$$

где  $T'$  - концепты БЗ, связанные с концептами множества  $T$  отношениями БЗ  $L$ .

2. Получение набора документов, соответствующего модифицированному запросу (рис. 2).

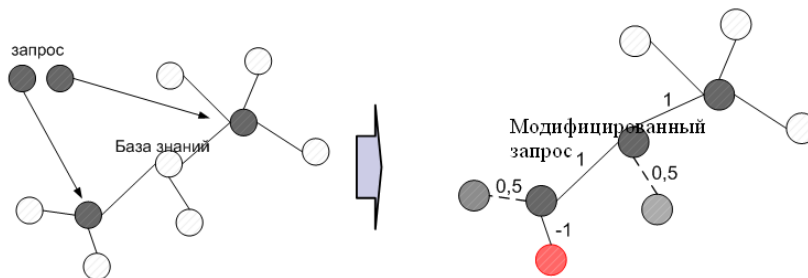


Рис. 2. Модифицированный запрос

3. Ранжирование набора документов с учетом весов отношений. В результате ранжирования документы сортируются в порядке убывания оценки  $R$  (3):

$$R = \sum_{\langle T_i, T_j \rangle \in (D)} (w_k(T_i, T_j)), \quad (3)$$

где  $w_k(T_i, T_j)$  - вес отношений между концептами БЗ  $T_i$  и  $T_j$ , присутствующих в документе  $D$ .

## Заключение

Метод поиска с использованием динамической расширяемой базы знаний был реализован в рамках мультипредметного веб-ресурса RU-ARCTIC (<http://www.ru-arctic.net/>). Интерфейс формы поиска помимо строки ввода запроса, содержит поле визуализации фрагмента БЗ, соответствующего запросу (рис. 3).



Рис. 3. Форма поиска ресурса RU-ARCTIC

Интерфейс является интерактивным, взаимодействие с пользователем осуществляется путем включения в запрос или исключением из него вершин отображаемого фрагмента БЗ. При выборе вершины изменяется поисковый запрос в строке ввода запроса, отображаются связанные с ней вершины. Действия пользователя инициируют итеративную коррекцию запроса и изменение весов отношений БЗ, на основании которых производится верификация БЗ. Базу знаний ресурса RU-ARCTIC составляет русскоязычный тезаурус WordNet, расширяемый результатами работы семантического анализатора над коллекцией документов ресурса. Поле визуализации фрагмента БЗ отображает семантику части документов, соответствующей запросу, в едином семантическом пространстве, а итеративная коррекция запроса вследствие действий пользователя позволяет осуществить интуитивно-понятную навигацию в информационном пространстве множества документов информационной системы.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Baeza-Yates, R. Modern Information Retrieval / R. Baeza-Yates, B. Ribeiro-Neto // Addison-Wesley, 1999. - ISBN 0-201-39829-X.
2. Manning, C. Introduction to Information Retrieval / C. Manning, P. Raghavan, H. Schütze // Cambridge University Press, 2008. -ISBN 0-521-86571-9.
3. Гаврилова, Т.А. Базы знаний интеллектуальных систем /Т.А. Гаврилова, В.Ф. Хорошевский. - СПб. : Изд-во «Питер», 2001. - 382 с.
4. Когаловский, М.Р. Перспективные технологии информационных систем / М.Р. Когаловский. –М.: Компания АйТи, 2003. – 288 с.
5. Лифшиц, Ю. Модели информационного поиска.  
– Режим доступа: <http://yury.name/internet/03ianote.pdf>
6. Осипов, Г.С. Семантический поиск в сети интернет средствами поисковой машины Exactus /Г.С. Осипов, И.А. Тихомиров, И.В. Смирнов. – Режим доступа: [http://www.raai.org/cai-08/files/cai-08\\_exhibition\\_31.doc](http://www.raai.org/cai-08/files/cai-08_exhibition_31.doc)

## Сведения об авторе

Диковицкий Владимир Витальевич – младший научный сотрудник,  
e-mail: [dikovitsky@iimm.kolasc.net.ru](mailto:dikovitsky@iimm.kolasc.net.ru)  
Vladimir V. Dikovitsky - junior researcher



УДК 004.94

**С.С. Ковалёв, М.Г. Шишаев**

Институт информатики и математического моделирования Кольского НЦ РАН,  
Кольский филиал ПетрГУ

## **СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ КЛАСТЕРИЗАЦИИ В КОНТЕКСТЕ ЗАДАЧИ ИДЕНТИФИКАЦИИ РАССЫЛОК ПОЧТОВОГО СПАМА\***

### **Аннотация**

В работе рассмотрены современные методы кластеризации и проведён их анализ с точки зрения специфики задачи кластеризации в применении к обнаружению рассылок почтового спама.

### **Ключевые слова:**

*кластеризация, e-mail, спам, стратегии рассылки.*

**S.S. Kovalev, M.G. Shishaev**

## **MODERN CLUSTER ANALYSIS METHODS IN CONTEXT OF E-MAIL SPAM CAMPAIGNS IDENTIFICATION**

### **Abstract**

In this paper modern clustering methods are reviewed and analyzed with respect to specific of the clustering problem in application to e-mail spam campaigns identification.

### **Keywords:**

*clustering, e-mail, spam, distribution strategies.*

### **Введение**

В настоящее время нежелательная почтовая корреспонденция (спам) стала актуальной проблемой для большинства пользователей глобальных телекоммуникационных сетей. Как следствие постоянного соперничества разработчиков средств рассылки спама и технологий борьбы с ним, имеет место своеобразная «гонка вооружений», заставляющая изобретать все более изощренные способы рассылки нежелательной корреспонденции, а в ответ – адекватные методы борьбы с ними. Сегодня для рассылки спама злоумышленники практически не используют выделенные почтовые серверы, поскольку их очень легко обнаружить и заблокировать. Вместо этого применяются так называемые ботнеты – компьютеры по всему миру, на которых работает специальное программное обеспечение, скрытно объединяющее их в одну логическую сеть и дающее возможность управлять этими компьютерами и выполнять с помощью них различные информационно-вычислительные задачи, в том числе рассылку спама.

Тот факт, что все участники ботнета управляются однотипным программным обеспечением и имеют общий «командный центр», обуславливает наличие у почтовых сообщений, рассылаемых ботнетами, некоторых характерных признаков, которые могут быть использованы для автоматической идентификации и фильтрации нежелательной корреспонденции. При этом,

---

\* Работа выполнена в рамках проекта № 2.8 программы фундаментальных исследований ОНИТ РАН «Интеллектуальные информационные технологии, системный анализ и автоматизация».

вследствие того, что изменение инфраструктуры и логики работы ботнета является дорогостоящим и трудоемким процессом, подобные признаки будут многократно повторяемы и неизменны в течение длительного времени. Таким образом, для блокировки рассылок спама можно использовать идентификацию *стратегий рассылки* — совокупности значений некоторых атрибутов, характеризующих как участников и содержимое рассылки спама, так и сам процесс рассылки. Такой подход может обеспечить большую устойчивость классификатора и повысить качество классификации спама в сравнении с современными технологиями спам-фильтрации, основанными на идентификации лишь объектов или источников рассылки.

Общий принцип выявления используемых распространителями спама стратегий рассылки можно сформулировать следующим образом:

1. Накапливается обучающая выборка наблюдений, описывающих как статистику действий, предпринимаемых конкретным отправителем, так и параметры передаваемого им сообщения. Можно сказать, что эти наблюдения являются *описаниями поведения* отправителей. Используемый для описания поведения отправителей набор атрибутов определяется эвристически и может включать в себя любое конечное число атрибутов и их комбинаций. Такими атрибутами могут быть, например:

- факт нарушения отправителем требований протокола SMTP;
- количество инициированных отправителем соединений в единицу времени;
- факт совпадения доменов в почтовых адресах отправителя и получателей;
- факт принадлежности IP-адреса отправителя к сегменту сети, из которой были замечены рассылки спама;
- факт наличия MX-записи для домена, из которого производится отправка;
- количество ошибочных или не существующих адресов получателей;
- факт соответствия содержания сообщения некоторому шаблону;
- размер сообщения.

2. Наблюдения из обучающей выборки классифицируются и маркируются как «спам» или «не спам». Классификация производится вручную, так как, во-первых, мы не рассматриваем методы автоматической классификации спама как 100% надёжные, а во-вторых, требуется учесть субъективные представления пользователей о спаме, поскольку то, что для одного человека – спам, для другого может быть нужной информацией.

3. Производится кластеризация исходного множества наблюдений таким образом, чтобы получить кластеры, содержащие в себе только объекты, промаркированные как «спам».

4. Конфигурации полученных кластеров анализируются с целью выявления наборов идентифицирующих атрибутов стратегий спам-рассылок.

Ключевой проблемой подобной технологии идентификации спама является качественная и как можно более быстрая кластеризация обучающей выборки наблюдений. В общем случае каждый элемент множества наблюдений (объект) рассматривается как точка в многомерном (в общем случае – неоднородном) метрическом пространстве (пространстве данных), каждой

размерности которого соответствует некоторое свойство объекта, а метрика – есть функция от значений данных свойств. Объектами пространства данных в нашем случае являются факты рассылки почтовой корреспонденции. Задача кластеризации сводится к разбиению имеющегося множества объектов на подмножества таким образом, что элементы одного подмножества существенно различны по некоторому набору свойств от элементов всех других подмножеств.

Для решения задачи кластеризации в настоящее время существует множество разнообразных методов, поэтому возникает проблема выбора наиболее эффективного из них в контексте рассматриваемой задачи.

### **Специфика задачи кластеризации в применении к идентификации стратегий спам-рассылок**

Требования, которым должен удовлетворять используемый метод кластеризации, определяются следующими особенностями задачи идентификации спам-рассылок:

1. *Высокая размерность пространства данных.* Объекты пространства данных в данном случае описываются большим количеством атрибутов. Вследствие этого алгоритм должен быть приспособлен к работе в пространствах данных высокой размерности. В частности, это означает, что используемый алгоритм должен:

а) решать проблему «проклятия размерности» [3, 4];

б) находить кластеры в подпространствах исходного пространства данных.

2. *Смешанный тип измерений.* Так как описание поведения отправителей может включать в себя как числовые, так и номинальные атрибуты, то используемый алгоритм кластеризации должен быть приспособлен к использованию в пространствах со смешанными типами измерений.

3. *Большой объём данных.* Для получения качественных результатов кластеризации требуется большое количество наблюдений в обучающей выборке. Следовательно, алгоритм кластеризации должен быть масштабируемым для работы с большими объёмами данных.

4. *Отсутствие априорных знаний о данных.* Изначально отсутствуют какие-либо знания об исследуемых данных, такие как количество содержащихся в них кластеров, закон распределения данных в пространстве и т. п. Поэтому алгоритм кластеризации не должен требовать указания каких-либо параметров, подразумевающих наличие знаний о данных.

Далее рассмотрены наиболее известные в настоящее время группы методов и алгоритмов кластеризации.

### **Методы разбиения**

Наиболее известные представители этого семейства методов – алгоритмы  $k$ -means [1] и  $k$ -medoids [2]. Они принимают входной параметр  $k$  и разбивают пространство данных на  $k$  кластеров таких, что между объектами одного кластера сходство максимально, а между объектами разных кластеров минимально. Сходство измеряется по отношению к некоторому *центру* кластера

как дистанция от рассматриваемого объекта до центра. Основное различие между этими методами заключается в способе определения центра кластера.

В алгоритме k-means сходство рассматривается по отношению к *центру масс* кластера – среднему значению координат объектов кластера в пространстве данных. Сначала произвольно выбираются  $k$  объектов, каждый из которых является прототипом кластера и представляет его центр масс. Затем для каждого из оставшихся объектов выполняется присоединение к тому кластеру, с которым сходство больше. После этого центр масс каждого кластера вычисляется заново. Для каждого полученного разбиения рассчитывается некоторая оценочная функция, значения которой на каждом шаге образуют сходящийся ряд. Процесс продолжается до тех пор, пока указанный ряд не сойдётся к своему предельному значению. Иными словами, перемещение объектов из кластера в кластер заканчивается тогда, когда с каждой итерацией кластеры будут оставаться неизменными. Алгоритм k-means эффективен для обработки больших объёмов данных, однако в силу необходимости вычисления средних значений координат объектов, сфера его применения ограничивается пространствами данных только с числовыми измерениями. На его основе построены алгоритмы кластеризации многомерных пространств со смешанными измерениями: k-prototypes [5], использующий гетерогенную функцию для вычисления метрики в пространстве, и k-modes [6], преобразующий числовые измерения пространства в номинальные и работающий в пространстве с номинальными измерениями. Однако оба эти алгоритма сильно подвержены влиянию «проклятия размерности», что существенно снижает качество получаемых кластеров.

Алгоритм k-medoids, в отличие от k-means, использует для представления центра кластера не центр масс, а *представительный объект* – один из объектов кластера. Как и в методе k-means, сначала произвольным образом выбирается  $k$  представительных объектов. Каждый из оставшихся объектов объединяется в кластер с ближайшим представительным объектом. Затем итеративно для каждого представительного объекта производится его замена произвольным непредставительным объектом пространства данных. Процесс замены продолжается до тех пор, пока улучшается качество результирующих кластеров. Качество кластеризации определяется суммой отклонений между каждым объектом и представительным объектом соответствующего кластера, которую метод стремится минимизировать. То есть, итерации продолжаются до тех пор, пока в каждом кластере его представительный объект не станет медоидом – наиболее близким к центру кластера объектом. Алгоритм плохо масштабируем для обработки больших объёмов данных, эту проблему решает дополняющий метод k-medoids алгоритм CLARANS [7]. Для кластеризации многомерных пространств на основе CLARANS построен алгоритм PROCLUS [8], однако, он не применим для кластеризации пространств со смешанными типами измерений.

## Иерархические методы

Общая идея методов данной группы заключается в последовательной иерархической декомпозиции множества объектов. В зависимости от направления построения иерархии различают дивизимный и агломеративный методы. В случае агломеративного метода (снизу вверх) процесс декомпозиции начинается с того, что каждый объект представляет собой самостоятельный кластер. Затем на каждой итерации пары близлежащих кластеров последовательно объединяются в общий кластер. Итерации продолжаются до тех пор, пока все объекты не будут объединены в один кластер или пока не выполнится некоторое условие остановки. Дивизимный метод (сверху вниз) напротив, подразумевает, что на начальном этапе все объекты объединены в единый кластер. На каждой итерации он разделяется на более мелкие до тех пор, пока каждый объект не окажется в отдельном кластере или не будет выполнено условие остановки. В качестве условия остановки можно использовать пороговое число кластеров, которое необходимо получить, однако обычно используется пороговое значение расстояния между кластерами.

Основная проблема иерархических методов заключается в сложности определения условия остановки таким образом, чтобы выделить «естественные» кластеры и в то же время не допустить их разбиения. Еще одна проблема иерархических методов кластеризации заключается в выборе точки разделения или слияния кластеров. Этот выбор критичен, поскольку после разделения или слияния кластеров на каждом последующем шаге метод будет оперировать только вновь образованными кластерами, поэтому неверный выбор точки слияния или разделения на каком-либо шаге может привести к некачественной кластеризации.

Агломеративный алгоритм ROCK [9] использует для кластеризации пространств со смешанными типами измерений понятие *степени связи* между объектами – количества их общих соседей. Два объекта считаются *соседями*, если значение меры их сходства превышает некоторое пороговое значение. Качество кластеризации определяется оценочной функцией, зависящей от степени связи между парами объектов из одного кластера. Максимизация этой функции определяет наилучшее разбиение пространства на кластеры. Алгоритму ROCK свойственны все проблемы иерархических методов. Кроме того, он не масштабируем для обработки большого числа объектов.

В алгоритме O-Cluster [10] используется дивизимный подход для кластеризации числовых многомерных пространств с большим объёмом данных. Этот алгоритм находит в ортогональных проекциях пространства данных, хорошо разделённые регионы плотности, и на их основе итеративно строит бинарное дерево разбиения этого пространства на кластеры. Разработано расширение этого алгоритма для кластеризации пространств со смешанными типами измерений [11]. Преимуществом этого алгоритма является хорошая масштабируемость при обработке пространств со смешанными типами измерений.

## Плотностные методы

Кластеры рассматриваются как регионы пространства данных с высокой плотностью объектов, которые разделены регионами с низкой плотностью объектов.

Алгоритм DBSCAN [12] – один из первых алгоритмов кластеризации плотностным методом. В основе этого алгоритма лежит несколько определений:

- *ε-окрестностью* объекта называется окрестность радиуса  $\varepsilon$  некоторого объекта.
- *Корневым объектом* называется объект,  $\varepsilon$ -окрестность которого содержит не менее некоторого минимального числа *MinPts* объектов.
- *Объект  $p$  непосредственно плотно-достижим* из объекта  $q$  если  $p$  находится в  $\varepsilon$ -окрестности  $q$  и  $q$  является корневым объектом.
- *Объект  $p$  плотно-достижим* из объекта  $q$  при заданных  $\varepsilon$  и *MinPts*, если существует последовательность объектов  $p_1, \dots, p_n$ , где  $p_1 = q$  и  $p_n = p$ , такая что  $p_{i+1}$  непосредственно плотно-достижим из  $p_i$ ,  $1 \leq i \leq n$ .
- *Объект  $p$  плотно-соединён* с объектом  $q$  при заданных  $\varepsilon$  и *MinPts*, если существует объект  $o$  такой, что  $p$  и  $q$  плотно-достижимы из  $o$ .

Для поиска кластеров алгоритм DBSCAN проверяет  $\varepsilon$ -окрестность каждого объекта. Если  $\varepsilon$ -окрестность объекта  $p$  содержит больше точек чем *MinPts*, то создаётся новый кластер с корневым объектом  $p$ . Затем DBSCAN итеративно собирает объекты непосредственно плотно-достижимые из корневых объектов, которые могут привести к объединению нескольких плотно-достижимых кластеров. Процесс завершается, когда ни к одному кластеру не может быть добавлено ни одного нового объекта.

Хотя, в отличие от методов разбиения, DBSCAN не требует заранее указывать число получаемых кластеров, требуется указание значений параметров  $\varepsilon$  и *MinPts*, которые непосредственно влияют на результат кластеризации. Оптимальные значения этих параметров сложно определить, особенно для многомерных пространств данных. Кроме того, распределение данных в таких пространствах часто несимметрично, что не позволяет использовать для их кластеризации глобальные параметры плотности. Для кластеризации многомерных пространств данных на базе DBSCAN был создан алгоритм SUBCLU [13]. Ключевой проблемой рассмотренных алгоритмов в контексте задачи идентификации спам-рассылок является использование меры близости, основанной на дистанции между объектами, что делает их не применимыми к пространствам со смешанными типами измерений.

## Сетевые методы

Общая идея методов заключается в том, что пространство объектов разбивается на конечное число ячеек, образующих сетевую структуру, в рамках которой выполняются все операции кластеризации. Главное достоинство методов этой группы в малом времени выполнения, которое обычно не зависит от количества объектов данных, а зависит только от количества ячеек в каждом измерении пространства.

Алгоритм CLIQUE [14], адаптированный под кластеризацию данных высокой размерности, является одним из классических сетевых алгоритмов.

Метод основан на том предположении, что если в многомерном пространстве данных распределение объектов не равномерно – встречаются регионы плотности и разрежения, то проекция региона плотности в подпространство с меньшей размерностью будет частью региона плотности в этом подпространстве. Алгоритм CLIQUE производит кластеризацию многомерного пространства данных следующим образом: пространство данных разбивается на не пересекающиеся ячейки фиксированного размера, среди них идентифицируются *плотные* ячейки – такие, плотность объектов данных в которых превышает заданное пороговое значение. Далее из найденных ячеек формируется пространство, в котором могут существовать плотные ячейки большей размерности. Процесс начинается с одномерных пространств (описанная процедура выполняется для каждого измерения) с последующим переходом к подпространствам более высокой размерности.

Этот алгоритм масштабируем для обработки большого количества данных, однако при большом количестве измерений число рассматриваемых комбинаций растёт нелинейно, следовательно, требуется использовать эвристики для сокращения количества рассматриваемых комбинаций. Кроме того, получаемый результат очень сильно зависит от выбора размера ячейки и порогового значения плотности объектов в ячейке. Это является большой проблемой, поскольку одни и те же значения этих параметров используются при рассмотрении всех комбинаций измерений. Эту проблему решает алгоритм MAFIA [15], работающий по схожему принципу, но использующий адаптивный размер ячеек при разбиении подпространств. Однако он применим только для пространств с числовыми измерениями, поскольку в измерениях номинального типа отсутствует отношения порядка между элементами, что не даёт осуществить однозначное разбиение пространства на ячейки.

### **Модельные методы**

Методы этого семейства предполагают, что имеется некоторая математическая модель кластера в пространстве данных и стремятся максимизировать сходство этой модели и имеющихся данных. Часто при этом используется аппарат математической статистики.

Алгоритм EM [16] основан на предположении, что исследуемое множество данных может быть смоделировано с помощью линейной комбинации многомерных нормальных распределений. Его целью является оценка параметров распределения, которые максимизируют функцию правдоподобия, используемую в качестве меры качества модели. Иными словами, предполагается, что данные в каждом кластере подчиняются определенному закону распределения, а именно, нормальному распределению. С учетом этого предположения можно определить оптимальные параметры закона распределения – математическое ожидание и дисперсию, при которых функция правдоподобия максимальна. Таким образом, мы предполагаем, что любой объект принадлежит ко всем кластерам, но с разной вероятностью. Тогда задача будет заключаться в "подгонке" совокупности распределений к данным, а затем в определении вероятностей принадлежности объекта к каждому кластеру. Очевидно, что объект должен быть отнесен к тому кластеру, для которого данная вероятность выше.

Алгоритм EM прост и лёгок в реализации, не чувствителен к изолированным объектам и быстро сходится при удачной инициализации. Однако он требует для инициализации указания количества кластеров  $k$ , что подразумевает наличие априорных знаний о данных. Кроме того, при неудачной инициализации сходимость алгоритма может оказаться медленной или может быть получен некачественный результат.

Очевидно, что подобные алгоритмы не применимы к пространствам с высокой размерностью и смешанными типами измерений, поскольку в этом случае крайне сложно предположить математическую модель распределения данных в этом пространстве.

### *Концептуальная кластеризация*

В отличие от традиционной кластеризации, которая обнаруживает группы схожих объектов на основе меры сходства между ними, концептуальная кластеризация определяет кластеры как группы объектов, относящейся к одному классу или *концепту* – определённому набору пар атрибут-значение.

Алгоритм COBWEB [17] – классический метод инкрементальной концептуальной кластеризации. Он создаёт иерархическую кластеризацию в виде *дерева классификации*: каждый узел этого дерева ссылается на концепт и содержит вероятностное описание этого концепта, которое включает в себя вероятность принадлежности концепта к данному узлу и условные вероятности вида:

$$P(A_i = v_{ij}/C_k),$$

где  $A_i = v_{ij}$  – пара атрибут-значение,  $C_k$  – класс концепта.

Узлы, находящейся на определённом уровне дерева классификации, называют *срезом*. Алгоритм использует для построения дерева классификации эвристическую меру оценки, называемую *полезностью категории* – прирост ожидаемого числа корректных предположений о значениях атрибутов при знании об их принадлежности к определённой категории относительно ожидаемого числа корректных предположений о значениях атрибутов без этого знания. Чтобы встроить новый объект в дерево классификации, алгоритм COBWEB итеративно проходит всё дерево в поисках «лучшего» узла, к которому отнести этот объект. Выбор узла осуществляется на основе помещения объекта в каждый узел и вычисления полезности категории получившегося среза. Также вычисляется полезность категории для случая, когда объект относится к вновь создаваемому узлу. В итоге объект относится к тому узлу, для которого полезность категории больше.

Однако COBWEB имеет ряд ограничений. Во-первых, он предполагает, что распределения вероятностей значений различных атрибутов статистически независимы друг от друга. Однако это предположение не всегда верно, потому как часто между значениями атрибутов существует корреляция. Во-вторых, вероятностное представление кластеров делает очень сложным их обновление, особенно в том случае, когда атрибуты имеют большое число возможных значений. Это вызвано тем, что сложность алгоритма зависит не только от количества атрибутов, но и от количества их возможных значений.



## Алгоритмы на графах

Эти алгоритмы представляют пространство данных в виде неориентированного графа, узлы которого отражают объекты, а рёбра – взаимосвязи между ними, при этом мера сходства объектов вычисляется на основе связей между вершинами графа. Основная сфера их применения – кластеризация пространств с измерениями номинального типа, поскольку в этих пространствах не применимы меры сходства, основанные на дистанции между объектами.

Алгоритм CLICK [18] сводит задачу кластеризации категориального пространства к задаче поиска максимальных  $k$ -дольных клик в  $k$ -дольном графе. Для этого пространство данных преобразуется в неориентированный  $k$ -дольный граф, в котором каждое возможное значение каждого атрибута представлено вершиной, а присутствие значений атрибутов в одном объекте – рёбрами. Алгоритм масштабируем для пространств с большим количеством измерений и для обработки большого количества объектов. Очевидно, что он применим только для пространств, в которых отсутствуют числовые измерения. В противном случае потребуется приведение числовых измерений к номинальному типу, что может привести к потере качества кластеризации или чрезмерно большой размерности пространства данных.

## Заключение

Из проведённого обзора видно, что кластеризация многомерного пространства данных со смешанными типами измерений и большим количеством объектов при абсолютном отсутствии априорных знаний о данных – задача сложная и нетривиальная. На сегодняшний день существует немного алгоритмов, способных решить эту задачу. Из рассмотренных в обзоре алгоритмов к таковым можно отнести только расширенный алгоритм O-Cluster.

Поскольку это направление исследований в области кластерного анализа только развивается, есть необходимость в проведении дополнительных исследований, направленных на разработку решающих поставленную задачу алгоритмов с учётом накопленного по этой проблематике опыта.

## ЛИТЕРАТУРА

1. MacQueen, J. Some methods for classification and analysis of multivariate observations/ J. MacQueen // In Proc. 5th Berkeley Symp. On Math. Statistics and Probability, 1967. -С.281-297.
2. Kaufman, L. Clustering by means of Medoids, in Statistical Data Analysis Based on the  $l$ -Norm and Related Methods / L. Kaufman, P.J. Rousseeuw, Y. Dodge, 1987. -С.405-416.
3. Steinbach, M. The Challenges of Clustering High Dimensional Data / M. Steinbach, L. Ertöz, V. Kumar, 2003. -С.11-14.
4. Hinneburg, A. What Is the Nearest Neighbor in High Dimensional Spaces? / A. Hinneburg, C.C. Aggarwal, D.A. Keim // In Proc. 26th Int. Conf. on Very Large Data Bases (VLDB'00), 2000. -С.506-515.
5. Huang, Z. A Fast Clustering Algorithm to Cluster Very Large Categorical Data Sets in Data Mining / Z. Huang // Research Issues on Data Mining and Knowledge Discovery, 1997. -8 с.

6. Huang, Z. Clustering Large Data Sets with Mixed Numeric and Categorical Values / Z. Huang // In Proc. First Pacific-Asia Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, 1997. -14 c.
7. Ng, R.T. Efficient and Effective Clustering Methods for Spatial Data Mining / R.T. Ng, J. Han // Proc. 20th Int. Conf. on Very Large Data Bases. Morgan Kaufmann Publishers, San Francisco, CA, 1994. -C.144-155.
8. Aggarwal, C.C. Fast Algorithms for Projected Clustering / C.C. Aggarwal, C. Procopiuc // In Proc. ACM SIGMOD Int. Conf. on Management of Data, Philadelphia, PA, 1999. -12 c.
9. Guha, S. Rock: A Robust Clustering Algorithm for Categorical Attributes / S. Guha, R. Rastogi, K. Shim // In Proc. IEEE Int. Conf. on Data Engineering, 1999. -C.512-521.
10. Milenova, B.L. O-Cluster: Scalable Clustering of Large High Dimensional Data Sets / B.L. Milenova, M.M. Campos // In Proc. 2002 IEEE Int. Conf. on Data Mining (ICDM'02), 2002. -C.290-297.
11. Milenova, B.L. Clustering Large Databases with Numeric and Nominal Values Using Orthogonal Projections / B.L. Milenova, M.M. Campos // International conference on Information Fusion, 2005. -10 c.
12. Ester, M. A Density-Based Algorithm for Discovering Clusters in Large Spatial Databases with Noise / M. Ester, H.-P. Kriegel, J. Sander, X. Xu // In Proc. ACM SIGMOD Int. Conf. on Management of Data, Portland, OR, 1996. -pp.226-231.
13. Kailing, K. Density-Connected Subspace Clustering for High-Dimensional Data / K. Kailing, H.P. Kriegel, P. Kröger // In Proceedings of the 4th SIAM International Conference on Data Mining (SDM), 2004. -C.246-257.
14. Agrawal, R. Automatic Subspace Clustering of High Dimensional Data for Data Mining Applications / R. Agrawal, J. Gehrke, D. Gunopulos, P. Raghavan // In Proc. ACM SIGMOD Int. Conf. on Management of Data, Seattle, Washington, 1998. -C.94-105.
15. Nagesh, H. MAFIA: Efficient and Scalable Subspace Clustering for Very Large Data Sets / H. Nagesh, S. Goil, A. Choudhary // Technical Report Number CPDC-TR-9906-019, Center for Parallel and Distributed Computing, Northwestern University, 1999. -20 c.
16. Demster, A. Maximum Likelihood from Incomplete Data via the EM Algorithm /A.P. Demster, N.M. Laird, D.B. Rubin //Journal of the Royal Statistical Society, Series B, Vol. 39, No. 1, 1977. -C.1-38.
17. Fisher, D.H. Knowledge acquisition via incremental conceptual clustering / D.H. Fisher // Machine Learning 2, 1987. -C.139-172.
18. Peters, M. Click: Clustering Categorical Data using K-partite Maximal Cliques / M. Peters, M.J. Zaki // Computer Science Department Rensselaer Polytechnic Institute Troy NY 12180, 2004. -31 c.

#### **Сведения об авторах**

*Ковалёв Сергей Сергеевич* – стажер-исследователь, e-mail: [srg.kvly@gmail.com](mailto:srg.kvly@gmail.com)  
*Sergey S. Kovalev* - post-graduate

*Шушаев Максим Геннадьевич* - д.т.н., заведующей лабораторией,  
e-mail: [shishaev@iimm.kolasc.net.ru](mailto:shishaev@iimm.kolasc.net.ru)  
*Maxim G. Shishaev* – Dr. of Sci (Tech), head of laboratory

УДК 004.7

**М.Г. Шишаев, А.В. Трефилов**

Институт информатики и математического моделирования Кольского НЦ РАН,  
Кольский филиал ПетрГУ

## **ОРГАНИЗАЦИЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ КОММУНИКАЦИОННОЙ СЕТИ НА БАЗЕ МОБИЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ С МНОГОКОМПОНЕНТНОЙ МЕТРИКОЙ МАРШРУТОВ\***

### **Аннотация**

В статье рассмотрен метод организации динамической коммуникационной сети на базе мобильных устройств, основанный на использовании многокомпонентной вероятностной метрики маршрутов. Рассмотрена проблематика маршрутизации потоков данных в динамических сетях, а также технология организации динамической сети с квазислучайными перемещениями узлов.

### **Ключевые слова:**

*динамическая сеть, мобильный узел, вероятностная многокомпонентная метрика.*

**M.G. Shishaev, A.V. Trefilov**

## **THE ORGANIZATION OF AN AD-HOC NETWORK ON THE BASIS OF MOBILE DEVICES WITH THE MULTICOMPONENT METRICS OF ROUTES**

### **Abstract**

The method of the organization of an ad-hoc network on the basis of the mobile devices is considered. The method is based on use of a multicomponent probabilistic metrics of routes. Problems of routing in dynamic networks, and also technology of the organization of a dynamic network with quasicasual movings of nodes are considered.

### **Keywords:**

*d-hoc network, mobile node, probabilistic multicomponent metrics.*

### **Введение**

Динамические коммуникационные сети на базе мобильных устройств (ad-hoc сети) [1, 2] являются перспективной современной технологией телекоммуникаций. Одним из преимуществ подобных сетей является возможность эффективно использовать незадействованный телекоммуникационный ресурс множества мобильных устройств, находящихся в распоряжении современных пользователей. Этот ресурс обеспечивается технологиями радиопередачи малого радиуса действия, реализующими для большей части устройств факультативные функции, неиспользуемые большую часть времени. Организация сети, работающей по принципу «возьми и передай дальше», на базе таких технологий с учетом современного уровня распространенности мобильных информационно-вычислительных устройств позволяет аккумулировать весьма существенный коммуникационный ресурс. В этом отношении динамические коммуникационные сети относятся к специфической категории одноранговых информационных систем

---

\* Работа выполнена в рамках проекта № 2.8 программы фундаментальных исследований ОНИТ РАН «Интеллектуальные информационные технологии, системный анализ и автоматизация».

и, кроме возможности интеграции распределенного информационно-коммуникационного ресурса, обеспечивают присущие одноранговым системам высочайшую отказоустойчивость, огромный потенциал масштабирования и наращивания мощности.

Вторым принципиальным преимуществом динамических коммуникационных сетей на базе мобильных устройств является то, что подобные сети позволяют решать задачи оперативного развертывания телекоммуникационных сетей на вновь осваиваемых территориях, не имеющих развитой коммуникационной инфраструктуры. В настоящее время уже существуют действующие приложения рассматриваемой технологии в области военных телекоммуникаций, а также приложения, позволяющие создавать подобные сети вдоль автомобильных магистралей [3, 4]. Однако эти приложения накладывают существенные ограничения на размер сети, плотность «заселения» территории узлами сети и возможные маршруты перемещения мобильных узлов.

В данной статье рассматриваются основы технологии организации динамической коммуникационной сети на базе мобильных узлов, использующей маршрутизацию по вектору расстояния и двухкомпонентную метрику маршрутов, отражающую вероятность активности маршрута в различные временные интервалы (периоды суток).

### **Проблема маршрутизации потоков данных в динамических сетях**

Главной проблемой организации динамических сетей на базе мобильных устройств является маршрутизация потоков данных в условиях нестационарной структуры сети. В чистом виде, динамические сети не располагают какими-либо аналогами постоянно доступных и стационарных в пространстве базовых станций или узлов коммутации. Узлы сети, построенной на базе мобильных устройств, могут подключаться и отключаться от сети в случайные моменты времени, плюс к этому – свободно перемещаться в пространстве. Поэтому доступность некоторого узла в некоторый момент времени не может быть гарантирована.

Один из распространенных подходов к решению данной проблемы (используемый, по-видимому, в практических реализациях динамических сетей, упомянутых выше) заключается в постоянном мониторинге текущей структуры сети с помощью широковещательных сообщений. Однако широковещательные запросы потребляют коммуникационный ресурс и, при значительном количестве сетевых узлов, могут приводить к существенному снижению или полной утрате работоспособности сети.

Альтернативой широковещанию является передача блоков данных, формирующих информационный поток, в направлении наиболее вероятного местонахождения адресата. При таком подходе возможен компромисс между широковещательной рассылкой и полностью детерминированной маршрутизацией, потенциально обеспечивающий оптимальный уровень эффективности сети (в смысле скорости и надежности доставки данных) при имеющейся плотности узлов и степени их нестационарности. Компромисс заключается в рассылке идентичных блоков данных не всем имеющимся в зоне доступа узлам, а лишь нескольким из них, наиболее вероятно способным доставить блок данных адресату. Увеличивая количество промежуточных узлов-получателей блока данных, мы приближаем свойства динамической сети к сети с широковещательной рассылкой, а уменьшая

его – к детерминированной сети со стационарной структурой. Регулируя это количество в соответствии с имеющимся уровнем нестационарности сетевой инфраструктуры, мы получаем возможность достигать оптимума эффективности сети при имеющихся условиях.

Ключевым вопросом реализации такого подхода к маршрутизации потоков данных в сети является определение наиболее вероятного местоположения узла адресата (маршрута, с наибольшей вероятностью актуального в данный момент времени). В работе [5] ранее был предложен подход к организации динамической сети на базе мобильных устройств с вероятностной метрикой маршрутов, рассчитываемой на базе частоты встречаемости узлов. В качестве механизма маршрутизации в работе предлагался известный алгоритм Беллмана-Форда [6]. Для определения метрики прямого маршрута между парой узлов каждый из них периодически осуществлял опрос находящихся в его зоне действия соседей. Отношение количества положительных откликов к общему количеству опросов за некоторый период времени рассматривалось в качестве вероятности взаимной «встречи» пары мобильных узлов. Таким образом, предполагается равномерное распределение данных вероятностей на протяжении периода опроса. Однако в ряде практических случаев вероятность попарных встреч узлов мобильной сети будет существенно зависеть от времени, например – периода суток. Учет этого факта позволит значительно повысить эффективность работы динамической сети на базе мобильных устройств.

### **Организация динамической самоорганизующейся сети с квазислучайными перемещениями узлов**

Под средой с квазислучайными перемещениями мобильных узлов в данном случае понимается коммуникационная среда, в которой узлы перемещаются случайным образом, однако каждый узел имеет некоторый набор множеств доминирующих маршрутов для различных временных периодов. Примером среды подобного сорта является городской социум, где маршруты перемещения людей (и, соответственно, принадлежащих им мобильных коммуникационных устройств) в различное время суток обусловлены графиками труда и отдыха, личными предпочтениями, особенностями коммуникационной инфраструктуры города, и иными факторами.

Очевидно, что для динамической сети, функционирующей в такой среде, вероятности доступности тех или иных узлов и вероятности актуальности соответствующих маршрутов будут зависеть от времени. Установить эту зависимость в аналитическом виде не представляется возможным, однако вполне реализуемым шагом является разбиение временной оси на периоды с характерными величинами вероятностей попарной доступности узлов. Это возможно сделать, если располагать некоторой выборкой априорных наблюдений, которые затем подвергнуть кластеризации. Рассмотрим далее основные принципы организации динамической самоорганизующейся сети, использующей такой подход к определению вероятностной метрики маршрутов.

Будем предполагать, что маршрутизация осуществляется по вектору расстояний (алгоритм Беллмана-Форда). В соответствии с данным алгоритмом, выделяются два основных процесса, обеспечивающих работоспособность сети:

- измерение «расстояний» до соседей, как правило, совмещенное с обменом между узлами их векторами расстояний;
- перерасчет узлом собственного вектора расстояний с учетом имеющихся результатов измерений дистанции до соседей и содержимого полученных от них векторов.

Для случая динамической сети еще одной важной задачей является обеспечение механизмов входа и выхода узла из сети. Поскольку рассматриваемый тип сетей характеризуется непредсказуемостью структуры, вход/выход узла из сети является тривиальной задачей, заключающейся в генерации уникального идентификатора узла и первичного обмена маршрутными таблицами (векторами расстояний) с узлами, находящимися в зоне доступа первого. Также следствием изменчивости внутренней структуры сети является невозможность практической реализации каких-либо механизмов коммуникаций, ориентированных на соединение. Поэтому в сети предполагается дейтаграммный режим пакетной коммутации, когда блоки данных протокола отправляются получателю без его предварительного уведомления и без предварительной прокладки маршрута и резервирования сетевых ресурсов.

Сеть представляет собой некоторое множество узлов:

$$A = \{a^i\}, \quad i = 1, \dots, N_t,$$

где  $N_t$  - количество узлов сети в момент времени  $t$ .

Расчет метрики маршрутов осуществляется на основании результатов постоянных наблюдений узлов за состоянием сети. С этой целью каждый узел  $a^k$  периодически (с частотой  $F$ ) рассылает широковещательные запросы *HEARTBEAT*, в ответ на которые узлы, находящиеся в зоне доступа источника запроса, возвращают собственные текущие вектора расстояний. Последние используются узлом  $a^k$  для пересчета собственного вектора расстояний. В случае наличия отклика со стороны узла  $a^l$ , узел  $a^k$  инкрементирует счетчик  $n^{kl}$ . С целью учета фактора локализации во времени коммуникаций между отдельно взятыми парами узлов, используются отдельные счетчики для разных временных интервалов в течение используемого периода.

Временные интервалы определяются следующим образом. Исходный временной период  $T$  разбивается на микроинтервалы длительностью  $\tau$  и для каждого из них рассчитывается вероятность коммуникации узла  $a^k$  с прочими известными узлами (вероятность межузловой доступности) как скользящее среднее за  $N$  периодов наблюдений:

$$P_j^{kl} = \frac{n_j^{kl}}{N \cdot \tau / T},$$

где  $n_j^{kl}$  - количество успешных коммуникаций узлов  $a^k$  и  $a^l$  в  $j$ -м микроинтервале в течение  $N$  последних периодов наблюдений.

Далее микроинтервалы подвергаются кластеризации, с помощью какого-либо из известных алгоритмов [7], с целью сокращения объемов маршрутных таблиц и передаваемых по сети векторов расстояний (рис. 1). При этом в качестве метрики схожести микроинтервалов используется разница между соответствующими вероятностями межузловой доступности.

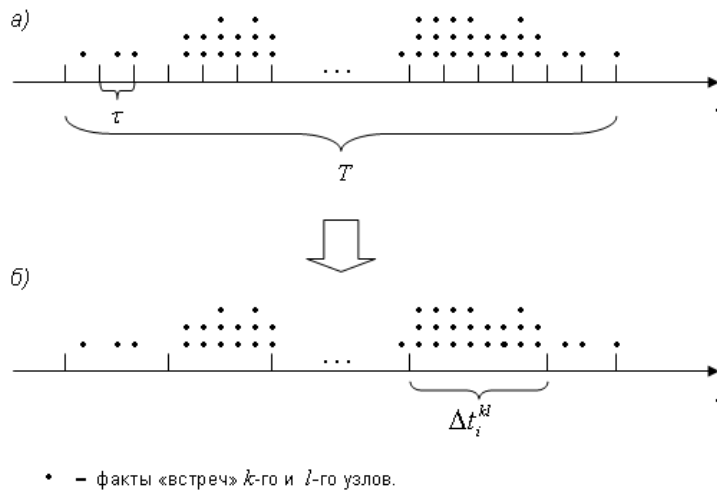


Рис. 1. Результаты мониторинга состояния сети узлами  $a^k$  и  $a^l$  (а); результат кластеризации временных интервалов по вероятности соответствующих междузловых коммуникаций (б)

В результате, метрика маршрута между узлами  $a^k$  и  $a^l$  ( $R^{kl}$ ) представляет собой множество троек вида:

$$r_i^{kl} = (p_i^{kl}, t_i^{kl1}, t_i^{kl2}), \quad i = 1, \dots, K^{kl},$$

где  $K^{kl}$  - количество временных интервалов (кластеров), используемых  $k$ -м узлом при оценке маршрута до узла  $a^l$ .

$t_i^{kl1}, t_i^{kl2} \in [0, 24], t_i^{kl1} < t_i^{kl2}$  - границы временного интервала в пределах суток (возможно также использование и иной периодизации времени, отличной от суточной),

где  $p_i^{kl}$  - вероятность нахождения узла  $a^l$  в зоне доступа узла  $a^k$  в  $i$ -м временном интервале.

Назовем полученную совокупность временных интервалов

$$\Delta t_i^{kl} = [t_i^{kl1}, t_i^{kl2}], \quad i = 1, \dots, K^{kl}, \quad \bigcup_i \Delta t_i = T \quad l\text{-разбиением узла } a^k.$$

Расчет вектор расстояний узла  $a^k$  производится для каждого интервала, входящего в его разбиение. Очевидно, что при используемом подходе разбиения разных узлов будут различаться, что существенно усложняет задачу расчета значений компонентов вектора расстояний узла.

При расчете метрики маршрута от узла  $a^k$  до любого другого узла  $a^m$  через узел  $a^l$  формируется проекция  $m$ -разбиения узла  $a^l$  на  $l$ -разбиение узла  $a^k$

(рис. 2) таким образом, что  $\Delta t_i^{kl} = \bigcup_{\Delta t_j^{klm} \in \Theta_i^{klm}} \Delta t_j^{klm}$ ,

где  $\Theta_i^{klm}$  - множество интервалов  $m$ -разбиения узла  $a^l$ , удовлетворяющих условию:

$$\Delta t_j^{klm} \in \Theta_i^{klm}, t_j^{klm1} < t_i^{kl2} \wedge t_j^{klm2} > t_i^{kl1}, \text{ и}$$

$$t_j^{klm1} = \begin{cases} t_j^{lm1}, t_j^{lm1} \geq t_i^{kl1} \\ t_i^{kl1}, t_j^{lm1} < t_i^{kl1} \end{cases},$$

$$t_j^{klm2} = \begin{cases} t_j^{lm2}, t_j^{lm2} \leq t_i^{kl2} \\ t_i^{kl2}, t_j^{lm2} > t_i^{kl2} \end{cases}.$$

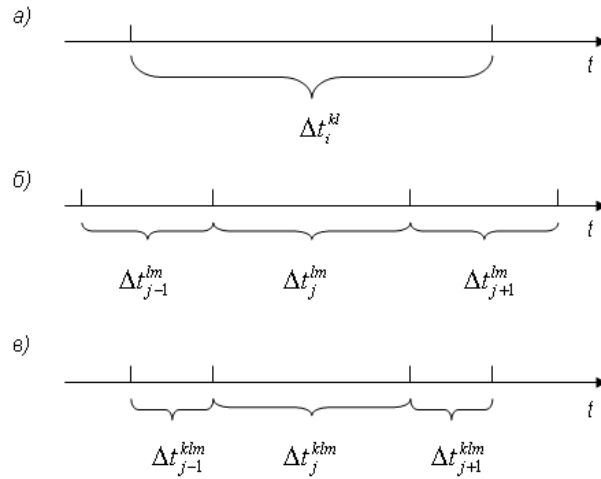


Рис. 2. Проекция (в)  $m$ -разбиения узла  $a^l$  (б) на  $l$ -разбиение узла  $a^k$  (а)

Метрика дистанции от узла  $a^k$  до узла  $a^m$  через узел  $a^l$  в момент времени  $t \in \Delta t_i^{kl}$ , в предположении равномерного распределения вероятности междуузловой доступности на интервалах разбиений узлов, рассчитывается следующим образом:

$$D_i^l(n_k, n_m) = p_i^{kl} \times \sum_{\Delta t_j^{klm} \in \Theta_i^{klm}} p_j^{lm} \cdot \frac{|\Delta t_j^{klm}|}{|\Delta t_i^{kl}|},$$

где  $|\Delta t|$  - размер интервала  $\Delta t$ .

Формирование маршрутной таблицы узла (суть, выбор маршрута) осуществляется далее в соответствии с алгоритмом маршрутизации на базе вектора расстояний (Беллмана-Форда).

### Заключение

Количество мобильных информационно-коммуникационных устройств, находящихся в распоряжении пользователей, растет огромными темпами. При этом неуклонно возрастают вычислительные и коммуникационные возможности этих устройств. Суммарный объем вычислительных и коммуникационных ресурсов мобильных телефонов, коммуникаторов, карманных и планшетных компьютеров с трудом поддается оценке и измеряется числами высокого порядка. Все это делает весьма привлекательными перспективы объединения подобных устройств в самоорганизующиеся одноранговые информационно-коммуникационные системы.



Рассмотренный в данной работе подход к организации динамической коммуникационной сети на базе мобильных устройств, основанный на многокомпонентной метрике маршрутов, позволяет создавать высокоэффективные коммуникационные системы на базе распределенных коммуникационных ресурсов. Использование многокомпонентной метрики маршрутов, учитывающей вероятность нахождения узлов в зоне доступа друг друга в разное время суток позволяет учесть тот факт, что наиболее вероятные местонахождения мобильных узлов в реальной ситуации зависят от времени суток: в рабочее время – места работы владельца мобильного устройства, в вечернее и ночное время – места его жительства и т. п.

Дальнейшим направлением исследований в данной области представляется исследование эффективности предложенных механизмов организации динамической сети в различных условиях. Эти условия определяются плотностью узлов, степенью их мобильности и степенью стационарности их типовых маршрутов, а также другими факторами.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ляхов, А.И. Многоканальные mesh-сети: анализ подходов и оценка производительности / А.И. Ляхов, И.А. Пустогаров, С.А. Шпилев // Информационные процессы. - 2008. – Т.8, № 3. – С.173–192.
2. Шишаев, М.Г. Современные технологии сетей типа ad-hoc и возможные подходы к организации одноранговых телекоммуникационных сетей на базе мобильных устройств малого радиуса действия / М.Г. Шишаев, С.А. Потаман // Труды Кольского научного центра РАН. Информационные технологии. - Апатиты, 2010. – Вып. 1. – С.70-74
3. The Theory of Vehicular Ad-Hoc Network. TechViewz.Org. 2008-02-12. - Режим доступа: <http://techviewz.org/2008/02/theory-of-vehicular-ad-hoc-network.html>.
4. Arunkumar Thangavelu, Sivanandam S.N (February 2007). Location Identification and Vehicular Tracking for Vehicular Ad-Hoc Wireless Networks. IEEE Explorer 1 (2). –pp.112–116.
5. Шишаев, М.Г. Моделирование динамической самоорганизующейся мобильной сети с метрикой на базе частоты встречаемости узлов / М.Г. Шишаев, М.Л. Куимов // Труды Кольского научного центра РАН. Информационные технологии. – Апатиты: Изд-во КНЦ РАН. -4/2011(7). – Вып. 2. – С.90-99.
6. Форд, Л. Потоки в сетях / Л. Форд, Д. Фулкерсон. -М.: Мир, 1966. -276 с.
7. Berkhin, P. A Survey of Clustering Data Mining Techniques /P. Berkhin // Grouping Multidimensional Data (2006). - pp.25-71.

#### Сведения об авторах

*Шишаев Максим Геннадьевич* – д.т.н., заведующий лабораторией,

e-mail:[shishaev@iimm.kolasc.net.ru](mailto:shishaev@iimm.kolasc.net.ru)

*Maksim G. Shishaev* - Dr. of Sci (Tech), head of laboratory

*Трефилов Александр Валерьевич* - аспирант

*Alexander Trefilov* - post-graduate

УДК 004.7, 004.45

М. Г. Шишаев<sup>1</sup>, С.Ю.Елисеенко<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт информатики и математического моделирования Кольского НЦ РАН,

<sup>2</sup> Кольский филиал ПетрГУ

## ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ОБЪЕКТОВ С КВАЗИСЛУЧАЙНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ МАРШРУТОВ\*

### Аннотация

В статье рассмотрена проблематика моделирования квазислучайных перемещений объектов в пределах транспортных сетей. Представлен краткий обзор существующих подходов к моделированию транспортных потоков, предложена агентная имитационная модель пространственных перемещений объектов с квазислучайными параметрами маршрутов.

### Ключевые слова:

*трафик, моделирование, квазислучайный маршрут.*

M.G. Shishaev, S.Y. Eliseenko

## SIMULATION MODEL OF SPATIAL OBJECT MOVEMENTS WITH QUASI-RANDOM ROUTES

### Abstract

The article describes the problems of modeling of quasi-random movements of objects within the transport network. A brief review of existing approaches to modeling traffic flows, proposed Agent-based simulation model of spatial object movements with quasi-random routes is proposed.

### Keywords:

*traffic, modeling, quasi-random route.*

### Введение

Имитационное моделирование является эффективным средством исследования сложных систем, параметры которых изменчивы во времени. К подобному типу относятся системы, компоненты которых являются перемещающимися в пространстве объектами. В данной работе рассмотрены ограниченные системы, где существенным аспектом поведения объектов является лишь их перемещение в пространстве (иные аспекты поведения не рассматриваются). При этом каждый объект имеет собственные целевые установки, обуславливающие его действия. Будучи относительно независимыми в своем поведении, эти объекты, вместе с тем, непосредственно или косвенно взаимодействуют друг с другом, что и обуславливает необходимость изучения их в комплексе, как единой системы. Взаимодействие множества объектов в пределах некоторого ограниченного пространства (на плоскости – территории) выражается в ограничениях на их возможное поведение: объекты не могут одновременно находиться в одной точке, что обуславливает, в купе с целью объекта, ограничения на скорость и траектории его перемещений. Для

---

\* Работа выполнена в рамках проекта № 2.8 программы фундаментальных исследований ОНИТ РАН «Интеллектуальные информационные технологии, системный анализ и автоматизация».

моделирования систем, каждый компонент которых изначально независим в своем поведении и равноправен с прочими, но существует и развивается в ограничениях, обусловленных существованием прочих аналогичных компонентов, используется специфический тип имитационных моделей – агентные модели [1-4].

В контексте обозначенных особенностей рассматриваемых систем, цель объекта заключается в достижении некоторой точки пространства в заданный момент времени (чаще всего подразумевается наискорейшее достижение этой точки). Если считать пространство однородным в смысле влияния на возможное поведение объектов (параметры их перемещений), то оптимальными траекториями перемещения будут отрезки прямых, соединяющие точку текущего местоположения объекта с целевой точкой. При этом в предположении, что целевая точка каждого перемещающегося объекта является случайной величиной, случайными будут и существующие в каждый момент времени маршруты перемещений объектов и их текущее положение в пространстве.

Однако в реальных системах с перемещающимися в пространстве объектами часто существуют ограничения на их допустимые траектории. Наиболее очевидным примером систем подобного сорта является городской трафик, где возможные траектории перемещения объектов (людей, автомобилей или иных транспортных средств) обусловлены имеющейся инфраструктурой дорог соответствующего типа. При этом следует отметить, что в отношении объектов городского трафика существует некоторое множество доминирующих маршрутов. Поэтому конечная точка маршрута будет случайной величиной с нормальным распределением, где для каждого объекта математическое ожидание является функцией от времени выбора маршрута («утром – на работу, вечером – с работы»).

Наиболее распространенной областью использования имитационных моделей пространственных перемещений объектов являются модели городского трафика. В этих моделях, как правило, рассматривается автомобильный трафик, и целью моделирования является изучение негативных явлений на городских автодорогах – пробок, пониженной скорости движения – с целью их предотвращения.

Еще одной важной областью применения моделей пространственных перемещений объектов с квазислучайными маршрутами является изучение эффективности динамических коммуникационных сетей, базирующихся на мобильных узлах – так называемых MANET [5]. Эффекты тяготения трафика различных узлов к некоторому ограниченному количеству «типовых» маршрутов существенно влияют на потенциальную производительность сети. Поэтому важной задачей является изучение эффективности динамической мобильной сети при разной плотности узлов, различном уровне случайности маршрутов, и иных внешних условиях.

Далее в данной работе рассмотрен краткий обзор существующих подходов к имитационному моделированию городского трафика, а также пример имитационной модели трафика, ориентированной на исследование динамических коммуникационных сетей на базе мобильных узлов.

## Существующие подходы к имитационному моделированию трафика

Проблема моделирования трафика является объектом внимания исследователей, начиная с середины прошлого столетия. На сегодняшний день сформировалось несколько альтернативных подходов к изучению процессов движения объектов по дорожным сетям с помощью моделей. С точки зрения масштаба рассмотрения этих процессов (моделирование транспортного потока в целом или моделирование динамики отдельных транспортных средств) выделяются, по крайней мере, две группы подходов – модели макро- и микро-уровня.

Первая категория образована в основном гидродинамическими моделями трафика, рассматривающими транспортный поток как поток «мотивированной» сжимаемой жидкости [6, 7, 8]. Основное предназначение данных моделей – исследование условий возникновения заторов в транспортной сети и расчет режимов управления транспортными потоками, минимизирующих подобные явления. Вместе с тем, существенная часть исследований ориентирована на изучение транспортного потока на отдельном прямолинейном участке транспортной сети, что исключает возможность учета наиболее важных источников заторов – перекрестков, съездов с магистралей и т. п.

Модели микро-уровня детализируют поток до отдельного транспортного средства (ТС). Законы движения ТС при этом регламентируются чаще всего стремлением обеспечения некоторой безопасной дистанции до прочих участников движения. Наиболее известными моделями данного класса являются модели оптимальной скорости, модель следования за лидером, а также предложенная относительно недавно модель «разумного водителя». В моделях оптимальной скорости математическое описание поведения потока основано на постулате о существовании некоторой безопасной скорости движения ТС, зависящей от дистанции до «лидера» (впереди идущего ТС) [9]. Основой для моделей следования за лидером является прямо пропорциональная зависимость ускорения ТС от разности его скорости и скорости лидера [10]. Модель разумного водителя (Intelligent Driver Model) объединяет модели оптимальной скорости и следования за лидером. Наиболее удачным примером модели данного типа принято считать модель М. Трайбера [11], описывающую динамику ускорения ТС на свободной дороге одновременно с торможением из-за взаимодействия с лидером.

В отдельную группу моделей микро-уровня можно выделить модели транспортных потоков, основанные на имитационном подходе [12]. Среди подобных моделей наиболее распространены модели на базе клеточных автоматов [12]. В моделях клеточных автоматов дорога разбивается на клетки, как правило, предполагается, что одна клетка может быть занята лишь одним ТС. Далее осуществляется пошаговое моделирование движения транспортных средств, заключающееся в перерасчете положения транспортных средств в соответствии с правилами, определяющими процессы разгона и торможения, равномерного движения, а также случайные возмущения [14, 15].

Еще одну категорию образуют стохастические модели транспортных потоков, в которых динамика транспортных средств представляется некоторым случайным процессом в пространстве или во времени [12, 16]. Подобные модели рассматривают транспортный поток, в наиболее обобщенном виде учитывая лишь общие «тренды» его динамики и оставляя вне поля зрения кратко-временные флуктуации.

### **Модель перемещений объектов с квазислучайными маршрутами**

Рассматриваемая модель относится к классу агентных имитационных моделей: основные ее компоненты – движущиеся объекты – автономны, обладают некоторой целью, и взаимодействуют друг с другом опосредованно, через дорожную сеть. Модель ориентирована на изучение эффективности динамических мобильных коммуникационных сетей в различных условиях. Вопрос, на который должна дать ответ имитационная модель – эффективность одноранговой динамической сети при различных условиях. Под условиями понимаем: различный уровень детерминированности маршрутов перемещения мобильных узлов, количество и плотность узлов на территории развертывания сети, и др. Показателем эффективности работы сети является доля успешно доставленных блоков данных (при заданном времени жизни блока).

В контексте данной задачи нам, с одной стороны, необходим уровень детализации «до отдельного узла», а с другой – не требуется слишком высокая точность моделирования: необходимо лишь индицировать факт нахождения узлов сети в зоне действия друг друга в некоторый момент времени. В то же время, «географический» масштаб модели должен соответствовать площади развертывания динамической коммуникационной сети. В данной работе подразумевается развертывание сети на территории населенного пункта небольшого или среднего размера. Масштаб сети накладывает серьезные ограничения на уровень вычислительной сложности модели. Так, например, моделирование на базе клеточных автоматов сопряжено с очень большой вычислительной сложностью уже для случая относительно простой дорожной сети с несколькими перекрестками и двумя-тремя сотнями одновременно активных узлов. Поэтому в предлагаемой модели сделаны очень серьезные допущения, упрощающие моделирование сложных компонентов дорожной сети (прежде всего - перекрестков). Вместе с тем модель обеспечивает имитацию процессов городского трафика с достаточной для поставленной задачи точностью.

Важным начальным требованием, выдвигаемым к рассматриваемой модели, являлась также необходимость рассмотрения маршрута движения узла как обособленного объекта с целью моделирования случайных процессов выбора маршрута и эффектов доминирования определенных маршрутов для отдельно взятого узла. Для обеспечения данного требования модель разделена на два относительно обособленных компонента – блок генерации квазислучайных маршрутов и блок имитации. Функцией первого компонента является априорная генерация некоторого множества объектов, связанных с ними маршрутов и графика их активации. Данный компонент обеспечивает имитацию процессов генерации транспортных потоков в соответствии с некоторыми поведенческими закономерностями объектов движения. Второй блок модели – компонент имитации обеспечивает моделирование непосредственно пространственных перемещений объектов в пределах некоторой транспортной сети в соответствии со сгенерированными на первом этапе моделирования маршрутами.

Компонент имитации включает три основных элемента:

- 1) перемещающийся объект (или просто «объект»);
- 2) маршрут;
- 3) отрезок маршрута.

Под объектом подразумевается любая сущность, не обладающая геометрическими размерами и массой (материальная точка). Каждый объект имеет уникальный идентификатор и характеризуется маршрутом, временем, скоростью и текущими координатами. Кроме того, в модели используется специфическое состояние объекта, характеризующее нулевой скоростью и неопределенным маршрутом. Данное состояние соответствует объектам, находящимся в состоянии покоя (с точностью, определяемой целью моделирования; для случая моделирования коммуникационных сетей на базе мобильных устройств – с точностью до радиуса действия приемопередающей аппаратуры).

Маршрут представляет собой ломаную линию, состоящую из отрезков. Отрезком является часть маршрута, на протяжении которой не меняется направление движения. Каждый отрезок имеет начальную точку, конечную точку, идентификатор и ширину. Кроме того, для каждого отрезка задается максимально допустимая скорость движения. Еще одним атрибутом отрезка является «конфигурация» – последовательность движущихся по нему в данный момент объектов с указанием координат последних относительно границ отрезка. Ширина – это максимально допустимое количество объектов, находящихся в одной точке маршрута. Отрезок, таким образом, соответствует некоторому однонаправленному прямолинейному участку дорожной сети, ограниченному тупиками, поворотами или перекрестками. Маршрут объекта есть последовательность отрезков. Представление маршрута в виде последовательности отрезков (а не в виде цельной ломаной линии) позволяет в имеющемся простом формализме рассматривать наиболее сложные компоненты дорожной сети – перекрестки.

Каждый маршрут имеет направление, определяемое путем сравнения начальных и конечных координат отрезка. В нашем случае маршруты с разносторонним движением не используются: если некоторый участок дорожной сети допускает двунаправленное движение, то для каждого направления создается отдельный маршрут.

Поскольку маршруты разных объектов могут иметь общие элементы (отрезки) на некоторых шагах моделирования могут возникать коллизии. В модели рассматриваются два вида коллизий:

- 1) обгон;
- 2) перекресток.

Перекресток представляет собой сопряжение нескольких отрезков. При этом в зависимости от направления «от» или «к» перекрестку, отрезки делятся на две категории – исходящие от перекрестка и входящие в перекресток, соответственно (рис. 1). Очевидно, что в случае пересечения  $N$  дорог количество сходящихся на перекрестке отрезков будет лежать в диапазоне от  $N$  до  $2N$ , в зависимости от того одно- или двунаправленное движение у той или иной дороги.

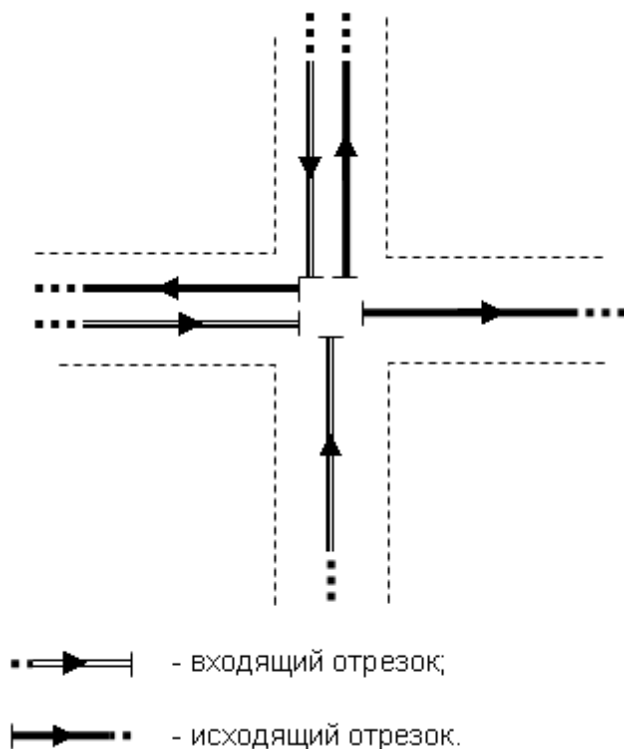


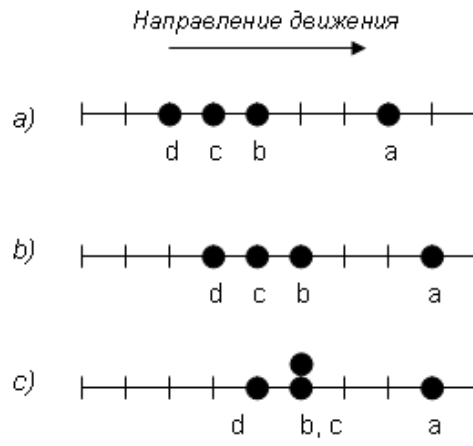
Рис. 1. Обобщенная схема перекрестка

При возникновении коллизии типа «обгон» один объект, имеющий большую скорость, либо обгоняет другого (если это позволяет ширина соответствующего отрезка маршрута), либо снижает скорость и следует за вторым.

Общий алгоритм работы модели заключается в последовательном (на каждом модельном шаге) перерасчете конфигураций образующих модель отрезков. При этом для сокращения вероятности появления «искусственных» заторов, вызванных последовательным характером перерасчета координат движущихся объектов, перерасчет конфигураций осуществляется в следующем порядке:

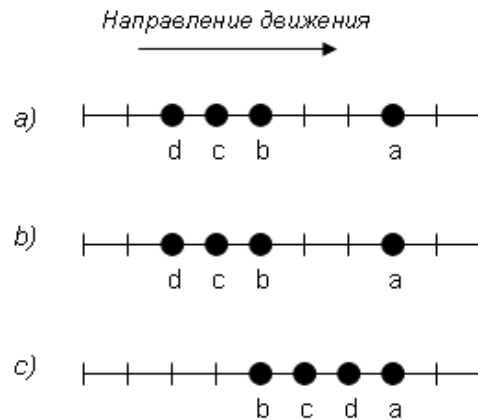
- 1) отрезки, исходящие от перекрестков;
- 2) отрезки, входящие в перекрестки;
- 3) прочие отрезки.

Перерасчет конфигурации отрезка заключается в определении координат объектов, находящихся в пределах отрезка, исходя из их текущего положения, скорости и положения прочих объектов. Перерасчет координат осуществляется последовательно, начиная от объекта, ближайшего к конечной точке отрезка. На рисунках 2а, 2б представлены примеры изменения конфигурации некоторого отрезка для различных значений его ширины и скоростей движущихся по нему объектов. В случае если на очередном шаге координаты объекта выходят за рамки текущего отрезка, осуществляется конкатенация текущего отрезка со следующим (в соответствии с маршрутом объекта) и новое местоположение объекта определяется аналогичным образом.



- a) – начальная конфигурация отрезка;
- b) – конфигурация на следующем шаге моделирования при ширине отрезка равной 1;
- c) – конфигурация на следующем шаге моделирования при ширине отрезка равной 2.

Рис. 2 а. Изменение конфигурации отрезка при значениях скоростей:  
 $v(a)=1, v(b)=1, v(c)=2, v(d)=4$



- a) – начальная конфигурация отрезка;
- b) – конфигурация на следующем шаге моделирования при ширине отрезка равной 1;
- c) – конфигурация на следующем шаге моделирования при ширине отрезка равной 2.

Рис. 2 б. Изменение конфигурации отрезка при значениях скоростей:  
 $v(a)=1, v(b)=1, v(c)=3, v(d)=5$



Отметим, что при выходе объекта за пределы текущего отрезка первый не всегда действительно покидает его пределы – это определяется шириной и количеством объектов, находящихся в начальной точке следующего по маршруту отрезка. Для обеспечения работоспособности данного алгоритма в модели делается ограничение на максимальную скорость объекта. Последняя не должна превышать минимальную длину отрезков, имеющих в модели, деленную на шаг моделирования.

Для упрощения процесса моделирования движения через перекрестки в данной модели не рассматриваются регулируемые перекрестки, и не делается попытка имитировать задержки при проезде перекрестков, обусловленные скоплением машин в условиях ограниченной пропускной способности перекрестка. Тем не менее, для учета факта снижения средней скорости объектов при проезде перекрестков использован следующий прием. В дорожной сети выделены «зоны перекрестков» - примыкающие к перекрестку отрезки маршрутов искусственно укорочены и для них введено ограничение скорости. В остальном проезд перекрестков имитируется аналогичным образом – последовательно перерассчитываются конфигурации отрезков, начиная с исходящих.

### **Заключение**

Предложенная, в данной работе агентная имитационная модель перемещений объектов с псевдослучайными маршрутами представляет собой попытку объединить в рамках одной модели возможности имитации динамики транспортных потоков с моделированием закономерностей появления движущихся объектов в пределах транспортной сети. Модель может найти применение для решения широкого круга задач, в частности – для исследования эффективности динамических коммуникационных сетей на базе мобильных узлов.

### **Литература**

1. Maes, P. Artificial Life meets Entertainment: Lifelike Autonomous Agents /P. Maes // Communication of the ACM, Vol. 38, No 3, November 1995. -pp. 08-114.
2. Franklin, S., Graesser, A. Is it an Agent, or just a program? A Taxonomy for Autonomous Agents / S. Franklin, A. Graesser. // 3rd International Workshop on agent Theories, Architectures and Languages, Springer-Verlag, 1996. -pp.21-35.
3. Виттих, В.А. Мультиагентные системы для моделирования процессов самоорганизации и кооперации / В.А. Виттих, П.О. Скобелев // Proc. Of XIII International Conference of the Artificial Intelligence in Engeneering, Galway, 1998. -pp.91-96.
4. Маслобоев, А.В. Обзор современного состояния технологии мультиагентных систем и перспективы ее развития / А.В. Маслобоев, В.А. Путилов, М.Г. Шишаев // Информационные технологии в региональном развитии. – Апатиты, 2006. – Вып. VI. – С.6-12.

5. Шишаев, М.Г. Современные технологии сетей типа ad-hoc и возможные подходы к организации одноранговых телекоммуникационных сетей на базе мобильных устройств малого радиуса действия / М.Г. Шишаев, С.А. Потаман // Труды Кольского научного центра РАН. Информационные технологии. – Апатиты. -3/2010(3). – Вып. 1. – С.70-74.
6. Уизем, Дж. Линейные и нелинейные волны /Дж. Уизем. - М.: Мир, 1977. -622 с.
7. Иносэ, Х., Хамада, Т. Управление дорожным движением / Х. Иносэ, Т. Хамада. - М.:Транспорт, 1983. - 248 с.
8. Payne, H.J. Models of freeway traffic and control, in: Simulation Council Proc. 28 / H.J. Payne // Mathematical Models of Public Systems. Edited by G.A. Bekey. - 1971. -V.1. -pp. 51–61.
9. Newell, G.F. Nonlinear effects in the dynamics of car – following / G.F. Newell // Oper. Res. 1961.-V.9. -pp. 209–229.
10. Traffic flow theory: A state-of-the-art report / Editors N.H. Gartner, C.J. Messer, A.K. Rathi // Washington DC: Transportation Research Board, 2001. -pp.386.
11. Treiber, M., Hennecke, A., Helbing, D. Congested traffic states in empirical observations and microscopic simulation / M. Treiber, A. Hennecke, D. Helbing // Phys. Rev. E. -2000. -V.62. -pp.1805–1824.
12. Вероятностные и имитационные подходы к оптимизации автодорожного движения / А.П. Буслаев и др. -М.: Мир, 2003. -368 с.
13. Фон Нейман, Дж. Теория самовоспроизводящихся автоматов / Дж. Фон Нейман. - М.: УРСС, 2010.
14. Nagel, K., Schreckenberg, M. A cellular automation model for freeway traffic /K. Nagel, M. Schreckenberg // Phys. I France. -1992. -V.2. -pp.2221–2229.
15. Schreckenberg M., Schadschneider A., Nagel K., Ito N. Discrete stochastic models for traffic flow / M. Schreckenberg, A. Schadschneider, K. Nagel, N. Ito //Physical Review E (Statistical Physics, Plasmas, Fluids, and Related Interdisciplinary Topics). Vol.51. -1995. -№ 4. -pp.2939–2949.
16. Хейт, Ф. Математическая теория транспортных потоков /Ф. Хейт. - М.: Мир, 1966. -287 с.

#### **Сведения об авторах**

*Шишаев Максим Геннадьевич* – д.т.н., заведующий лабораторией,  
e-mail:[shishaev@imm.kolasc.net.ru](mailto:shishaev@imm.kolasc.net.ru)

*Maksim G. Shishaev* - Dr. of Sci (Tech), head of laboratory

*Елисеенко Сергей Юрьевич* – соискатель, e-mail: [eliseenko@arcticsu.ru](mailto:eliseenko@arcticsu.ru)  
*Sergey Y. Eliseenko* - degree seekers

УДК 004.942:622.7

**А.С. Неведров, А.Г. Олейник**

Институт информатики и математического моделирования Кольского НЦ РАН,  
Кольский филиал ПетрГУ

## **АРХИТЕКТУРА СИСТЕМЫ ИНТЕГРАЦИИ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ СРЕДСТВ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭФФЕКТИВНЫХ РЕЖИМОВ ОБОГАЩЕНИЯ\***

### **Аннотация**

В работе описана схема решения задачи определения эффективных режимов обогащения минеральных руд. Рассмотрены архитектуры распределенных систем для определения основных составляющих элементов. Представлена архитектура разрабатываемой системы интеграции инструментальных средств.

### **Ключевые слова:**

*обогащение руд, моделирование, распределенные системы.*

**A.S. Nevedrov, A.G. Oleynik**

## **ARCHITECTURE OF TOOLKITS INTEGRATION SYSTEM FOR DEFINITION OF ORE SEPARATION EFFECTIVE REGIME**

### **Abstract**

The task solution scheme for definition of effective regime separation of mineral ore is described in the paper. Architecture of distributed system for determination of main constituent elements is considered. The architecture of toolkits integration system is proposed.

### **Keywords:**

*ore-dressing, simulation, distributed systems.*

### **Введение**

При исследовании действующих и разработке новых технологий обогащения минеральных полезных ископаемых в настоящее время активно используется компьютерное моделирование [1]. Специфика задач моделирования предполагает реализацию большого объема вычислений. В связи с этим, для получения результатов задачи моделирования в приемлемое время при наличии ограничений на доступные вычислительные ресурсы необходимо найти наиболее рациональные варианты организации вычислительного процесса.

Для решения обозначенной проблемы предложена концепция и архитектура информационной системы, которая должна обеспечить интегрированное представление, систематизацию классов решаемых задач и разнородных исполнителей (используемых программных средств [2]). В качестве формальной основы для автоматизированного синтеза спецификации исполнительской среды предлагается использовать прикладную онтологию, представляющую систему понятий решаемых задач [3, 4]. Онтология позволяет произвести декомпозицию сложной задачи до подзадач, реализация которых возможна с помощью существующих программных средств. Анализ решения исходной задачи, реализуемый процедурами вывода на онтологии, дает

---

\* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и правительства Мурманской области (проект № 12-07-98800-р\_север\_a).

возможность в автоматизированном режиме определить множество необходимых исполнителей и связей между ними, т.е. сформировать спецификацию исполнительской среды. Генерируемая спецификация в некоторых случаях может обладать избыточностью за счет альтернативных вариантов решения задачи, обусловленных наличием аналогов среди исполнителей. В итоге решение исходной задачи можно произвести по одному из альтернативных путей, выбор которого определяется требованиями конкретного вычислительного эксперимента (время выполнения, точность решения и др.).

### Этапы решения задачи определения эффективных режимов обогащения

Схему решения задачи определения эффективных режимов обогащения можно представить в виде трех этапов (рис. 1): формирование спецификации исполнительской среды с использованием прикладной онтологии; определение «лучшего» варианта реализации с учетом пользовательских ограничений; запуск сценария решения задачи.

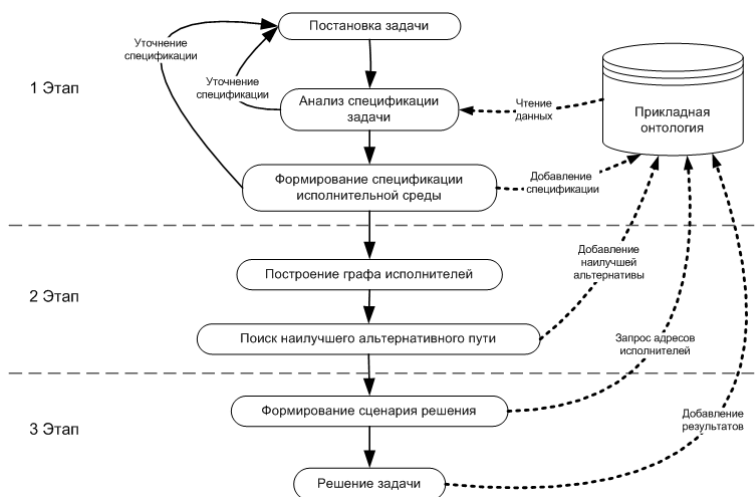


Рис. 1. Схема решения задачи

На первом этапе используется прикладная онтология, которая представляется в виде взаимосвязанных классов: сепарационные аппараты; процессы, протекающие в них; руды (сырье); инструментальные средства, моделирующие процессы. Кроме этого в явном виде определяется класс «Задача», содержащий спецификацию решаемой задачи [5]. Каждый класс описывает систему понятий одного раздела предметной области (рис. 2).

Формирование классификации и ввод экземпляров объектов осуществляет эксперт, но при некоторых условиях возможен импорт объектов из других онтологий. В частности, могут быть использованы существующие разработки онтологий по химии и физике [6, 7].

Определенные в онтологии отношения над объектами классов позволяют исследователю задавать в явном виде неполную спецификацию решаемой задачи, а также избежать некоторых концептуальных ошибок при постановке задачи. Например, при указании конкретного сепарационного аппарата, который

планируется исследовать в ходе моделирования, в результате вывода на онтологии может быть получено множество экземпляров руд, «подходящих» к данному аппарату. Выбор руды для данного варианта вычислительного эксперимента может осуществляться только из этого множества.

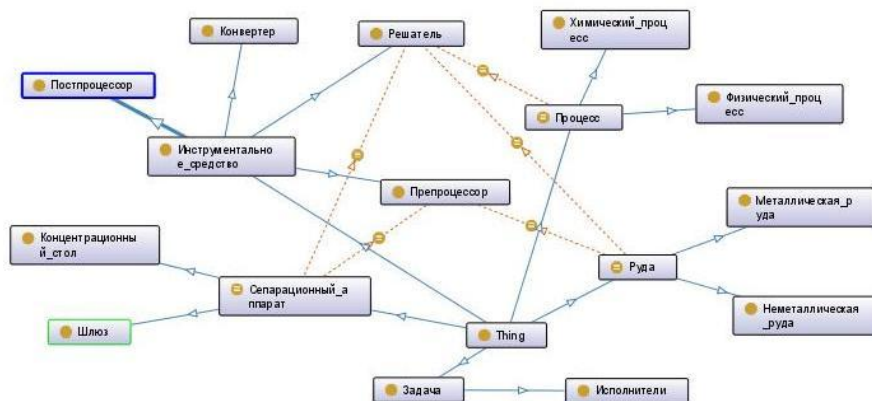


Рис. 2. Укрупненная структура прикладной онтологии

Определение множества возможных исполнителей осуществляется следующей последовательностью действий:

1) Задание спецификации исходной задачи вычислительного эксперимента:

- маркировка экземпляров объектов онтологии (указание в спецификации определенных элементов задачи);
- идентификация в онтологии объектов, соответствующих заданной спецификации.

2) Анализ спецификации на корректность и полноту – уточнение спецификации задачи, если требуется.

3) Наложение дополнительных ограничений на формируемую структуру решения путем определения условий, которым должны удовлетворять значения атрибутов искомым объектов.

4) Построение запроса к онтологии с использованием совокупности формальных характеристик и наложенных ограничений.

5) Вывод экземпляров объектов-исполнителей, удовлетворяющих заданным ограничениям.

Под идентификацией объектов будем понимать совокупность действий, направленных на нахождение экземпляров интересующих объектов [8]. В случае если идентификация объекта-исполнителя успешна, т.е. найден объект класса «Инструментальные средства», соответствующий искомому, проводится вывод экземпляров идентифицированного объекта с учетом заданных пользовательских ограничений на значения свойств. Эти экземпляры затем добавляются в класс «Исполнители» и могут относиться к одной из следующих категорий исполнителей:

- препроцессоры отвечают за формирование модели геометрии пространства, в котором происходит процесс разделения (расчетную сетку);

- решатели реализуют основной вычислительный процесс, в частности – с использованием методов конечных элементов;
- постпроцессоры отвечают за визуализацию процесса моделирования и конечных результатов;
- конвертеры данных преобразовывают данные из одного формата в другой, если такая необходимость возникает при передаче данных между различными исполнителями.

После успешного нахождения всех требуемых исполнителей из них формируется спецификация исполнительской среды – набор взаимосвязанных исполнителей. В случае наличия альтернативных вариантов спецификации исполнительской среды возникает вопрос выбора той или иной альтернативы. Критерии выбора могут быть обусловлены различными факторами: ограничения на время решения задачи; условия доступа к инструментальным средствам; точность получения результата и др.

### Схема поиска альтернативных путей

Для решения задачи выбора альтернативы рассмотрим граф, вершины которого соответствуют найденным в процессе вывода на онтологии исполнителям, а дуги – связям между ними. Связи интерпретируются как абстрактные каналы передачи данных, отображающие возможность взаимодействия инструментальных средств. Направление передачи данных между исполнителями отражается направлением дуги, соединяющей соответствующие вершины графа (рис. 3).

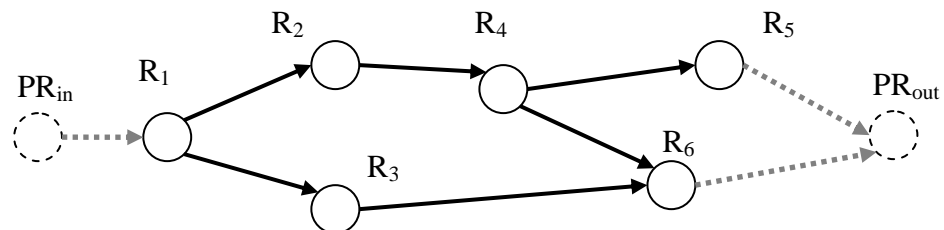


Рис. 3. Ориентированный граф исполнителей вычислительного эксперимента

Для оценки варианта решения, задаваемого некоторой цепочкой узлов, необходимо учитывать характеристики исполнителя, которые можно представить как «стоимость» его использования. Каждой дуге приписывается вес, зависящий от характеристик (сложность, точность) исполнителя, из которого эта дуга выходит, и от способа связи (наличие конвертера). Явно представлять конвертеры на графе нет необходимости. «Стоимостные» характеристики конвертера суммируются с характеристиками исполнителя, для которого данный конвертер требуется.

Интегральная стоимость представляет сумму всех числовых характеристик исполнителя с учетом ограничений спецификации задачи. Такие ограничения выражаются тем, что для каждой характеристики указывается ее значимость в виде баллов (например, от 1 до 5).

Кроме того, спецификация задачи содержит описание исходных данных (входных данных) и требуемых результатов (выходных данных). Поэтому для построения цепочки решения в граф необходимо включить еще две вершины – два псевдоисполнителя. Входной псевдоисполнитель PRin содержит на выходе данные, идентичные исходным данным задачи. Выходной псевдоисполнитель PRout должен получать на вход данные, идентичные требуемым результатам. Дуги, выходящие из входного псевдоисполнителя, имеют вес равный нулю, а дуги, входящие в выходной – веса в соответствии с характеристиками исполнителей, от которых они идут.

В качестве основы алгоритма поиска альтернативных путей в графе исполнителей используется существующий алгоритм поиска кратчайшего пути на графах - алгоритм Дейкстры с учетом ограничений, описанных в спецификации исходной задачи. В результате, стоимость использования каждого из построенных вариантов спецификации исполнительской среды вычисляется как сумма весов дуг, соединяющих исполнителей, входящих в данную спецификацию. Такая стоимость будет учитывать данные из спецификации исходной задачи и из спецификаций инструментальных средств. Сравнение альтернатив в таком случае сводится к сравнению стоимостей их использования. Также на основании информации об используемых инструментальных средствах можно определить основные характеристики решения задачи – количество исполнителей, общее время выполнения, итоговая точность решения и т.п.

### **Формирование сценария решения**

На третьем этапе на основе найденного наилучшего альтернативного пути формируется сценарий запуска исполнителей для решения исходной задачи, причем учитываются все альтернативные исполнители на случай недоступности наилучшего на момент решения задачи. Сценарий представляет собой набор строк специального формата:

```
<tool name="..." parent="..." child="..." alt="...">адрес_исполнителя</tool>
```

name – имя исполнителя;

parent – исполнители-предки (разделитель “;”). Альтернативный исполнитель заключается в скобки;

child – исполнители-потомки (разделитель “;”). Альтернативный исполнитель заключается в скобки;

alt – имя исполнителя, для которого данный является альтернативным.

Сформированный сценарий передается в отдельную часть системы интеграции исполнителей, отвечающую за управление сценариями. Для определения ключевых модулей и выработки архитектуры системы интеграции исполнителей рассмотрим некоторые примеры распределенных систем.

### **Примеры систем распределенных вычислений**

На основе обзора систем распределенных вычислений можно выделить следующие основные общие элементы их структуры:

- служба регистрации и мониторинга ресурсов;
- база данных;

- интерфейс пользователя;
- служба контроля учетных записей;
- служба анализа задач;
- планировщик заданий и служба балансировки нагрузки.

Рассмотрим несколько подробнее два примера реализации систем данного класса.

Среда IARnet [9] предназначена для объединения существующих в сети ресурсов в единую распределенную сеть. К каждому ресурсу добавляется специальный агент доступа, после чего ресурс становится ИАР — информационно алгоритмическим ресурсом, доступным из среды (рис. 4). В среде есть возможность создавать сценарии совместной распределенной работы ряда ресурсов, необходимых для решения той или иной задачи.

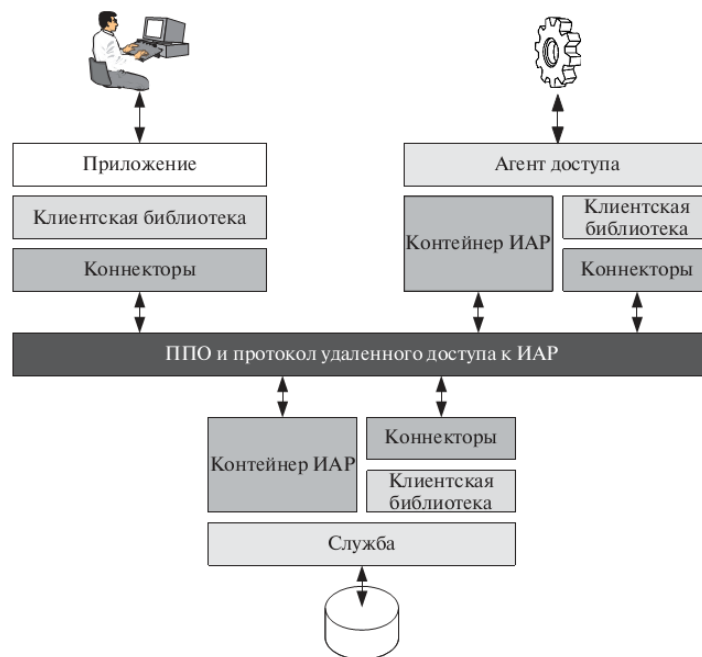


Рис. 4. Архитектура IARnet

Агент доступа в IARnet представляет собой программный компонент, реализующий набор операций, через которые осуществляется доступ к функциональности первичного ресурса. Интерфейс агента доступа состоит из двух основных частей: стандартного общего интерфейса, который должен реализовать каждый агент доступа, и интерфейса доступа к соответствующему типу ресурса.

Контейнер ИАР представляет собой среду, в которой разворачиваются и функционируют агенты доступа [10]. Контейнер решает две задачи: обеспечивает удаленный доступ к агентам посредством определенного коммуникационного механизма промежуточного программного обеспечения; предоставляет унифицированный интерфейс для разворачивания агентов доступа и их администрирования.



В рамках IARnet были предусмотрены следующие базовые службы:

- Служба регистрации, осуществляющая регистрацию поиск ресурсов и других служб распределенной вычислительной среды.
- Служба мониторинга, осуществляющая мониторинг состояния ресурсов и других компонентов среды.
- Служба рассылки сообщений, реализующая механизм подписки на уведомления о событиях, связанных с ресурсами.
- Служба журналов, позволяющая вести единый системный журнал распределенного приложения.
- Служба безопасности, осуществляющая выдачу цифровых сертификатов.

Другим примером является система Triad.Net - распределенная система имитационного моделирования с удаленным доступом (разработка ведется группой преподавателей и студентов Кубанского и Пермского университетов). В данной системе онтология применяется при доопределении имитационных моделей, в отладчике имитационных моделей и для автоматического определения правил, используемых для управляемой балансировки распределенной модели.

Triad.Net включает следующие компоненты: компилятор TriadCompile; ядро TriadCore; графический редактор; подсистему отладки и валидации имитационных моделей TriadDebugger; подсистему синхронизации распределенных объектов модели; подсистему балансировки TriadBalance; подсистему организации удаленного доступа TriadEditor, подсистему защиты от внешних и внутренних угроз TriadSecurity, подсистему автоматического доопределения модели TriadBuilder, а также базу данных, где хранятся экземпляры элементов модели.

Для представления семантических знаний, необходимых для доопределения моделей, используются онтологии. Для представления онтологий – язык OWL, поскольку существует большое количество инструментальных средств работы с онтологиями OWL, поддерживающих возможность публиковать созданные онтологии в сети Internet и объединять информацию из различных источников, как локальных, так и находящихся в глобальной сети. Для работы с онтологиями используется инструментарий Jena OWL API. На данном этапе разработки онтологии сохраняются в виде текстовых файлов в формате представления Notation3 (N3).

### **Архитектура системы интеграции исполнителей**

Модульная структура, разрабатываемой системы интеграции инструментальных средств моделирования процессов обогащения, представлена на рис. 5. Система состоит из: модуля-интерфейса, обеспечивающего доступ пользователей (исследователей и экспертов) к системе; прикладной онтологии, содержащей описание объектов предметной области и отношений между ними; модуля анализа спецификации задачи; машины вывода, используемой для вывода на онтологии при анализе задачи и поиске исполнителей; модуля создания спецификации исполнительской среды; модуля построения графа исполнителей и планировщика.

Также для организации доступа к разнородным инструментальным средствам в системе имеются адаптеры, реализующие взаимодействие с исполнителями.

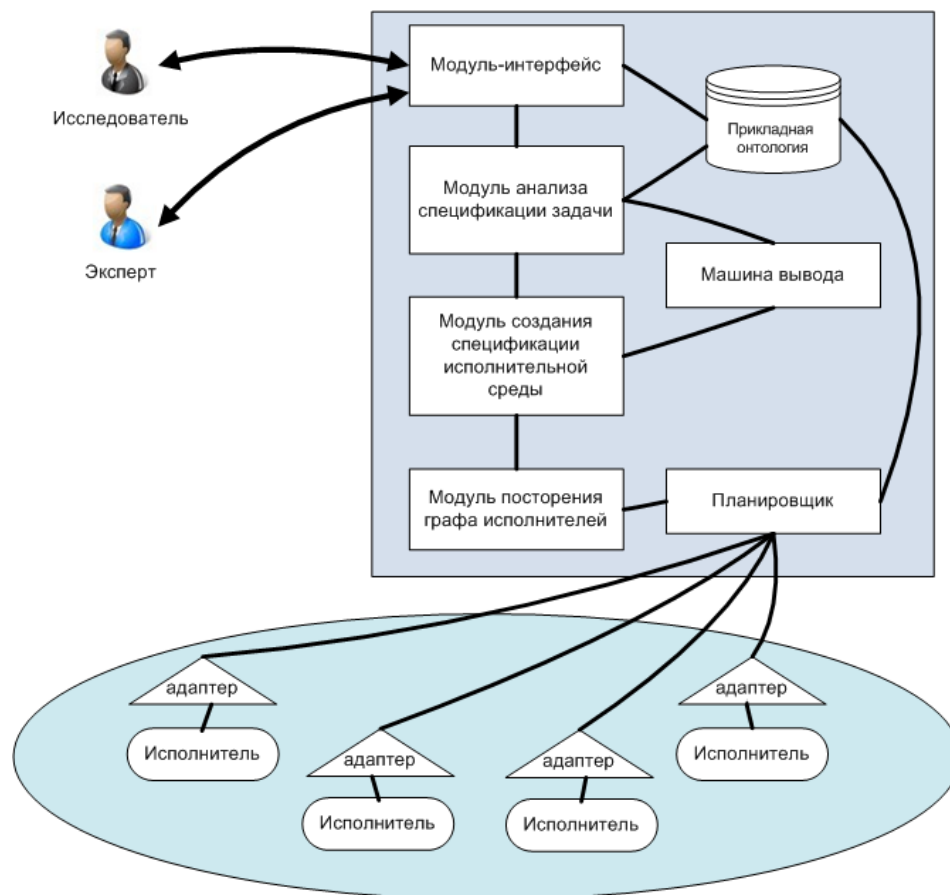


Рис. 5. Архитектура системы интеграции исполнителей

### Заключение

Развитие программных и аппаратных средств компьютерного моделирования обеспечивает возможность их использования при решении обладающих высокой вычислительной сложностью задач совершенствования обогатительных технологий, процессов и аппаратов. При определенных условиях актуальной может оказаться проблема поиска наиболее эффективных вариантов реализации моделирования, и, как следствие, сравнительный анализ возможных альтернатив.

В данной работе была представлена схема решения задачи определения эффективных режимов обогащения в рамках системы интеграции исполнителей. Для определения основных элементов архитектуры системы был сделан обзор аналогичных систем IARnet и Triad.net. В результате рассмотрения этих систем и на основе этапов схемы решения была спроектирована архитектура системы интеграции исполнителей.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Бирюков, В.В. Применение системы Femlab для моделирования гидродинамики течений в обогатительных аппаратах / В.В. Бирюков, А.Г. Олейник // Информационные ресурсы России, 2007. -№ 3 (97). -С.30-32.
2. Неведров, А.С. Об инструментальных средствах определения эффективных режимов обогащения минеральных руд / А.С. Неведров, А.Г. Олейник // Информационные ресурсы России, 2011. -№5 (123). - С.35-38.
3. Гладун, А.Я. Онтологии в корпоративных системах / А.Я. Гладун, Ю.В. Рогушина // Корпоративные системы. -2006. -№1. - С.22-41.
4. Олейник, А.Г. Автоматизация поиска альтернативных спецификаций исполнительных сред / А.Г. Олейник, А.С. Неведров // Параллельные вычисления и задачи управления (РАСО'2012): труды Шестой международной конференции, г. Москва, 24-26 октября 2012 г. - М.: ИПУ РАН, 2012. - Т.3. -С.281-290.
5. Неведров, А.С. Формальное представление задачи интеграции инструментальных средств определения эффективных режимов обогащения минеральных руд / А.С. Неведров, А.Г. Олейник // Труды Кольского научного центра РАН. Информационные технологии. - Апатиты: Изд-во КНЦ РАН. - № 4/2011(7). -Вып.2. - С.196-202.
6. Артемьева, И.Л. Модульная модель онтологии органической химии / И.Л. Артемьева, Н.В. Рештаненко // Интеллектуальные системы. - 2004. -№ 2. - С.98-109.
7. Кравец, А.Г. Онтология физической задачи / А.Г. Кравец, О.В. Титова // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. - 2011. -№ 4(16). - С.12-16.
8. Жыжырий, Е.А. Математическое обеспечение систем поиска, основанных на онтологиях / Е.А. Жыжырий, С.С. Щербак // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. -2006. -№ 3. - С.12-17.
9. Тарасов, А.С. Распределенная математическая среда на основе IARnet / А.С. Тарасов // Труды ИСА РАН. -2008. -Т.32. – С.250-266.
10. Емельянов, С.В. Реализация Grid-вычислений в среде IARnet / С.В. Емельянов, А.П. Афанасьев, В.В. Волошинов и др. // Информационные технологии и вычислительные системы. -М.: Институт микропроцессорных вычислительных систем РАН. - 2005. -№2. - С.61–75.
11. Миков, А.И. Инструментальные средства удаленного параллельного моделирования / А.И. Миков, Е.Б. Замятина, А. Фирсов // Proceedings of the XII-th International Conference “Knowledge-Dialogue-Solution”. - Varna, 2006. Sofia: FOI-COMMERCE. -2006. - С.280-287.

#### Сведения об авторах

Неведров Алексей Сергеевич - аспирант, e-mail: [nevedrov@arcticsu.ru](mailto:nevedrov@arcticsu.ru)  
Alexey S. Nevedrov - post-graduate

Олейник Андрей Григорьевич – д.т.н., зам. директора по научной работе,  
e-mail: [oleynik@iimm.kolasc.net.ru](mailto:oleynik@iimm.kolasc.net.ru)  
Andrey G. Oleynik - Dr. of Sci. (Tech.), Deputy director

004.942:622.7

**В.В. Бирюков<sup>1</sup>, И.В. Буренина<sup>1</sup>, Р.М. Никитин<sup>1</sup>, А.Г. Олейник<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Горный институт Кольского НЦ РАН

<sup>2</sup> Институт информатики и математического моделирования Кольского НЦ РАН,  
Кольский филиал ПетрГУ

## **РАЗРАБОТКА МОДЕЛЕЙ РАЗДЕЛИТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАТЕМАТИЧЕСКОГО АППАРАТА ММК\***

### **Аннотация**

В работе представлены результаты создания имитационных моделей разделительных аппаратов, ориентированные на совершенствование производственных процессов, реализуемых на обогатительных предприятиях Мурманской области. В качестве математической основы разрабатываемых моделей использован аппарат многофазного многоскоростного континуума (ММК). Описаны математические модели магнитно-гравитационного и флотационного аппаратов.

### **Ключевые слова:**

*обогажительный аппарат, имитационное моделирование, многофазный многоскоростной континуум.*

**V.V. Birukov, I.V. Burenina, R.M. Nikitin, A.G. Oleynik**

## **ORE DRESSER MODELS DESIGN ON THE BASIS OF MATHEMATICAL APPARATUS MMK**

### **Abstract**

The results of ore dresser simulation models design are presented in the paper. The models are oriented to improve industrial process realized at the concentration plants of Murmansk region. The mathematical apparatus of multiphase multispeed continuum (MMC) is used as the models basis. Mathematical models of magnetic-gravity and flotation ore dressers are described.

### **Keywords:**

*ore dresser, simulation, multiphase multispeed continuum.*

### **Введение**

Компьютерное моделирование широко используется при решении задач разработки и совершенствования технологий и аппаратов обогащения минеральных полезных ископаемых. В основе большинства существующих инженерных методик расчета компонентов и характеристик схем обогащения лежат упрощенные эмпирические модели гидродинамических явлений и процессов, опирающиеся на обширные данные теоретических, лабораторных и натурных исследований. Недостатком моделей данного типа является сложность, а порой и невозможность адекватного учета влияния новых, не отработанных экспериментально конструктивных решений. Современный уровень развития технических и программных средств моделирования обеспечивает возможность практической реализации моделей, более адекватно отражающих процессы разделения минеральных компонентов. В частности,

---

\* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и правительства Мурманской области (проект № 12-07-98800-р\_север\_а).

эффективным инструментом решения расчетных задач, связанных с гидродинамикой многофазных процессов, к которым относятся процессы разделения минеральных компонентов происходящих в обогатительных аппаратах, являются CAE (Computer-Aided Engineering) – системы и CFD-программы (Computational fluid dynamics), представляющие собой инструментальные средства вычислительной гидродинамики [1].

В CFD-модели разделительного аппарата учитываются: геометрия исследуемого объекта; расчетная сетка рассматриваемой геометрии; граничные условия и физические свойства материалов; модели турбулентности; параметры численного решения системы уравнений Навье-Стокса и Эйлера. При этом при построении модели нет необходимости существенно упрощать физические процессы в течениях взаимодействующих фаз. Поля концентраций и скорости движения отдельных фаз и потоков могут рассчитываться в таком количестве локальных точек рабочего пространства исследуемого аппарата, которое обеспечит получение репрезентативного результата. В качестве математического аппарата для построения таких моделей использован аппарат многофазного многоскоростного континуума (ММК). Вычислительный эксперимент над CFD-моделями, основанными на использовании ММК представлений движения вещества в разделительном аппарате, приближается по своим качествам к натурному эксперименту.

### Общий математический подход

Формирование имитационной модели процессов и аппаратов обогащения средствами специализированных программных инструментов требует предварительного создания математической модели исследуемого объекта.

Как уже было отмечено, для описания многофазных течений использовался математический аппарат ММК с введением фазных объемных долей  $\alpha$ , которые определяют удельный объем, занятый каждой фазой, и законы сохранения массы и импульса для каждой фазы индивидуально [2,3]. Система уравнений сохранения определяет в среднем локальное мгновенное равновесие для каждой из фаз и состоит из уравнений сохранения массы, импульса, энергии (по необходимости).

Уравнение сохранения импульса для  $s$ -ой твердой фазы:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_s \rho_s \vec{v}_s) + \nabla \cdot (\alpha_s \rho_s \vec{v}_s \vec{v}_s) = -\alpha_s \nabla p + \nabla \cdot \vec{\tau}_s + \alpha_s \rho_s \vec{g} + \alpha_s \rho_s (\vec{F}_s + \vec{F}_{a,s} + \vec{F}_{vm,s}) + \sum_{l=1}^N \left( K_{ls} (\vec{v}_l - \vec{v}_s) + m_{ls} \vec{v}_{ls} \right),$$

где  $\rho$  - плотность фазы;  $\vec{v}_s, \vec{v}_l$  - скорости соответственно твердой и жидкой фазы;  $p_s$  - давление  $s$ -ой твердой фазы;  $K_{ls} = K_{sl}$  - коэффициент передачи импульса между жидкостью и твердой фазой  $s$ .

$$K_{sl} = \frac{\alpha_s \rho_s f}{\tau_s},$$

где  $f$  - функция взаимодействия;  $\tau_s = \frac{\rho_s d_s^2}{18\mu_l}$  - время релаксации,  $d_s$  - диаметр частиц фазы  $s$ .

Функция взаимодействия  $f$  включает коэффициент сопротивления  $C_D$ , который основан на числе Рейнольдса  $Re_s$ .

### Модель магнитно-гравитационного аппарата

Технологический процесс магнитно-гравитационной сепарации в закрученном потоке жидкости относится к наиболее перспективным с экономической точки зрения и экологически безопасным технологиям получения магнетитовых концентратов различного заданного качества [4].

На протекание разделительных процессов оказывают существенное влияние такие гидродинамические эффекты, как присоединение вихря к стенке аппарата, (эффект Коанда), прецессия вихревого ядра, вторичные течения и рециркуляционные зоны. Расчет распределений скоростей и концентраций отдельных фаз в рамках созданной САЕ (CFD) модели потока ферромагнитной суспензии в магнитном поле позволяет определить характер процесса разделения в целом для повышения их устойчивости и контролируемости [5].

В аппаратах, использующих магнитно-гравитационный принцип сепарации, разделение происходит при фильтрации закрученным восходящим потоком жидкости частиц исходного материала через ожиженный слой магнитноагрегированной суспензии [4]. При этом разделяемые минеральные частицы в зависимости от их физических свойств могут находиться в одном из нескольких состояний: плотного слоя, осаждения, ожиженного слоя и гидротранспорта в зависимости от скорости фильтрующейся жидкости и напряженности магнитного поля.

В основу математической модели процесса разделения минеральных комплексов в магнитно-гравитационном аппарате положен эффект формирования ожиженного слоя из ферромагнитных частиц в восходящем водном потоке при помещении его в однородное магнитное поле (magnetized stabilized fluidized beds – MSFB). Феноменология этого эффекта исследована Филипповым [6,7], а теоретическое описание представлено в работах Розенцвейга и Зигеля [8-10].

При описании течения ферромагнитной суспензии использовалась модель Гидаспова [11]. При  $a_l > 0,8$  коэффициент взаимодействия между твердой и жидкой фазами  $K_{sl}$  имеет следующий вид:

$$K_{sl} = \frac{3}{4} C_D \frac{a_s a_l \rho_l |\vec{v}_s - \vec{v}_l|}{d_s} a_l^{-2,65},$$

где  $C_D = \frac{24}{a_l Re_s} \left[ 1 + 0,15 a_l Re_s^{0,687} \right]$  - коэффициент гидродинамического сопротивления.

При  $a_l \leq 0,8$ :

$$K_{sl} = 150 \frac{a_s (1 - a_l) \mu_l}{a_l d_s^2} + 1,75 \frac{\rho_l a_s |\vec{v}_s - \vec{v}_l|}{d_s}.$$

Для описания эффекта снижения гидродинамического сопротивления сформированных магнитных вертикально ориентированных агрегатов использовались данные, приведенные в работе [12], в которой исследовались параметры гравитационного осаждения магнетитовых агрегатов в слабых магнитных полях (1-20 кА/м). Используя формулу Ламба для поперечного обтекания цилиндра и результаты работы [13], согласно которой сила сопротивления при продольном обтекании и при вращении цилиндра не зависит от числа Рейнольдса, значение коэффициента поперечного сопротивления длинного цилиндра, определяемое по формуле:

$$C_w = \frac{W}{F \rho V^2 / 2} = 2A / Re$$

сопоставлялось с теоретическим значением, полученным по формуле Ламба:

$$C_{A_{ц.поп}} = \frac{A_{ц} \pi \mu V L}{\pi d^2 / 4 \rho V^2 / 2} = 2A_{ц} / Re$$

и с теоретическим значением коэффициента продольного сопротивления:

$$C_{A_{ц.прод}} = 2A / Re = 8 / Re .$$

Учитывая, что агрегат является двухфазным образованием, состоящим из магнетита и воды, которая заполняет пространство между частицами и движется вместе с магнетитом, гидродинамическая плотность его составляет 1900 – 2100 кг/м<sup>3</sup>. Это соответствует 60–65% содержанию твердого в магнитных фракциях.

Разница скоростей осаждения при ламинарном режиме обтекания вытянутого агрегата и единичной сферической частицы может находиться в широком диапазоне значений в зависимости от напряженности магнитного поля.

В аппаратах, реализующих магнитно-гравитационный принцип разделения, используется действие восходящего закрученного потока жидкости, который создает сдвиговое воздействие на сформированные ферромагнитные агрегаты. При разработке аналитической модели для учета сдвигового напряжения использовались результаты работы [13], в которой приводится оценка величины снижения коэффициента гидродинамического сопротивления при действии на ферромагнитный слой внешнего однородного магнитного поля и сдвигового воздействия потока жидкости. Коэффициент гидродинамического сопротивления  $C_D$  при наложении внешнего поля и сдвигового потока отличается на величину  $D$ , зависящую от напряженности магнитного поля:

$$D = \frac{C_D|_{B_0}}{C_D|_{B_0=0}} = 1 - 0,56A^{0,62},$$

где  $A$  определяется максимальным значением силы взаимодействия ферромагнитных частиц во внешнем однородном магнитном поле, размерами и взаимоположением этих частиц.

Модель течения ферромагнитной суспензии в магнитно-гравитационном аппарате реализована в трехмерной геометрии цилиндрикоконического корпуса аппарата высотой 1 м и диаметром 0,4 м.

Эксперименты с моделью позволили исследовать течения ферромагнитной суспензии в рабочем объеме магнитно-гравитационного аппарата и проанализировать распределения объемных фракций суспензии, скоростей фракций суспензии и скоростей жидкости при различных условиях.

Варьирование параметров однородного магнитного поля позволило определить условия магнитной стабилизации ожигенного слоя, обеспечивающей устранение нежелательных гидродинамических эффектов в различных зонах разделительного аппарата. Полученные результаты дают основания утверждать, что модель может быть использована для прогнозирования технологических показателей разделения в магнитно-гравитационных аппаратах различных конструкций, а также для совершенствования аппаратов данного типа.

### **Модель флотации**

Флотация – сложно формализуемый процесс, протекающий в многофазной потоковой системе. Многообразие фаз, участвующих в процессе флотации, обусловлено присутствием жидкости, газа (как правило – воздуха) и большого числа твердых фаз. При построении модели процесса флотации необходимо учитывать, что состав фаз, расход и степень диспергации газа определяются технологией конкретного производства и используемым флотационным и вспомогательным оборудованием. Количество и состав твердых фаз, принимаемых к рассмотрению в вычислительном эксперименте, зависят от цели эксперимента, требований к достоверности результата, а также ограничений, связанных с технической оснащённостью эксперимента (привлекаемыми вычислительными мощностями) и временем, отведенным на его проведение.

В математической модели процесса флотации описывается обмен механической и тепловой энергией и веществом. В настоящей работе принято допущение об изобарно-изотермическом состоянии гетерогенной исследуемой системы. При формулировке условий материального баланса рассматривается производительность моделируемого объекта по удельным временным объемным расходам входных и выходных потоков, а также их физические и вещественные характеристики. К физическим характеристикам жидкой фазы относятся плотность, скорость, динамическая вязкость и поверхностное натяжение. К характеристикам твердых фаз относятся: гранулометрический, химический, минералогический и фазовый состав, массовое и объемное содержание твердых компонентов пульпы.

В базовую систему уравнений, описывающую процесс флотации, входят: уравнения Эйлера для многофазных систем, *k-ε* модель турбулентности [14] в приложении для дисперсных фаз и математические модели сопротивления движению фаз, входящие в структуру уравнений сохранения импульса. Особенностью данных уравнений является использование в качестве аргумента объемной доли фазы в элементе объема (ячейке расчетной сетки). Такая интерпретация аргумента обоснована применением в математическом аппарате CFD представлений теории многоскоростного многофазного континуума (ММК), согласно которой компоненты системы образующие одну из фаз, вне зависимости от агрегатного состояния и дисперсности, образуют выделенный в системе поток, распространяющийся подобно жидкости одновременно и совместно с другими фазами.



Для описания взаимодействий типа *пузырек газа – жидкость* использована универсальная модель сопротивления с коэффициентом обмена

$$K_{pq} = \frac{\alpha_q \alpha_p \rho_p f}{\tau_p},$$

где  $q$  – индекс жидкой фазы,  $p$  – индекс газовой пузырьковой фазы;  $\tau_p$  – время релаксации пузырька, определяемое соотношением:

$$\tau_p = \frac{\rho_p d_p^2}{18\mu_e};$$

$f$  – функция сопротивления, в которой  $Re$  – число Рейнольдса:

$$f = \frac{C_D Re}{24}, \quad Re = \frac{\rho_q |\vec{v}_q - \vec{v}_p| d_p}{\mu_e};$$

где  $C_D$  – коэффициент сопротивления:

$$C_D = \frac{24}{Re} (1 + 0,1 Re^{0,75});$$

$\mu_e$  – эффективная вязкость жидкой фазы с учетом влияния компонентов ММК

$$\mu_e = \frac{\mu_q}{1 - \alpha_p}.$$

Для взаимодействий типа *твердая частица – жидкость* использована модель сопротивления Вена и Ю [15] с коэффициентом обмена

$$K_{sl} = \frac{3}{4} C_D \frac{\alpha_s \alpha_l \rho_l |\vec{v}_s - \vec{v}_l|}{d_s \alpha_l^{2,65}},$$

где

$$C_D = \frac{24}{\alpha_l Re_s} [1 + 0,15(\alpha_l Re_s)^{0,687}], \quad Re_s = \frac{\rho_l d_s |\vec{v}_s - \vec{v}_l|}{\mu_l}.$$

Для взаимодействий типа *твердая частица – пузырек газа* использована модель сопротивления Шиллера и Науманна, определяемая по аналогии с универсальной моделью сопротивления за исключением вычисления коэффициента сопротивления и числа Рейнольдса для пары вторичных фаз:

$$C_D = \begin{cases} 24(1 + 0,15 Re^{0,687})/Re & Re \leq 1000 \\ 0,44 & Re > 1000 \end{cases}, \quad Re = \frac{\rho_{rp} |\vec{v}_r - \vec{v}_p|}{\alpha_p \mu_p + \alpha_r \mu_r} d_{rp}.$$

Для взаимодействий типа *твердая частица – твердая частица* использована симметричная модель сопротивления Сиамлала и Обриена [16-18] без учета взаимного трения для разбавленных фаз с коэффициентом обмена

$$K_{ls} = \frac{3\alpha_s \rho_s \alpha_l \rho_l (d_l + d_s)^2}{2(\rho_l d_l^3 + \rho_s d_s^3)} |\vec{v}_l - \vec{v}_s|.$$

Таким образом, вопрос о выводе уравнений массопереноса для условий флотационного обогащения сводится к определению количества и свойств твердых фаз в математической модели процесса флотации, их объемному содержанию в питании флотации и характеристических коэффициентов их флотиремости.

Исходными данными для определения характеристик твердых фаз в математической модели являются результаты гранулометрического и минералогического анализов, а так же анализа степени раскрытия полезного минерала. В совокупности эти результаты представляют собой набор, состоящий из  $i$  – классов крупности,  $j$  – минералов и  $k$  – сортов полезного минерала. При этом  $k = 1$  соответствует полезному минералу с минимальным содержанием примесей в виде сростков («чистый минерал») и  $k = k_{max}$  соответствует полезному минералу с максимальным содержанием примесей («сопутствующий минерал»). Для всех  $i$  определены выходы  $g_i$ . Используя известные материальные соотношения и данные о плотностях минералов, представленных в твердой фазе, результаты анализов группируются в конечный набор фаз, учитываемых в математической модели, интегральные свойства которых отражают степень вхождения в них реальных минералов. Расчетные выходы (массовые доли) фаз и содержания в них полезного компонента с учетом плотности питания флотации позволяют определить их объемное содержание в питании, что и является основой частных решений для базовой системы уравнений.

Характеристические коэффициенты флотиремости рассматриваемых в модели фаз должны отражать поверхностные свойства частиц, отнесенных к данной фазе. Для расчета характеристических коэффициентов флотиремости используется метод определения величины поверхностной энергии минералов по энергетическим коэффициентам химических элементов, образующих их оксидные группы. Данный метод основан на положениях геоэнергетической теории А.Е.Ферсмана [19]. Вклад каждого входящего в фазу минерала в величину характеристического коэффициента флотиремости оценивается из соотношения его объемной доли в частице фазы и его доли в образовании поверхности той же частицы. Полученные таким методом характеристические коэффициенты имеют размерность удельной объемной силы  $[Н/м^3]$ , направленной нормально к поверхности выхода пенного продукта.

Для проведения вычислительных экспериментов была создана модель камеры пневмомеханической флотационной машины ОК-38. При формулировке условий однозначности использованы данные технологической схемы основной нефелиновой флотации фабрики АНОФ-2 ОАО «Апатит». Используемое программное обеспечение поддержки вычислительного эксперимента позволяет получить как графическое, так и числовое представление результатов для каждой из фаз в любой точке пространства флотационной камеры.

Вычислительный эксперимент на основе разработанной модели флотационного аппарата позволяет получить информацию не только о пространственных распределениях скоростей и концентраций отдельных компонентов многофазной системы, но и технологические характеристики моделируемого аппарата. Массовый выход  $i$ -й фракции  $\gamma_i$  рассчитывается интегрированием потока данной фракции по поверхностям выходных отверстий слива и концентрата:

$$\gamma_{\text{слив}} = \int_{\text{Слив}} M_i dS \quad , \quad \gamma_{\text{концентрат}} = \int_{\text{С концентрат}} M_i dS$$

Содержание полезного компонента  $\beta$  в сливе и концентрате определяется путем суммирования содержания в отдельных фракциях соответствующих продуктов

$$\beta = \sum_i \beta_i \gamma_i$$

Используя  $\gamma_{\text{слив}}$ ,  $\gamma_{\text{концентрат}}$ ,  $\beta_{\text{слив}}$ ,  $\beta_{\text{концентрат}}$ , рассчитываются характеристики  $\varepsilon_i$  - извлечения полезного компонента во фракциях слива и концентрата соответственно.

### **Моделирование гравитационных аппаратов**

При переработке различных видов мелкоразмерного сырья, характеризующегося пластинчатой формой ценных компонентов определение различий в скоростях падения плоских и изометричных зерен минералов в потоке суспензии даст возможность выбрать и обосновать оптимальные параметры гравитационного обогащения руд различного диапазона крупности. В частности, гидродинамическая структура потока суспензий в гравитационных аппаратах, используемых при переработке слюдяных руд, оказывает существенное влияние на процессы разделения. Знание распределений скоростей и объемных концентраций частиц по всему объему аппарата дает возможность оптимизировать гидродинамические и, тем самым, конструктивные параметры гравитационных аппаратов (например, гидравлических сепараторов, когда разделительным признаком в них выступает форма частиц)

В настоящей работе мы не будем подробно останавливаться на математическом описании разделительных процессов данного типа. Отметим только, что основное внимание при исследовании с помощью разработанных имитационных моделей было уделено влиянию формы и геометрических параметров гравитационных аппаратов на динамику распределения частиц различной крупности и формы в рабочем объеме аппарата.

### **Заключение**

Практическая реализация описанных выше моделей осуществлялась с помощью программного пакета ANSYS Fluent, предоставляющего инструментарий для создания двухмерных и трехмерных расчетных областей геометрических моделей, сеточные генераторы, расчетные модули и блоки обработки результатов расчетов [20, 21].

Модель технологического процесса обогащения минеральных руд может быть сформирована на основе набора моделей задействованного в процессе обогатительного и вспомогательного оборудования, связанных материальными потоками. Одним из инструментов, поддерживающих возможность реализации такой модели, является программный пакет MODSIM [22]. В данном пакете уже содержатся модели функционирования различного оборудования, используемого в обогатительном производстве. Кроме этого программная среда предусматривает возможность включения в формируемую схему «пользовательских» моделей. Изначально такая модель определяется в моделируемой схеме как «черный ящик», для которого средствами MODSIM задаются входные и выходные материальные потоки. Детальная модель функционирования

«черного ящика», реализованная средствами ANSYS Fluent экспортируется в MODSIM.

Разрабатываемые имитационные модели позволяют не только осуществлять поиск вариантов более эффективного использования действующих разделительных аппаратов, но и достаточно оперативно, без затрат на практическую реализацию, исследовать возможные варианты новых конструктивных решений. Это значительно ускоряет разработку и внедрение в производство наиболее эффективное и надежное, энергосберегающее обогатительное оборудование и помогает горнодобывающей промышленности максимально быстро адаптироваться к условиям новой конкурентной среды, в выпуске конкурентоспособной и максимально экологически безопасной продукции.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Неведров, А.С. Об инструментальных средствах определения эффективных режимов обогащения минеральных руд / А.С. Неведров, А.Г. Олейник // Информационные ресурсы России. - №5 (123), 2011. - С.35-38.
2. Рахматулин, Х.А. Основы газодинамики взаимопроникающих движений сжимаемых сред / Х.А. Рахматуллин // Прикладная математика и механика. - 1956. -Т.20, вып. 2. – С.183-195.
3. Нигматулин, Р.И. Динамика многофазных сред / Р.И. Нигматулин. - М.: Наука, 1987. -Ч.1. -464 с.
4. Усачев, П.А. Магнитно-гравитационное обогащение руд / П.А. Усачев, А.С. Опалев. - Апатиты: КНЦ РАН, 1993. -92 с.
5. Скороходов, В.Ф. Использование современных компьютерных технологий при разработке и совершенствовании конструкций обогатительного оборудования / В.Ф. Скороходов, М.С. Хохуля, В.В. Бирюков // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2011. – № 4. – С.260-266.
6. Кирко, И.М. Особенности взвешенного слоя ферромагнитных частиц в магнитном поле / И.М. Кирко, М.В. Филиппов // Журнал технической физики. - 1960. - Т.30, № 9. - С.1081-1084.
7. Филиппов, М.В. Взвешенный слой ферромагнитных частиц и действие на него магнитного поля / М.В. Филиппов // Прикладная магнитогидродинамика. - Рига, 1961. - Т.12. - С.215-236.
8. Rosensweig, R.E. Magnetic stabilization of the state of uniform fluidization / R.E. Rosensweig // Ind. Eng. Chem. Fundam. - 1979. - Vol. 18, N 3. - pp.260-269.
9. Rosensweig, R.E. Fluidization: Hydrodynamic stabilization with a magnetic field/ R.E. Rosensweig // Science. - 1979. - Vol. 204.- pp.57-60.
10. Siegel, J. Magnetized-fluidized beds / J. Siegel. - Powder Technology, 64 (1991). - P.1.
11. Gidaspow, D. Hydrodynamics of circulating fluidized beds, kinetic theory approach / D. Gidaspow, R. Bezburuah, J. Ding // In Fluidization VII, Proceedings of the 7 th Engineering Foundation Conference on Fluidization, 1992.- pp.75-82.
12. Вигдергауз, В.Е. Гидродинамика магнетитовых флокул / В.Е. Вигдергауз, А.А. Щаденко, О.А. Усов, В.В. Чельшкіна // Горный журнал. - 2003, № 11. - С.36-38.

13. Jovanovic, G.N. Magnetically assisted liquid–solid fluidization in normal and microgravity conditions: experiment and theory / G.N. Jovanovic, N. Goran, Thana Sornchamni, E. James. Atwater and others // Powder Technology, 148 (2004). -pp.80–91.
14. Bardina, J.E. Turbulence Modeling Validation, Testing and Development / J.E. Bardina, P.G. Huang, T.J. Coakley // NASA reports. – April 1997.
15. Wen, C. Mechanics of Fluidization / Wen C.Y., Yu Y.H. // Chem. Eng. Prog. Symp. Series, 62, 1966. - pp.100-111.
16. Syamlal, M. MFIХ Documentation / M. Syamlal, W. Rogers, T.J. O'Brien // Theory Guide. National Technical Information Service, Springfield, VA, Vol.1, 1993. DOE/METC-9411004, NTIS/DE9400087.
17. Syamlal, M. Computer Simulation of Bubbles in a Fluidized Bed. / M. Syamlal, T.J. O'Brien / AIChE Symp. Series, 85, 1989. - pp.22-31.
18. Syamlal, M. The Particle-Particle Drag Term in a Multiparticle Model of Fluidization / M. Syamlal // National Technical Information Service, Springfield, VA, 1987. DOE/MC/21353-2373, NTIS/DE87006500.
19. Ферсман, А.Е. Геохимия в 3-х т. /А.Е. Ферсман // Госхимтехиздат, Ленинградское отделение, 1937. -Т.3.
20. Ansys fluent. - Режим доступа: <http://www.ansys-expert.ru/product/ansys-fluent>
21. Бирюков, В.В. Применение системы Femlab для моделирования гидродинамики течений в обогащительных аппаратах / В.В. Бирюков, А.Г. Олейник // Информационные ресурсы России. – 2007. - № 3 (97). – С.30-32.
22. Modular simulator for mineral processing plants. - Режим доступа: <http://www.mineraltech.com/MODSIM/>

#### **Сведения об авторах**

*Бирюков Валерий Валентинович* – научный сотрудник, e-mail: [birukov@goi.kolasc.net.ru](mailto:birukov@goi.kolasc.net.ru)

*Valeri V. Birukov* - research worker

*Буренина Ирина Викторовна* – инженер-технолог, e-mail: [bur@goi.kolasc.net.ru](mailto:bur@goi.kolasc.net.ru)

*Irina V. Burenina* - engineer-technologist

*Никитин Роман Михайлович* - ведущий технолог, e-mail: [remnik@yandex.ru](mailto:remnik@yandex.ru)

*Roman M. Nikitin* – principal technologist

*Олейник Андрей Григорьевич* – д.т.н., зам. директора по научной работе,

e-mail: [oleynik@imm.kolasc.net.ru](mailto:oleynik@imm.kolasc.net.ru)

*Andrey G. Oleynik* - Dr. of Sci. (Tech.), Deputy director

УДК 004.942

**А.В. Вицентий**

Институт информатики и математического моделирования Кольского НЦ РАН,  
Кольский филиал ПетрГУ

**ОГРАНИЧЕНИЯ ДАННЫХ ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЦЕДУР ДЕКЛАРАТИВНЫХ  
МОДЕЛЕЙ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ  
ПРОЦЕССОВ ОБОГАЩЕНИЯ\***

**Аннотация**

В работе проводится оценка ограничений декларативной модели на примере прогнозирования параметров производственного процесса флотации. Рассматриваются требования к точности результатов и времени работы модели при ограниченных вычислительных ресурсах.

**Ключевые слова:**

*обогащение руд, прогнозирование, ресурсоемкость.*

**A.V. Vicentiy**

**RAW DATA CONSTRAINTS IN PROCEDURES REALIZATION OF ORE  
CONCENTRATION PRODUCTION PROCESSES PARAMETERS PREDICTION  
DECLARATION MODELS**

**Abstract**

In this paper the declaration model constraints are appraised for instance of parameters prediction flotation production processes. The results accuracy requirement and model running time are considered under scarce computational resources.

**Keywords:**

*ore concentration, parameters prediction, resource-demand.*

Обычно, все добываемые руды не удовлетворяют требованиям производства не только по крупности, но и, в первую очередь, по содержанию основного компонента и различных примесей, а потому нуждаются в обогащении.

Под обогащением руды понимают совокупность методов разделения металлов и минералов друг от друга по разнице их физических и/или химических свойств. Природное минеральное сырьё, которое представляет собой естественную смесь ценных компонентов и пустой породы, перерабатывается с целью получения концентратов, существенно обогащенных одним или несколькими ценными компонентами. Обогащение руды является сложным процессом, который может включать такие операции как дробление, измельчение, флотация, обезвоживание и другие физико-химические методы. Полученные продукты классифицируются на два и более класса отличных по качеству, более богатый продукт называют концентратом, самый бедный - хвостами, продукты со средним содержанием называют промежуточными, они обычно возвращаются на переработку. Обогащение руды, как правило,

---

\* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и правительства Мурманской области (проект № 12-07-98800-р\_север\_а).

производится на горно-обогатительных фабриках и комбинатах, представляющих собой сегодня мощные высокомеханизированные предприятия со сложными технологическими процессами, широко использующими различного рода SCADA-системы (автоматизированные системы сбора данных и осуществления оперативного диспетчерского управления) [2, 3].

На территории Мурманской области имеются месторождения комплексных апатит-нефелиновых руд Хибинского массива, расположенного в центральной части Кольского полуострова, являются крупнейшими в мире по запасам апатита, которые в настоящее время составляют около 4,16 млрд. т. Добычу и переработку руды осуществляет ОАО «Апатит», являющееся крупнейшим в мире предприятием по производству апатитового концентрата и основным поставщиком фосфорсодержащего сырья в России.

В состав ОАО «Апатит» входят 4 рудника, обрабатывающие 6 месторождений (Плато Расвумчорр, Апатитовый Цирк, Кукисвумчоррское, Юкспорское, Коашва и Ньоркпахкское), промышленные запасы которых по категориям А+В+С1 составляют 2,23 млрд. т. руды с содержанием  $P_2O_5$  15,01 %, 2 обогатительные фабрики и 25 вспомогательных цехов. Предприятием выпускаются апатитовый концентрат трех сортов, нефелиновый, сиенитовый, сфеновый, титаномагнетитовый и эгириновый концентраты [4].

Хибинские апатит-нефелиновые руды характеризуются 12 основными типами руд с содержанием апатита от 10 до 74 %, нефелина от 12 до 51 %, имеющими разную обогатимость. За годы работы ОАО «Апатит» с 1929 г. были отработаны запасы с наиболее богатыми типами руд и бортовое содержание  $P_2O_5$  снизилось с 25 % до 4 %, а содержание в перерабатываемой руде с 29 % до 13,6 %. В настоящее время доля бедных по  $P_2O_5$  типов руд в добыче возросла и, соответственно, снизилась обогатимость руд. Кроме того, утяжеляющим фактором явилось внедрение на АНОФ-2 в 1978-1981 г. оборотного водоснабжения, что привело к резкому росту расходов флотационных реагентов и снижению товарного извлечения [4].

Систематическое снижение содержания  $P_2O_5$  в руде приводит к снижению эффективности обогащения, увеличению объемов добычи и переработки руды, снижению рентабельности производства апатитового и нефелинового концентратов.

Таким образом, актуальность работы обусловлена необходимостью совершенствования технологии производства апатитового концентрата и комплексного обогащения апатит-нефелиновых руд для сохранения и повышения рентабельности обогатительного производства в условиях снижения содержания  $P_2O_5$  в руде, ухудшения обогатимости руды, увеличивающихся затрат на добычу руды и ее переработку.

Целью данной работы является изучение ограничений декларативной модели прогнозирования основных параметров процесса обогащения (на примере флотации апатит-нефелиновых руд) до момента реализации основных процедур расчетов. Оценке, прежде всего, подлежит тот объем исходных данных, которые можно загружать в модель с целью получения оперативного прогноза в режиме квазиреального времени при условии гарантированного получения результатов, удовлетворяющих предъявляемым требованиям, как по точности, так и по времени. Для практического применения, с учетом длительности технологического процесса флотации и его инерционности [5], нет

необходимости накладывать на модель требования функционирования в режиме жесткого реального времени. Прогнозирование значений ключевых характеристик продуктов обогащения на основе текущих данных оперативного мониторинга производственного процесса, а также определение и анализ вариантов корректирующих управляющих воздействий при угрозах отклонения выходных характеристик от заданных значений допустимо проводить в течение 10-15 минут. Таким образом, проектируемая система решает задачу быстрее, чем происходят значимые изменения в технологическом процессе.

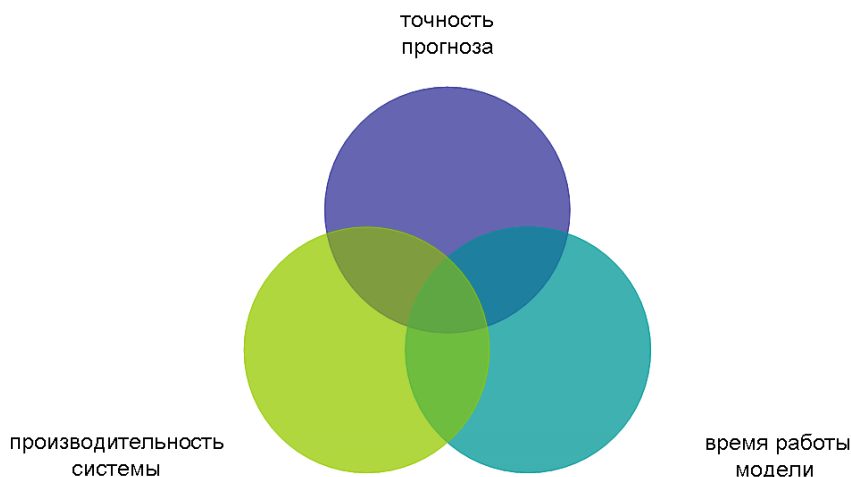
Так как на данный момент речь в работе идет о декларативной модели, которая не содержит в явном виде ни описания основных алгоритмов обработки данных, ни описания выполняемых процедур, то сложно судить о такой характеристике модели, как ее ресурсоемкость при выполнении основных расчетов. С другой стороны, можно говорить о том, что ограничения на вычислительные ресурсы и допустимое время работы модели можно определить достаточно точно, чтобы дать примерную оценку общей производительности модели, на основе которой в дальнейшем можно будет судить о максимально допустимом объеме исходных данных при требуемой точности построения прогноза.

Таким образом, предлагается дать оценку общей производительности модели, отталкиваясь не от некоторого объема исходных данных, а от таких параметров модели как: «требуемая точность прогноза», «производительность системы», «время работы модели». Получаемый в результате работы модели прогноз и его точность зависят, прежде всего, от используемых алгоритмов обработки данных внутри модели, а также от количества и качества самих исходных данных. При этом точность прогноза можно изменять в зависимости от различных параметров. Под производительностью системы будем понимать то количество операций в секунду, которое может обеспечить ее аппаратная часть. А максимально допустимым временем работы модели будем считать предельное время обработки данных, включая время на поступление исходных данных в модель, время на обработку этих данных и выдачу прогноза, и время на отправку управляющего воздействия, с учетом ограничения режима квазиреального времени. В связи с особенностями программно-аппаратной организации системы прогнозирования значений параметров, затратами времени на получение данных и отправку управляющих воздействий на практике можно пренебречь. Эти затраты являются незначительными по сравнению с затратами на работу модели и будут возложены на операционную систему общего назначения.

Для того чтобы работа модели укладывалась в квазиреальное время при ограниченных вычислительных ресурсах, необходимо будет уменьшать число параметров, которые будут проанализированы, что может привести в конечном итоге к снижению точности прогноза.

Для решения такой задачи, где существует конкуренция между точностью, производительностью и временем исполнения необходимо определиться в первую очередь с приоритетами и затем с возможными вариациями внутри указанной тройки «точность-производительность-время» (рис.).





*Диаграмма соотношения «точность-производительность-время»*

Известно, что вычислительные ресурсы системы, гарантирующие некоторый объем вычислений в секунду, являются фиксированной величиной и дополнительно выделяться не могут. Максимальное время обработки данных от их поступления до выдачи прогноза также ограничено требованием режима квазиреального времени. В такой ситуации единственным регулируемым параметром является точность результатов модели, которую она может выдать при заданных вычислительных ресурсах за жестко ограниченное время. Точность результатов моделирования в таких условиях может регулироваться объемом анализируемых данных. При этом модель должна быть адаптивной – настраиваемой в зависимости от существующих исходных данных.

Рассмотрим вычислительные ресурсы системы, которые будут использованы при обработке моделью исходных данных. Основу аппаратной части системы прогнозирования составляют графический процессор для универсальных высокопроизводительных вычислений Tesla C2070 со специализированным программным обеспечением и рабочая станция на базе процессора DualCore Intel Pentium D 820 2.8GHz с объемом оперативной памяти 1Gb и жестким диском 80Gb. Будем считать, что ресурсы процессора Tesla C2070 используются в основном для обчета данных модели, а все сервисные функции, такие как обеспечение работы операционной системы, прикладного обеспечения, получение и отсылка данных по сети обеспечиваются мощностями рабочей станции и при дальнейших расчетах этими затратами можно пренебречь.

Tesla - название семейства вычислительных систем NVIDIA на основе графических процессоров с архитектурой CUDA, которые могут быть использованы для научных и технических вычислений общего назначения. Tesla не может полностью заменить обычный универсальный процессор, но позволяет использовать вычислительный ресурс множества своих ядер для решения определенного круга ресурсоемких задач, которые позволяют независимую параллельную обработку данных. Примером такой задачи является и моделирование процесса флотации. Системы Tesla строятся на базе обычных

графических процессоров, но, в отличие от видеоускорителей, не имеют средств вывода изображения на дисплей. Являясь своего рода сопроцессором, Tesla может использоваться для создания вычислительных систем на базе персональных компьютеров, а также в составе серверов и вычислительных кластеров.

Вычислительные модули на GPU серии NVIDIA Tesla 20 превращают обычные ПК и рабочие станции в персональные суперкомпьютеры. Основанные на архитектуре NVIDIA CUDA® [7] под кодовым названием Fermi, графические процессоры Tesla позволяют достигать более 500 гигафлоп производительности при операциях с двойной точностью, 1 терафлоп при операциях с одинарной точностью, поддерживают защиту памяти ECC и КЭШ L1 и L2. Графические процессоры для универсальных вычислений серии Tesla 20 для рабочих станций обеспечивают производительность уровня небольшого кластера в настольной рабочей системе.

Рассмотрим важнейшие характеристики Tesla C2070 [6].

**GPU на основе массивно параллельной архитектуры CUDA.** Обеспечивает производительность кластера при затратах, составляющих 1/20 электроэнергии и 1/10 стоимости систем на основе самых последних четырехядерных CPU.

**448 ядер CUDA.** Обеспечивает пиковую производительность до 515 Гигафлоп при проведении операций двойной точности на каждом GPU, позволяя достигать суммарной производительности рабочей станции в Терафлоп или более. Пиковая производительность при проведении операций одинарной точности достигает Терафлопа на GPU.

**ECC память.** Удовлетворяет существенному требованию рабочих станций, обеспечивая высокую вычислительную точность и надежность. Обеспечивает защиту хранимой в памяти информации, повышая целостность данных и надежность приложений. Файлы реестра, L1/L2 кэш, память с совместным доступом и DRAM защищены ECC.

**Память до 6Гб GDDR5 на GPU.** Позволяет локально хранить большие объемы данных на каждом процессоре, увеличивая производительность до максимума и снижая циркуляцию данных внутри системы.

**NVIDIA Parallel DataCache.** Ускоряет выполнение алгоритмов, например, обработки физики, трассировки луча и умножения разреженных матриц, при неизвестных заранее адресах данных, включая настраиваемый кэш L1 на каждом блоке потоковых процессоров и унифицированный кэш L2 на всех процессорных ядрах.

**Механизм NVIDIA GigaThread.** Позволяет достигать максимальной производительности благодаря более быстрому переключению контекста (в 10 раз быстрее предыдущей архитектуры), параллельному выполнению команд ядра и улучшенной планировке блокирования потоков.

**Асинхронная передача данных.** Значительно увеличивает производительность системы, так как передача данных по шине PCIe происходит, даже когда вычислительные ядра заняты. Даже приложения, требовательные к передаче данных, могут выиграть в производительности благодаря предварительной передаче данных в локальную память.

**Среда программирования CUDA с поддержкой широкого списка языков программирования и API.** Существует поддержка таких языков как: C, C++, OpenCL, DirectCompute или Fortran и возможность использования параллельных вычислений и преимущества инновационной GPU архитектуры «Fermi». Разработчикам Microsoft Visual Studio доступен инструмент NVIDIA Parallel Nsight.

**Высокая скорость передачи данных с PCI-Express Gen 2.0.** Увеличивает пропускную способность канала между системой-хостом и процессорами Tesla. Позволяет системам Tesla работать с абсолютно любым PCIe-совместимым хостом с открытым слотом PCI-E x16 (табл.).

Основные технические характеристики Tesla C2070

Форм-фактор	9.75" PCIe x16
Количество GPU Tesla	1
Число ядер CUDA	448
Частота работы ядер CUDA	1.15 GHz
Производительность операций с плавающей запятой двойной точности (пиковая)	515 ГФлоп
Производительность операций с плавающей запятой одинарной точности (пиковая)	1.03 Тфлоп
Полный объем специальной памяти Tesla C2070	6 ГБ GDDR5
Частота памяти	1.5 GHz
Интерфейс памяти	384-bit
Пропускная способность памяти	144 Гб/с
Макс. потребление энергии Tesla C2050	238 Вт
Системный интерфейс	PCIe x16 Gen2
Система охлаждения	Активный вентилятор
Поддержка дисплеев Двухканальный DVI-I Максимальное разрешение дисплея @ Гц	1 2560x1600
Инструменты разработки ПО	Наборы инструментов для CUDA C/C++/Fortran, OpenCL, DirectCompute, NVIDIA Parallel Nsight™ для Visual Studio Наборы инструментов для CUDA C/C++/Fortran, OpenCL, DirectCompute, NVIDIA Parallel Nsight™ для Visual Studio

Зная, что пиковая производительность Tesla C2070 составляет один терафлопс и, учитывая, что в общем случае, соотношение максимальной и пиковой производительности варьируется в пределах около 70%, будем считать, что максимальная производительность составит около 0,7 терафлопс [8]. При этом время работы модели составляет около 15 минут, а результатом каждой операции будет 64 битное число с плавающей запятой. Тогда нетрудно подсчитать, что максимальный объем данных, который может быть обработан системой в идеальных условиях составит около 4584 терабайт.

Однако, несмотря на довольно большую производительность аппаратной части, окончательную оценку производительности системы в целом можно будет дать лишь после реализации основных алгоритмов расчетов и прогнозирования параметров, и оценки их классов сложности.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Развитие теории и практики комплексного обогащения апатит-нефелиновых руд Хибинских месторождений. – Режим доступа: <http://www.dissercat.com/content/razvitiie-teorii-i-praktiki-kompleksnogo-obogashcheniya-apatit-nefelinovykh-rud-khibinskikh-m> {1}
2. Абчук, В.А. Управление в гибком производстве / В.А. Абчук, Ю.С. Карпенко// Управление в гибком производстве. -М.: Радио и связь, 1990. - 128с.
3. Давидюк, Ю. SCADA-системы на верхнем уровне АСУТП / Ю. Давидюк // Intelligent enterprise – корпоративные системы, 2001.- №13. - С.30-35.
4. Файзуллин, Р.М. Минерагения и прогноз месторождений апатита / сост. Р.М. Файзуллин // Минерагения и прогноз месторождений апатита. - М.: Недра, 1991. – 256с.
5. Способ флотации апатитовых руд в условиях водооборота с применением регулятора “Неонол” / Сост.: В.А. Иванова, Ю.Е. Брыляков. Информационный листок 44-023-04 // Мурманский межотраслевой территориальный ЦНТИ и пропаганды, 2004. - № 44-015-04. - С.2.
6. TESLA™ C2050 / C2070 GPU Computing Process or Supercomputing at 1/10th the Cost. – Режим доступа: [http://www.nvidia.com/docs/IO/43395/NV\\_DS\\_Tesla\\_C2050\\_C2070\\_jul10\\_lores.pdf](http://www.nvidia.com/docs/IO/43395/NV_DS_Tesla_C2050_C2070_jul10_lores.pdf)
7. NVIDIA CUDA - неграфические вычисления на графических процессорах. – Режим доступа: <http://www.ixbt.com/video3/cuda-1.shtml>
8. Top 500 computer sites. – Режим доступа: <http://top500.org/lists/2011/11>

#### Сведения об авторе

*Вицентий Александр Владимирович* - к.т.н., научный сотрудник,  
e-mail: [alx\\_2003@mail.ru](mailto:alx_2003@mail.ru)  
*Alexander V. Vicentiy* - Ph.D. (Tech. Sci.), researcher

УДК 622.7:519.711.2

**В.Ф. Скороходов<sup>1</sup>, Р.М. Никитин<sup>1</sup>, А.Г. Олейник<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Горный институт Кольского НЦ РАН, Кольский филиал ПетрГУ

<sup>2</sup> Институт информатики и математического моделирования Кольского НЦ РАН, Кольский филиал ПетрГУ

## **ПРИМЕНЕНИЕ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ГИДРОДИНАМИКИ ПРОЦЕССА ФЛОТАЦИИ\***

### **Аннотация**

Представлены результаты вычислительных экспериментов над CFD моделью гетерогенной системы процесса флотации. Полученные результаты доказали возможность оценки технологических параметров флотации на основе вычислительных экспериментов. В работе использованы положения геоэнергетической теории А.Е. Ферсмана и кристаллоэнергетики с расчетом характеристических коэффициентов флотации узких флотационных фракций.

### **Ключевые слова:**

*компьютерное моделирование, флотация, гидродинамика фаз гетерогенной системы, поверхностная энергия, многофазный многоскоростной континуум, CFD-метод.*

**V.F.Skorokhodov, R.M. Nikitin, A.G. Oleynik**

## **THE COMPUTER MODELLING APPLICATION FOR RESEARCH OF FLOTATION PROCESS HYDRODYNAMICS**

### **Abstract**

The simulation based on CFD model of heterogeneous system of flotation process is presented in the article. The results demonstrated possibility to estimate by simulation process variables of flotation. The positions of the geopotential theory of A. E. Fersman and crystal power theory with calculation of characteristic factors of narrow flotation fractions of are used in the work for.

### **Keywords:**

*computer modeling, flotation, hydrodynamics of heterogeneous system phases, surface energy, multiphase multispeed continuum, CFD-method.*

Использование компьютерного моделирования при модернизации и создании обогащательного оборудования играет все большую роль в развитии горнопромышленной индустрии. Применение детально разработанных моделей многофазной гидродинамики в сочетании с растущим потенциалом вычислительных программ дает возможность оптимизировать труд исследователей и разработчиков обогащательного оборудования, сократить материальные и временные затраты при проведении лабораторных и промышленных испытаний.

В основе моделирования процессов разделения минеральных компонентов лежит математический аппарат современной вычислительной гидродинамики (CFD). При разработке CFD моделей ключевым звеном является выявление факторов, влияющих на эффективность моделируемых процессов. Адекватность условий однозначности математической модели сложных физических процессов, к которым относятся процессы разделения в многофазных средах, обеспечивает адекватность и верификацию результатов вычислительных экспериментов.

---

\* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и правительства Мурманской области (проект № 12-07-98800-р\_север\_a).

Факторы флотации – совокупность воздействий на твердые частицы гетерогенной системы процесса флотации (ГСПФ), обеспечивающих их разделение в рабочем объеме (камере) флотационной машины. Такое разделение основано на различиях инертных, структурных и поверхностных свойств, формы и рельефа твердых частиц. Движущим механизмом процесса флотации является селективная способность твердых частиц при контакте с поверхностью пузырька воздуха закрепляться на ней и флотировать (всплывать) вместе с пузырьком в слой пены. Такую способность называют флотируемостью [1]. В различной степени флотируемость присуща любым частицам и селективность процесса флотации при разделении частиц зависит от интенсивности факторов флотации в применяемой технологии обогащения.

Значение величины флотируемости оценивается исходя из термодинамических представлений о стремлении любой гетерогенной системы к равновесному состоянию за счет убыли поверхностной энергии границы раздела фаз.

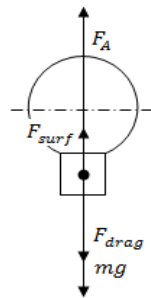
Флотация – сложно формализуемый вероятностный стационарный процесс. Классификации факторов флотации, определяющих ее вероятность, были предложены, например, в работах [2, 3]. Факт флотации может рассматриваться как следствие последовательных иерархически зависимых событий [4] и оцениваться вероятностью

$$\omega = \omega_C \omega_F \omega_P \omega_D , \quad (1)$$

где  $\omega_C = \omega_{Collision}$  – вероятность столкновения твердой частицы с пузырьком воздуха;  $\omega_F = \omega_{Fastening}$  – вероятность закрепления твердой частицы на поверхности пузырька воздуха;  $\omega_P = \omega_{Preservation}$  – вероятность сохранения частицы на пузырьке до выхода в пену;  $\omega_D = \omega_{Deduction}$  – вероятность удержания частицы в пене до ее съема в пенный продукт.

Процесс флотации можно рассмотреть с точки зрения баланса сил, приложенных к твердой частице в элементарной системе флотации, где значащими являются только вертикальные компоненты силовых воздействий, а гидродинамический режим флотации является ламинарным. Результирующая (сила флотации) сил, действующих на частицу:

$$F = F_A + F_{surf} - F_{drag} - mg , \quad (2)$$



где  $F_A$  – архимедова сила, действующая на агрегат твердой частицы и пузырька воздуха;  $F_{surf}$  – поверхностная сила, образующая периметр границы раздела твердая частица – воздух пузырька;  $F_{drag}$  – сила гидравлического сопротивления;  $mg$  – сила тяжести. Пусть  $a$  – характерный размер частицы,  $r_b$  – радиус пузырька воздуха,  $\rho_b$  – плотность воздуха,  $\rho_w$  – плотность воды,  $\rho$  – плотность частицы, тогда

$$F = \rho_w g \left( \frac{4}{3} \pi r_b^3 + a^3 \right) + P_a k - 6\pi\eta r_b v - g \left( \frac{4}{3} \pi r_b^3 \rho_b + a^3 \rho \right). \quad (3)$$

В стационарном режиме флотации можно принять, что скорость подъема агрегата  $v = const$  и вязкость воды  $\eta = const$ . Тогда для частиц узкой флотационной фракции:

$$F_i = Ak + B \left[ \frac{H}{\mu^3} \right] \quad (4)$$

где  $A$  – коэффициент, равный отношению эффективного равновесного периметра границы раздела твердая частица – воздух пузырька и объема твердой частицы,  $B$  – аддитивный член, учитывающий инертные свойства частиц узкой флотационной фракции. Вопрос нахождения величины  $F_i$  (характеристического коэффициента флотации узкой флотационной фракции) был решен аналитически на основе связи между значением энергии связи кристаллической решетки минерала и его поверхностной энергией. Такой подход был предложен А.Е. Ферсманом в рамках его геоэнергетической теории [5] и получил свое развитие в исследованиях группы сотрудников института «Механобр», возглавляемой В.В. Зуевым [6].

Геоэнергетическая теория А.Е. Ферсмана рассматривает энергию ионного взаимодействия в кристаллической решетке минерала, исходя из представлений о полном потенциале ионизации (энергетической константе,  $\epsilon_k$ ), присущем каждому входящему в решетку аниону или катиону. Большинство физико-химических свойств минералов может быть количественно описано с позиций удельных значений энергии ионного взаимодействия в кристаллической решетке. К этому числу относится и поверхностная энергия.

С точки зрения математического моделирования ГСПФ, ее особенностью является наличие магистральной фазы, в объеме которой вторичные фазы представлены совокупностями частиц объемом много меньше длин их свободного хода. Используя подход Эйлера к описанию ГСПФ, следует учесть, что число вторичных фаз ограничено. Магистральная фаза моделируемой ГСПФ – вода с добавлением реагентов собирателя. Первой из вторичных фаз является дисперсная газовая фаза, каждая частица которой обладает свойствами – пузырька воздуха. Отнесение каждой конкретной твердой частицы к какой-либо вторичной фазе модели зависит от положения величин физических и химических свойств этой частицы в интервалах соответствующих статистических распределений.

Первичные данные для формулировки условий однозначности математической модели ГСПФ – это данные о составе питания флотации, получаемые в результате гранулометрического, химического и минералогического анализов отобранной на моделируемом объекте пробы. Так же необходимой составляющей этих сведений является оценка раскрытия полезного минерала в классах крупности частиц. Таким образом, полный набор сведений о составе питания флотации состоит из  $i$  – классов крупности,  $j$  – минералов и  $k$  – сортов полезного минерала. При этом  $k = 1$  соответствует полезному минералу с минимальным содержанием примесей в виде сростков («чистый минерал») и  $k = k_{max}$  соответствует полезному минералу с максимальным содержанием примесей («сопутствующий минерал»). Для всех  $i$  определяются выходы  $\gamma_i$ . Используя известные материальные соотношения и данные о плотностях минералов, представленных в твердой фазе, результаты анализов следует сгруппировать во вторичные фазы математической модели, интегральные свойства которых отражают степень вхождения в них реальных минералов. Расчетные выходы классов крупности  $\gamma_{im}$  и содержания твердых позволяют определить их объемное содержание  $\beta_{vm}$  в представленном в модели потоке питания, что является основой, во-первых, условий однозначности

вычислительного эксперимента, во-вторых, частных решений для базовой системы уравнений.

Каждая из фаз модели, помимо признаков агрегатного состояния, характеризуется физическими свойствами (плотность, вязкость, дисперсность частиц) и взаимодействует с другими фазами модели (сопротивление, коэффициент восстановления, поверхностное натяжение). Определение фаз модели ГСПФ, таким образом, с точки зрения традиционного подхода, как веществ, находящихся в различных агрегатных состояниях, не может в полной мере характеризовать их.

ГСПФ рассматривается как стационарная система. К ней применимы законы сохранения массы, энергии и количества движения. Гидродинамическая модель Эйлера основана на связи этих законов и формализуется рядом соответствующих дифференциальных уравнений. При этом, исходя из пространственной ограниченности исследуемой ГСПФ, использование модели Эйлера позволяет сделать ряд существенных допущений касаясь как системы в целом, так и каждой фазы в отдельности:

- система изобарна, т.е. в каждой точке ее пространства, в каждый момент времени магистральная и любая из вторичных фаз испытывают постоянное равномерно распределенное давление;
- субстанциональные дифференциальные уравнения неразрывности и сохранения количества движения должны решаться для каждой фазы;
- в силу ничтожности энергии локальных колебаний твердых частиц около их центров тяжести по сравнению с кинетической энергией ГСПФ интегральной энергией таких колебаний возможно пренебречь;
- совокупности твердых частиц, представляющих любую одну из твердых фаз, движутся в элементарных объемах (конечных элементах) ГСПФ подобно потоку псевдо жидкой фазы. Тем самым в ГСПФ в любой момент времени можно выделить поток отдельной твердой фазы, который подобно реальной жидкости характеризуется свойством вязкости.

Каждая из фаз движется в объеме ГСПФ одновременно со всеми остальными фазами. Можно говорить о том, что в каждом элементарном объеме ГСПФ в каждый момент времени могут быть обнаружены частицы, представляющие с различной вероятностью, весь набор фаз. В зависимости от принадлежности к той или иной фазе, разные частицы испытывают неодинаковое влияние со стороны факторов флотации (т.е. обладают присущим этой фазе характеристическим коэффициентом флотации узкой флотационной фракции) и, в свою очередь, влияют на движение и магистральную, и иных вторичных фаз. Модель Эйлера учитывает этот эффект взаимного влияния движения фаз посредством введения различных математических моделей фактора сопротивления.

Явления вязкого трения и разница инерционных свойств различных фаз обуславливают даже при незначительных значениях скоростного режима потока формирование зон турбулентной активности. Турбулентность негативно влияет на процесс флотации, что объясняется резким снижением в ее зоне количества элементарных актов флотации в силу значительных разностей центробежных составляющих скорости дисперсной газовой и различных твердых фаз.



Если представить мгновенное состояние ГСПФ, то объем, занимаемый ею, большей частью содержит магистральную фазу и в меньшей степени, распределенные в нем вторичные фазы. На долю каждой вторичной фазы приходится лишь часть мгновенного объема ГСПФ. Фазы движутся, взаимопроникая друг в друга, образуя в совокупности многоскоростной многофазный континуум (ММК). Теория ММК оперирует понятием объемной доли  $\alpha_q$  каждой фазы, включая магистральную. Пусть  $V_q$  – объем  $q$ -фазы, тогда уравнение сохранения импульса применительно к рассматриваемой ГСПФ для случая взаимодействия фаз по типу жидкость-жидкость или газ-жидкость имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) + \nabla (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q \vec{v}_q) = \\ = -\alpha_q \nabla p + \nabla \bar{\tau}_q + \alpha_q \rho_q \vec{g} + \sum_{p=1}^n \vec{R}_{pq} \left[ \frac{\kappa^2}{c^2 M^2} \right], \end{aligned} \quad (5)$$

где  $p$  – давление равномерно распределенное между всеми фазами;  $\bar{\tau}_q$  – тензор напряжений  $q$ -фазы, учитывающий ее сдвиговую и объемную вязкость;  $\vec{R}_{pq}$  – сила взаимодействия между фазами ( $\vec{R}_{pq} = -\vec{R}_{qp}$ ;  $\vec{R}_{qq} = 0$ ):

$$\sum_{p=1}^n \vec{R}_{pq} = \sum_{p=1}^n K_{pq} (\vec{v}_p - \vec{v}_q); \quad K_{pq} = K_{qp}.$$

$K_{pq}$  – межфазный коэффициент обмена импульсом.

Уравнение (5) не предполагает межфазного массообмена и наличия внутри ГСПФ источников массы фаз. Кроме того, правая часть уравнения не учитывает роль т.н. эффектов подъема частиц в поле градиента скорости фазового потока. Такие эффекты существенны, если частицы вторичной фазы предполагаются сравнительно крупными или объединяются в виде плотноупакованных агрегатов. Так же вид правой части уравнения (5) показывает отсутствие влияния сторонних сил, которые побуждали бы частицы любой из вторичных фаз ускоряться относительно магистральной фазы.

Для взаимодействий типа пузырек газа – жидкость использована универсальная модель сопротивления с коэффициентом обмена

$$K_{pq} = \frac{\alpha_q \alpha_p \rho_p f}{\tau_p}, \quad (6)$$

где  $q$  – индекс жидкой фазы,  $p$  – индекс газовой пузырьковой фазы;

время релаксации пузырька:

$$\tau_p = \frac{\rho_p d_p^2}{18\mu_g};$$

функция сопротивления:

$$f = \frac{C_D Re}{24}, \quad Re = \frac{\rho_q |\vec{v}_q - \vec{v}_p| d_p}{\mu_g};$$

коэффициент сопротивления:

$$C_D = \frac{24}{Re} (1 + 0,1Re^{0,75});$$

эффективная вязкость жидкой фазы с учетом влияния компонентов ММК:

$$\mu_e = \frac{\mu_q}{1 - \alpha_p}.$$

Для взаимодействий типа твердая частица – жидкость использована модель сопротивления Вена и Ю с коэффициентом обмена

$$K_{sl} = \frac{3}{4} C_D \frac{\alpha_s \alpha_l \rho_l |\vec{v}_s - \vec{v}_l|}{d_s \alpha_l^{2,65}}, \quad (7)$$

где

$$C_D = \frac{24}{\alpha_l Re_s} [1 + 0,15(\alpha_l Re_s)^{0,687}], \quad Re_s = \frac{\rho_l d_s |\vec{v}_s - \vec{v}_l|}{\mu_l}.$$

Для взаимодействий типа твердая частица – пузырек газа использована модель сопротивления Шиллера и Науманна, определяемая по аналогии с универсальной моделью сопротивления за исключением вычисления коэффициента сопротивления и числа Рейнольдса для пары вторичных фаз:

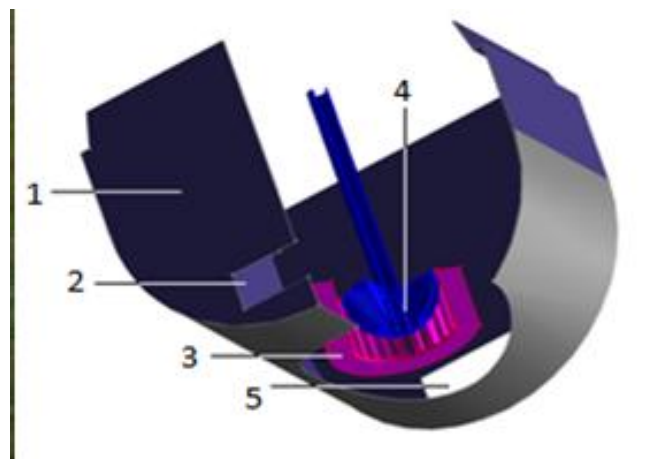
$$C_D = \begin{cases} 24(1 + 0,15Re^{0,687})/Re & Re \leq 1000 \\ 0,44 & Re > 1000 \end{cases}, \quad Re = \frac{\rho_{rp} |\vec{v}_r - \vec{v}_p|}{\alpha_p \mu_p + \alpha_r \mu_r} d_{rp}.$$

Для взаимодействий типа твердая частица – твердая частица использована симметричная модель сопротивления Сиамлала и О'Бриена без учета взаимного трения для разбавленных фаз с коэффициентом обмена

$$K_{ls} = \frac{3\alpha_s \rho_s \alpha_l \rho_l (d_l + d_s)^2}{2(\rho_l d_l^3 + \rho_s d_s^3)} |\vec{v}_l - \vec{v}_s|. \quad (8)$$

На основе приведенных положений CFD и теории ММК разработана CFD модель ГСПФ в камере флотационной машины ОК-38. Машины этого типа применяются, в частности, при проведении операции основной флотации нефелина на АНОФ-2 ОАО «Апатит».

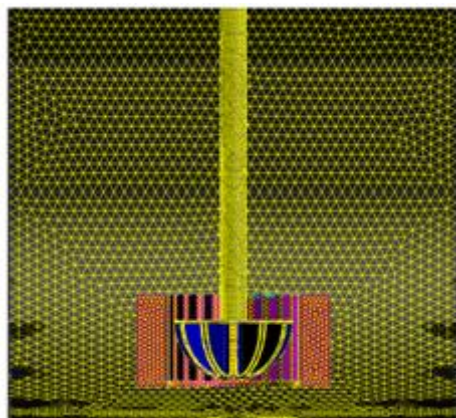
Модель создана в программной среде ANSYS Fluent с использованием в качестве сеточного генератора программы Gambit. Основой создания геометрического образа камеры явилась конструкторская документация, разработанная компанией Outokumpu. Геометрический образ включает в себя область пульпы до нижнего уровня захвата пеносъемных механизмов, зоны люка загрузки пульпы и люка выгрузки камерного продукта, подвижную область импеллера и область статора. Конструктивные элементы геометрического образа показаны на рис. 1.



*Рис. 1. Конструктивные элементы геометрического образа камеры флотационной машины ОК-38:*

*1 – камера; 2 – люк загрузки пульпы; 3 – статор; 4 – импеллер  
5 – люк выгрузки камерного продукта*

Расчетная сетка конечных элементов модели содержит соответственно для подвижной области импеллера 99109 ячеек, а для неподвижной области статора и камеры 397166 ячеек. Графическое изображение проекций части элементов расчетной сетки на поверхности областей модели представлено на рис. 2.



*Рис. 2. Графическое изображение проекций части элементов расчетной сетки на поверхности областей модели*

Подвижная и неподвижная области расчетной сетки имеют общую внутреннюю «стенку», состоящую из мнимых граничных поверхностей, не препятствующих движению потоков массы и распределению количества движения и энергии. Это позволяет эмулировать вращение области импеллера, воспринимаемой программной средой ANSYS Fluent замкнутой областью ячеек сетки, избегая пространственного перекрытия и деформации расчетной сетки.

Движение ГСПФ сопровождается формированием и разрушением областей турбулентности потока. Поэтому параметры модели для учета данного явления включают стандартную  $k-\varepsilon$  – модель турбулентности. Наиболее сложным этапом работы модели является период выраженного переходного процесса от состояния покоя до выхода системы на стационарный режим работы. Удовлетворительная сходимость модели при реализации этого процесса обеспечивается текущими настройками решателя по величине числа Куранта и временного интервала дискретизации расчета, определяющего точность вычислений.

В модели ГСПФ представлены четыре фазы: водный раствор ПАВ, диспергированный воздух, две твердые гранулированные фазы. Динамические характеристики модели по расходам пульпы и воздуха соответствуют технологической схеме, регламентирующей производство нефелинового концентрата на АНОФ-2. При проведении вычислительного эксперимента, взаимодействие фаз должно учитывать доминирование поверхностных сил над объемными силами, действующими на участвующие в процессе твердые фазы. Такой характер взаимодействия фаз обеспечивается применением названного выше метода количественной оценки поверхностной энергии минеральных зерен и последующего расчета величин характеристических коэффициентов флотации узких флотационных фракций. Поэтому условия однозначности модели и параметры эффектов парных взаимодействий частиц определены так, что твердые фазы, кроме рассчитанных по свойствам апатита и нефелина значений поверхностных энергий, отличаются так же плотностью и крупностью. Гидрофобная дисперсная фаза имеет более высокую плотность при более высокой крупности по сравнению с гидрофильной.

На рис. 3 представлен вид интерфейса программной среды ANSYS Fluent, демонстрирующий возможность одновременного вывода четырех рабочих графических окон.

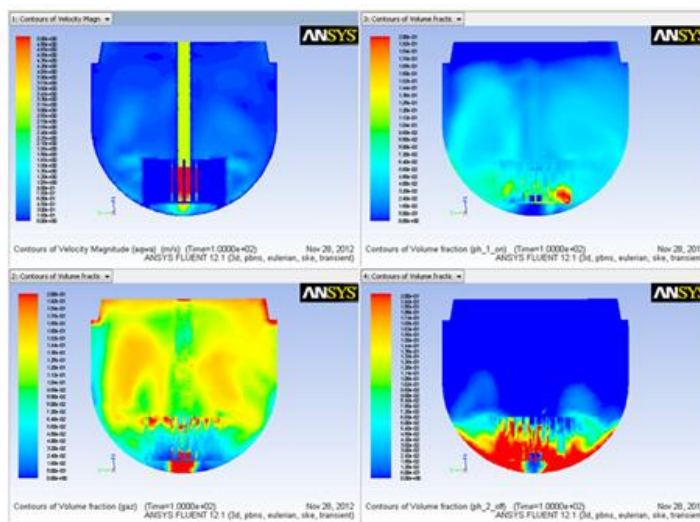


Рис. 3. Графический вывод поля скоростей магистральной фазы (окно 1) и полей распределения концентраций газовой, флотируемой и нефлотируемой фаз (окна 2,3,4)

В окне 1 представлено графическое изображение поля скоростей магистральной фазы по поверхностям осевого среза, статора и импеллера. Окна 2, 3 и 4 содержат графическое изображение полей распределения концентраций газовой фазы, флотируемой фазы и нефлотируемой фазы.

Полученный результат вычислительного эксперимента в целом подтвердил возможность применения характеристических коэффициентов флотации узких флотационных фракций и правильность формулировки условий однозначности модели ГСПФ. В результате вычислительного эксперимента, получено выраженное разделение твердых фаз с выносом гидрофобной фазы – более плотной и крупной к поверхности пенообразования и повышением концентрации в придонных слоях области пульпы и последующим выносом в зону люка выгрузки камерного продукта гидрофильной фазы.

Разработанный комплексный подход к оценке флотационных свойств компонентов питания обратной нефелиновой флотации, позволяет формулировать интегральные свойства псевдо фаз ММК флотации в рамках вычислительного эксперимента, проводимого с CFD моделями ГСПФ, адаптированными к эксплуатационным особенностям флотационной техники. В ходе исследования ММК флотации CFD моделированием обеспечена возможность производить оценку технологических параметров флотации, графически и в числовом выражении интерпретировать прогнозные характеристики моделируемого объекта, в режиме реального времени осуществлять корректировку и настройку режимов процесса разделения флотацией.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Тихонов, О.Н. Теория сепарационных процессов: учебное пособие / О.Н. Тихонов // Технический университет. -СПб, 2003. - Ч.1.– 98 с.
2. Классен, В.И. Введение в теорию флотации / В.И. Классен, В.А. Мокроусов. - М.: Госгортехиздат, 1959. – 636 с.
3. Богданов, О.С. Теория и технология флотации руд / О.С. Богданов, И.С. Максимов, А.К. Поднек и др. - М.: Недра, 1990. – 363 с.
4. Абрамов, А.А. Флотационные методы обогащения / А.А. Абрамов. - М.:Недра, 1984. – 382 с.
5. Ферсман, А.Е. Геохимия / А.Е. Ферсман. - М.-Л., ОНТИ, Химтеорет, 4 т. 1933-1939 г.
6. Зуев, В.В. Кристаллоэнергетика как основа оценки свойств твердотельных материалов /В.В. Зуев, Л.Н. Поцелуева, Ю.Д. Гончаров.- СПб, 2006. – 138 с.

#### Сведения об авторах

*Скороходов Владимир Федорович* - д.т.н., заведующий лабораторией новых обогатительных процессов и аппаратов, e-mail: [skorohodov@goi.kolasc.net.ru](mailto:skorohodov@goi.kolasc.net.ru)  
*Vladimir F. Skorokhodov* - Dr. of Sci. (Tech.), Head of laboratory

*Никитин Роман Михайлович* - ведущий технолог, e-mail: [remnik@yandex.ru](mailto:remnik@yandex.ru)  
*Roman M. Nikitin* – principal technologist

*Олейник Андрей Григорьевич* – д.т.н., зам. директора по научной работе, e-mail: [oleynik@iimm.kolasc.net.ru](mailto:oleynik@iimm.kolasc.net.ru)  
*Andrey G. Oleynik* - Dr. of Sci. (Tech.), Deputy director

УДК 004.9

**С.Ю. Яковлев**

Институт информатики и математического моделирования Кольского НЦ РАН,  
Кольский филиал ПетрГУ

## **БАЗОВАЯ СТРУКТУРНАЯ МОДЕЛЬ ОПАСНОСТЕЙ ПРОМЫШЛЕННО-ПРИРОДНОГО КОМПЛЕКСА**

### **Аннотация**

Для описания структуры техногенно-экологических опасностей регионального комплекса использован теоретико-множественный подход. На основе информации об источниках и объектах воздействия опасностей построены дискретные модели. Далее предполагается выполнить наращивание и исследование построенных моделей.

### **Ключевые слова:**

*опасность, промышленно-природный комплекс, структурная модель.*

**S.Yu. Yakovlev**

## **BASIC STRUCTURAL MODEL OF HAZARDS AT INDUSTRIAL-NATURAL COMPLEX**

### **Abstract**

A set theory approach to structure describing of regional complex industrial-natural hazards has been used. The discrete models have been constructed on the base of information about of hazard sources and recipients. Then it intends to carry out the models increase and investigation.

### **Keywords:**

*hazard, industrial-natural complex, structural model.*

### **Введение**

Одним из актуальных подходов к решению проблем снижения риска техногенных и природных катастроф является математическое моделирование, использование современных информационных технологий. При разработке математического описания опасностей необходимо учесть различную степень изученности опасных процессов и объектов, отсутствие статистически достоверной информации о вероятности и ущербе аварий, особенно крупных и редких. Для решения этой задачи предполагается использовать единый, для современных методов моделирования, теоретико-множественный подход. Настоящая работа посвящена, главным образом, созданию оригинальных дискретных моделей, обеспечивающих поддержку принятия решений по управлению промышленно-экологической безопасностью крупных предприятий и регионов (градообразующих предприятий, промышленно-природных комплексов). Работа опирается на выполненные ранее исследования [1-5], позволившие сформировать концептуальную модель управления безопасностью промышленно-природных систем, в том числе представить на содержательном уровне реляционную структуру потенциальных опасностей промышленно-природного комплекса (ППК). Далее эта структура описывается с помощью формального аппарата бинарных отношений.

## 1. Основные принятые определения

Наука об опасностях [6] – относительно молодая, бурно развивающаяся область знаний, в которой, несмотря на большое число публикаций, еще не сложилось единой общепринятой терминологии. В этих условиях очень важна последовательная непротиворечивая система понятий, охватывающая все этапы создания систем управления безопасностью и реализуемая в ходе выполнения этих этапов. Можно было бы привести формулировки основных терминов из федеральных законов и иных нормативов. Однако эти определения "плохо работают": они многословны, похожи друг на друга и неконструктивны. Поэтому на начальном этапе была сформирована (с опорой на исследования, прежде всего, П.Г. Белова [7], а также Н.Н. Брушлинского [8] и др.) система базовых понятий предметной области. При этом обеспечена непротиворечивость и взаимосвязанность понятий, предусмотрена возможность их формального (математического) описания. Далее приведены основные принятые в работе определения.

Опасность – это свойство кого (чего)-либо причинять кому (чему)-либо ущерб (вред). Таким образом, опасность – понятие качественное. Говоря об опасности, необходимо указывать как источник, так и объект воздействия опасности. Только в этом случае данное понятие имеет конкретный смысл.

Чрезвычайная ситуация, авария, несчастный случай – это проявления, реализации опасности.

Риск – количественная мера опасности. Риск может быть допустимый (приемлемый) и недопустимый (неприемлемый).

Безопасность – отсутствие недопустимого риска. Выделяются уровни безопасности, определяемые риск-показателями, экономическими и социальными факторами.

Управление безопасностью – выбор адекватного ситуации уровня безопасности.

## 2. Содержательное описание модели

Чрезвычайные ситуации (аварии, несчастные случаи) могут инициироваться техногенными, природными и социальными факторами (а также их сочетаниями), ущерб от аварий может быть причинен техносфере, природе, человеку. Это заставляет в качестве объекта анализа выбрать не только предприятие, но и окружающую природно-социальную среду, одним словом, промышленно-природно-социальную систему. Окружающая предприятие природно-социальная среда имеет пространственные границы, определяемые возможным (опасным) воздействием на неё предприятия и воздействием среды на предприятие.

Выполняется анализ техногенной, природной и социальных составляющих опасности. При этом для уровней предприятия, подразделений, рабочих мест выявляются основные источники и объекты возможного воздействия ("мишени" [9], "приёмники") разнородных (техногенных, природных, социальных) опасностей. Описываются связи между источниками и объектами, выполняется анализ опасностей и рисков. Для характеристики структуры проявления потенциальных опасностей вводится в рассмотрение таблица (матрица) "источники опасностей – объекты воздействия опасностей".

Элементы таблицы (называемые далее клетками) могут быть, в зависимости от целей исследования (управления), подвергнуты дальнейшему анализу, и также, в общем случае, представляют собой таблицы. Каждая клетка таблицы отличается своим характером взаимодействия (элементов пар "источник-объект") и своими риск-показателями. Авария на каком-либо объекте или производстве в составе предприятия может затрагивать некоторую совокупность клеток таблицы. Степень детализации зависит от уровня иерархии управления безопасностью.

Таким образом, строится иерархическая реляционная структура, характеризующая безопасность предприятия. Такая многоуровневая система вложенных таблиц "источники опасностей – объекты воздействия опасностей" представляет собой иерархическую реляционную модель проявления потенциальных опасностей регионального промышленно-природного комплекса. Условный упрощённый пример таблицы приведён на рис. 1, при этом опасности соответствует знак плюс, безопасности – знак минус.

Теперь перейдём к формальному описанию предметной области на основе теоретико-множественного подхода.

Приёмники Источники	1	2	3	4
1	+	-	-	-
2	-	-	-	+
3	-	+	-	+
4	-	-	-	-

Рис. 1. Таблица опасностей (пример)

### 3. Построение модели

#### 3.1. Методика построения модели

В рамках п. 2 определено множество (промышленных, природных, социальных, смешанных) объектов, имеющих отношение к безопасности предприятия. Это множество – универсум – конечно. Из него выделено конечное подмножество объектов – источников опасностей (потенциальные субъекты воздействия, опасные объекты):  $S = \{s_1, s_2, \dots, s_m\}$ . Для каждого источника может быть определено конечное подмножество (универсума) потенциальных "приёмников" опасностей (потенциальные объекты воздействия, "жертвы", "мишени"). Объединение подмножеств "приёмников" образует конечное подмножество  $R = \{r_1, r_2, \dots, r_n\}$ . Тем самым задано отображение (соответствие)  $A: S \rightarrow R$ . Далее конструируется несущее множество – объединение  $O = S \cup R$ . Один и тот же объект может быть одновременно и источником, и приёмником, т.е. попасть в оба множества. Значит, в общем случае  $S \cap R \neq \emptyset$ . На несущем множестве  $O$ , таким образом, определено множество упорядоченных пар  $(s, r)$ , где  $s \in S$  – источник,  $r \in R$  – приёмник ( $s, r \in O$ ). Тем самым на  $O$  задано отношение  $H$  – подмножество декартова произведения  $H \subseteq O \times O$ . Каждый элемент  $H$  – это упорядоченная пара  $(s, r)$ . Назовём это отношение отношением опасности. Если  $(s, r) \in H$ , будем записывать этот факт в виде соотношения  $sHr$ , и говорить, что  $s$  находится в отношении  $H$  с  $r$ , или, короче,  $s$  опасен для  $r$ . На рис. 2 представлено схематическое изображение отношения опасности.



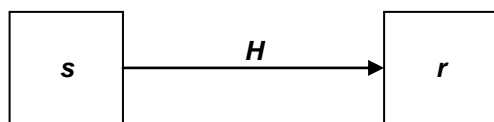


Рис. 2. Элементарное отношение опасности

Множество  $O$  с заданным на нём отношением опасности  $H$ , т.е. упорядоченную пару  $(O, H)$ , назовём базовой (первичной, исходной) структурной моделью опасностей ППК:  $M = (O, H)$ .

Наряду с табличным (рис. 1), можно предложить ещё два – графический и матричный – способа описания (представления) модели.

Перенумеруем все элементы множества  $O$ :  $O = \{o_1, o_2, \dots, o_k\}$ . Каждый из элементов может быть и источником, и приёмником. Обозначение  $o_i H o_j$  означает, что в паре  $(o_i; o_j)$  первый элемент опасен для второго. Преимущество такого обозначения – равноправие всех элементов множества  $O$ .

Будем элементы множества  $O$  изображать точками на плоскости – вершинами будущего графа [10]. Каждую точку будем помечать натуральным числом – номером соответствующего объекта. Если выполняется отношение  $o_i H o_j$ , проводим дугу (стрелку) от вершины  $i$  к вершине  $j$ . Получим ориентированный граф  $G(M)$ , соответствующий модели  $M$ . Отличительное свойство графического представления – наглядность.

На рис. 3 приведён графический вариант (орграф потенциальных опасностей) базовой модели, соответствующий таблице рис. 1.

Построим квадратную таблицу (матрицу) размером  $k \times k$ . Строка номер  $i$  соответствует  $i$ -му элементу  $O$ ,  $j$ -й столбец –  $j$ -му элементу  $O$ . На пересечении стоит 1, если выполняется  $o_i H o_j$ , 0 – в противном случае. Пусть  $o_{ij}$  – элемент этой матрицы. Будем называть её матрицей опасностей. На рис. 4 приведена матрица потенциальных опасностей, соответствующая модели рис. 1, 3. В теории графов эта матрица именуется матрицей смежности и может включать в себя не только элементы 0 и 1, но и любое натуральное число, равное числу дуг, соединяющих соответствующие вершины. Поскольку на данном этапе принимается во внимание только факт наличия (или отсутствия) опасности, матрица опасностей может включать в себя только 0 и/или 1. Это означает, что граф опасностей не содержит кратных (параллельных) дуг. Матричное представление модели удобно для реализации на ЭВМ и в случае большого числа объектов (вершин графа).

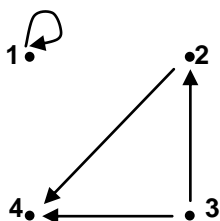


Рис. 3. Орграф базовой модели (пример)

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Рис. 4. Матрица опасностей (пример)

Можно также представить модель и в форме списка (перечня) дуг. Дугу, исходящую из вершины  $i$  и заходящую в вершину  $j$ , обозначим в виде упорядоченной пары  $(i; j)$ . Тогда модель рис. 1, 3, 4 можно записать в виде:  $M = \{(1; 1), (2; 4), (3; 2), (3; 4)\}$ . Преимущество такого описания базовой модели – краткость.

Описанный конструктивный способ определения (построения) модели представляет собой, по существу, методику получения и обработки экспертных знаний, ориентированную на формирование базовой модели.

Для упрощения записи будем далее обозначать элементы множества  $O$  строчными латинскими буквами:  $x, y, z \in O$ .

Теперь обсудим некоторые свойства построенного отношения (базовой модели) опасности.

### 3.2. Свойства отношения опасности

1. Рефлексивность. Здесь надо выяснить вопрос, выполняется ли в общем случае отношение  $xNx$ , или, в содержательном плане, опасен ли объект для себя. Если мы рассматриваем промышленные аварии, то, авария на данном объекте во многих случаях может причинить существенный ущерб и самому этому объекту (вывести его из режима нормального функционирования, штатного исполнения своего предназначения). Однако возможны ситуации (например, утечка химически опасного вещества), когда сам объект при этом существенно не пострадает. Поэтому отношение опасности в общем случае не является рефлексивным. Ясно, что оно не является и антирефлексивным. Отметим, что на множестве  $O^2 = O \times O$  можно выделить рефлексивное и антирефлексивное подмножества (а на графе опасностей – соответствующие подграфы).

2. Симметричность. Отношение опасности в общем случае не является симметричным:  $xNy \neq yNx$ . Из того, что первый объект опасен для второго, в общем случае не следует, что второй опасен для первого. Также нельзя считать это отношение антисимметричным. Отметим, что на множестве  $O^2 = O \times O$  можно выделить симметричное и антисимметричное подмножества (на графе опасностей можно выделить соответствующие подграфы).

3. Транзитивность. Транзитивность подразумевает, что из  $xNy$  и  $yNz$  следует  $xNz$ . Итак, надо выяснить: если объект  $x$  потенциально опасен для объекта  $y$ , а  $y$  опасен для  $z$ , то опасен ли в общем случае  $x$  и для  $z$ . Допустим, произошла авария на объекте  $x$ , тогда при этом нанесён ущерб объекту  $y$ . Если происходит авария на объекте  $y$ , тогда наносится ущерб объекту  $z$ . При этом характер ущерба объекту  $y$  может быть таков, что при этом не обязательно пострадает объект  $z$ . Например, склад взрывчатых веществ (объекту  $y$ ) находится в зоне затопления гидротехнического сооружения (объект  $x$ ), а в зоне возможного поражения склада находится здание (объект  $z$ ). В результате аварии на гидротехническом сооружении пострадает склад, но взрыва не произойдёт, и здание не пострадает. Следовательно, отношение опасности в общем случае не является транзитивным. Не является оно (в общем случае) и антитранзитивным. В отношении опасности (в соответствующем орграфе) могут быть выделены транзитивные и нетранзитивные цепочки (тройки).

Опишем элементарные структуры, составляющие модель опасностей.

### 3.3. Элементарные структуры модели

Можно выделить следующие типовые элементы модели опасностей, имеющие содержательный смысл. Классификацию элементов можно провести по количеству объектов ППК (вершин графа). При рассмотрении этих структур удобна графическая форма представления.

#### *Одновершинные структуры*

Это структуры, включающие в себя одну вершину и входящие в неё, либо исходящие из неё дуги.

1. Петля. Это изолированный элемент, "замкнутый на себя", т.е. не имеющий иных источников и приёмников, кроме себя. В принципе такой элемент можно исключить из рассмотрения, но для теоретической полноты он может быть полезен. Петлю будем обозначать кружком:  $o$ . На рис. 3 элемент 1 – петля.

2. Хищник. Это элемент без петли, опасный для других, и не имеющий источников опасности. На рис. 3 элемент 3 – хищник. Элементы-хищники, при прочих равных условиях, это более опасные объекты. Хищника будем обозначать кружком с двумя исходящими стрелками:  $\leftarrow o \rightarrow$ .

3. Жертва. Это элемент без петли, не опасный для других, и у которого есть другие источники опасностей. На рис. 3 элемент 4 – жертва. Элементы-жертвы, при прочих равных условиях, это более уязвимые объекты. Жертву обозначим кружком с двумя входящими стрелками:  $\rightarrow o \leftarrow$ .

4. Транзит. Остальные элементы (имеющие ещё хотя бы один источник и хотя бы один приёмник), не имеющие петли, назовём транзитами. На рис. 3 элемент 2 – транзит. Транзит обозначим кружком с двумя стрелками, входящей и исходящей:  $\rightarrow o \rightarrow$ .

5. Смешанный тип. Это элемент с петлёй, имеющий ещё хотя бы одну (исходящую или входящую) дугу.

Очевидно следующее утверждение.

Утверждение. Других одновершинных структур нет.

#### *Двухвершинные структуры*

Это две различные (разноимённые) вершины и связывающие их дуги (одна или две). При рассмотрении этих структур связи элементов выделенной пары с другими элементами несущего множества игнорируются.

6. 2-путь или вектор. Это асимметричная структура, состоящая из двух вершин, связанных одной дугой. На рис. 3 можно увидеть векторы  $2 \rightarrow 4$ ,  $3 \rightarrow 2$ ,  $3 \rightarrow 4$ . Вектор обозначим двумя кружками и стрелкой:  $o \rightarrow o$ .

7. 2-контур или кольцо. Это симметричная структура, состоящая из двух вершин, связанных двумя противоположно направленными дугами. Обозначение кольца:  $o \leftrightarrow o$ .

Если несущее множество состоит из двух элементов, связанных в виде кольца, то для такой модели верна следующая элементарная теорема.

Теорема. Если отношение  $H$  транзитивно, то оно и рефлексивно.

Доказательство. Пусть  $x$  и  $y$  – элементы кольца. Для кольца справедливо  $xHy$  и  $yHx$ . В силу транзитивности  $H$  отсюда следует  $xHx$ , т.е. отношение  $H$  рефлексивно на элементе  $x$ . Аналогично доказывается рефлексивность для элемента  $y$ . Теорема доказана.

Таким образом, чтобы отношение опасности, задаваемое кольцом, было квазипорядком, достаточно, чтобы оно было транзитивным.

8. Смешанный тип – может включать в себя петли.

#### *Трёхвершинные структуры*

Это структуры, образованные тремя различными вершинами и связывающими их дугами, при этом нет изолированных вершин.

9. 3-путь. На графе этой структуре соответствует последовательность трёх вершин, соединённых двумя однонаправленными дугами. Таким образом, цепочки получаются в результате объединения "сонаправленных векторов". Ясно, что элемент-хищник не может быть никаким элементом цепочки, кроме начального, а элемент-жертва – никаким, кроме конечного. Обозначение цепочки:  $o \rightarrow o \rightarrow o$

10. 3-контур или 3-кольцо (треугольник). На графе этой структуре соответствует последовательность трёх вершин, соединённых тремя однонаправленными дугами. Обозначение 3-кольца:  $\Delta$ .

Аналогично, на основе теории графов, можно рассматривать более сложные структуры.

Теперь опишем типовые структурные модели опасностей.

#### *3.4. Типовые элементарные модели*

*Пустое отношение.* Нулевая матрица опасностей задаёт пустое отношение, что соответствует отсутствию опасностей (все объекты идентифицированы как неопасные). Соответствующий граф не имеет дуг.

*Полное отношение.* Если все элементы матрицы равны единице, имеем полное отношение, которое выполняется для всех пар. Это случай, когда "все опасны для всех", включая себя. Отношение опасности является рефлексивным и симметричным на множестве  $O^2 = O \times O$ . Граф опасностей имеет максимальное число дуг (включая петли). Для  $n$  объектов (вершин) это число равно  $n^2$ . Заметим, что такое определение полного отношения (и полного орграфа) не вполне соответствует принятому в теории графов. Именно, орграф называется полным, если он не имеет петель и каждая пара вершин соединена ровно одной дугой.

*Диагональное отношение.* Матрица опасностей единичная, граф включает в себя только петли. Это означает, что каждый опасный объект опасен только для себя, и не опасен для других объектов. В каком-то смысле эта ситуация является идеальной: когда в производстве нельзя вовсе обойтись без потенциально опасных объектов (а для больших предприятий так и есть), то желательно, чтобы в зону возможного поражения этих источников попало как можно меньше приёмников.

Заметим, что для перечисленных типов отношений вид матрицы не зависит от нумерации элементов множества  $O$ .

#### **Заключение**

Описанные модели могут быть построены при наличии минимальной информации о потенциальных опасностях предприятия, именно, информации об источниках опасностей и объектах их воздействия в техносфере, природной и социальной среде.

Далее предполагается:

- выполнить качественное и количественное исследование построенных моделей;
- выполнить наращивание базовых моделей с учётом возможной дополнительной информации об опасностях.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Yakovlev, S.Yu. Occupational Safety and Industrial Safety / S.Yu. Yakovlev // Barents Newsletter on Occupational Health and Safety. – Helsinki, 2001. – Vol.4, No.1. –pp.32-36.
2. Яковлев, С.Ю. Информационная модель управления промышленной безопасностью горно-химического комплекса / С.Ю. Яковлев, А.А. Рыженко, Н.В. Исакевич // Проблемы управления безопасностью сложных систем: Труды X междунар. конф., г. Москва, дек. 2002 г. / Под ред. Н.И. Архиповой и В.В. Кульбы. – М.: РГГУ – Изд. дом МПА-Пресс, 2002. -Ч. 2. – С.146-149.
3. Яковлев, С.Ю. Концептуальная модель системы поддержки принятия решений по управлению промышленно-экологической безопасностью градообразующего предприятия / С.Ю. Яковлев, А.А. Рыженко // Моделирование и анализ безопасности и риска в сложных системах: Труды междунар. науч. шк. МАБР-2003, г. С-Петеорбург, 20-23 августа 2003 г. – СПб.: Изд-во СПбГУАП, 2003. – С.424-430.
4. Яковлев, С.Ю. Информационные технологии поддержки промышленно-экологической безопасности регионов и предприятий / С.Ю. Яковлев // Информационные ресурсы России. – 2004. – № 2. – С.15-17.
5. Yakovlev, S.Yu. Risk assessment and control: Implementation of information technologies for safety of enterprises in the Murmansk Region / S.Yu. Yakovlev, N.V. Isakevich, A.A. Ryzhenko, A.Ya. Fridman. // Barents Newsletter on Occupational Health and Safety. – Helsinki, 2008. – Vol.11, No.3. -pp.84-86.
6. Kervern, G.-Y. "CINDINICS: The science of danger" / G.-Y. Kervern // The International Emergency Management and Engineering Conference (TIEMEC 1996), 28-31 May 1996. – Montreal, Canada. – pp.19-32.
7. Белов, П.Г. Семантика понятий "безопасность" и "риск" / П.Г. Белов // Безопасность труда в промышленности. – 1998. – № 2. – С.63-64.
8. Алехин, Е.М. Автоматизированное проектирование систем обеспечения безопасности больших городов / Е.М. Алехин, Н.Н. Брушлинский, Ю.И. Коломиец и др. // Проблемы безопасности при чрезвычайных ситуациях. ВИНТИ. – 1997. – № 7. – С.40-57.
9. Рагозин, А.Л. Общие положения оценки и управления природным риском / А.Л. Рагозин // Геоэкология. – 1999. – № 5. – С.417-429.
10. Оре, О. Теория графов / О. Оре – М.: Книжный дом "ЛИБРОКОМ"/URSS, 2009.

#### Сведения об авторе

*Яковлев Сергей Юрьевич* – к.т.н., старший научный сотрудник,  
e-mail: [Yakovlev@iimm.kolasc.net.ru](mailto:Yakovlev@iimm.kolasc.net.ru)  
*Sergey Yu. Yakovlev* – Ph.D. (Tech. Sci.), senior researcher

УДК 004.94

**В.Н. Богатиков, И.Е. Кириллов, И.Н. Морозов**

Институт информатики и математического моделирования Кольского НЦ РАН,  
Кольский филиал ПетрГУ

## **РАСПРЕДЕЛЕННАЯ АДАПТИВНАЯ МОДЕЛЬ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

### **Аннотация**

В данной статье представлено описание подхода к созданию распределенной трехуровневой имитационной модели сложных динамических систем. Рассматриваются проблемы, возникающие при моделировании и пути их решения.

### **Ключевые слова:**

*имитационное моделирование, агентные системы, нейросети.*

**V.N. Bogatikov, I.E. Kirillov, I.N. Morozov**

## **DISTRIBUTED ADAPTIVE MODEL FOR FORECASTING OF CHANGE OF TECHNOLOGICAL SYSTEMS PARAMETERS**

### **Abstract**

This article presents the description of the approach to creation of a distributed three-level simulation models of complex dynamic systems. Discusses the problems arising in modeling and ways of their solution.

### **Keywords:**

*simulation modeling, agent-based systems, neural networks.*

### **Введение**

Моделирование процессов функционирования больших, сложных систем различной природы всегда являлось важной задачей при управлении их развитием.

Моделирование представляет собой один из основных методов познания, является формой отражения действительности и заключается в выяснении или воспроизведении тех или иных свойств реальных объектов, предметов и явлений с помощью других объектов, процессов, явлений, либо с помощью абстрактного описания в виде изображения, плана, карты, совокупности уравнений, алгоритмов и программ [1].

Существует ряд сложностей при построении имитационных моделей, как больших технологических систем, так и систем социально-экономической направленности.

Первая особенность подобных систем, накладывающая ограничение на возможность построение адекватной имитационной модели, это их размерность. При большой размерности системы, для которой строится модель, размерность самой модели может сильно разрастаться и, следовательно, многократно должны увеличиваться мощности оборудования, на котором данная модель будет функционировать. Не всегда существует возможность использования мощного аппаратного комплекса для проведения моделирования.

Вторая проблема, возникающая при построении имитационных моделей, заключается в хроническом недостатке статистической информации для реализации, настройки и поддержки модели.

Третья сложность заключается в том, что любая крупная промышленная, социально-экономическая или любая другая система всегда является динамически изменяющейся, как по отношению к алгоритмам своего функционирования, так и по отношению к своей собственной структуре.

В данной статье предлагается подход, с помощью которого можно частично решить все три вышеперечисленные проблемы моделирования больших, сложных систем.

### Распределенное моделирование

Как было отмечено выше, если система, для которой решается задача построения имитационной модели, является сложной, распределенной на большом пространстве, а так же включает в свой состав разнородные элементы, функционирующие по неизвестным заранее алгоритмам, то возникают сложности с реализацией аппарата, функцией которого будет являться моделирование системы.

Одним из возможных подходов к решению задачи построения имитационной модели распределенных в пространстве и имеющих сложную структуру систем является подход на основе использования агентных технологий. Имитационная модель, построенная на базе агентов, позволит распределить вычислительную нагрузку на различные аппаратные единицы, являющиеся базой для функционирования агентов. Утрируя, можно сказать, что имитировать отдельный субъект, входящий в состав системы будет непосредственно агент, функционирующий в нем.

Таким образом, в качестве системы «механизмов» отвечающих за моделирование системы в целом и её субъектов в отдельности может выступать структура, вид которой представлен на рис. 1.

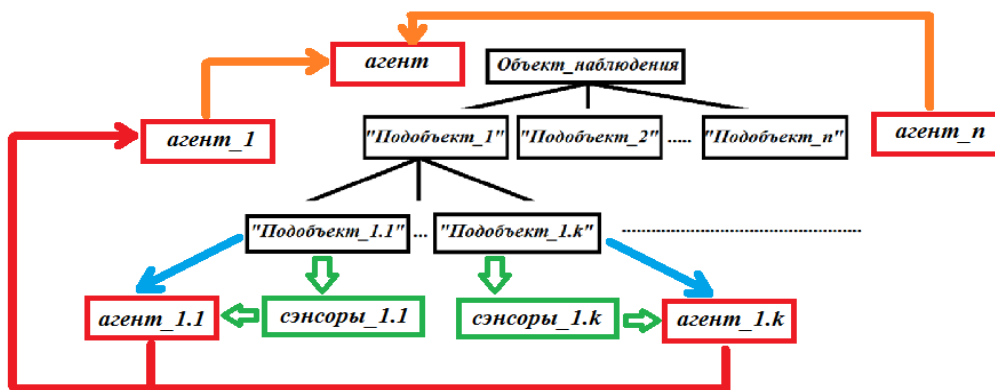


Рис. 1. Общая структура имитационной модели на основе агентных технологий

Данная структура состоит из программных агентов и определенного числа сенсоров, определяющих параметры субъектов системы, которые необходимо выделить в процессе декомпозиции до начала построения модели.

Сенсор каждого из субъектов, получает, тем или иным образом, входную информацию, необходимую для моделирования, и передает её агенту. Агент на основе полученной информации проводит моделирование с помощью определенного аппарата встроенного в него, и результаты моделирования передает на верхний уровень. На верхнем уровне следующий программный агент, на основе полученной информации с нижних уровней моделирует поведение всей системы в целом. В качестве дополнения следует отметить, что количество уровней выделенных в результате декомпозиции, будет зависеть от размерности самой системы, для которой строится модель.

Для моделирования любого субъекта может понадобиться ряд параметров, которые необходимо учитывать. Некоторые из них можно оценить непосредственно с помощью датчика агента, который в свою очередь будет определять состояние объекта, для определения других параметров могут понадобиться сенсоры, подключенные к объекту. Таким образом, агенты, каждого из «подобъектов» определяют их состояния (рис. 2).

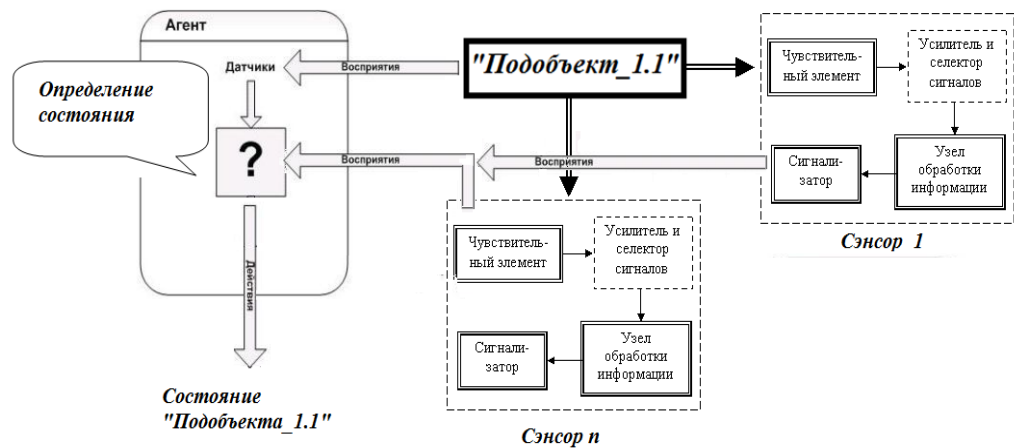


Рис. 2. Структура взаимодействия агентов и сенсоров для определения состояния объекта

Здесь в качестве сенсоров могут выступать как аппаратные устройства, считывающие и передающие информацию агенту в некотором формализованном виде, так и некоторые программные компоненты, служащие для обработки данных.

С технической точки зрения, в зависимости от сложности и распределенности системы, для реализации механизма моделирования всей системы можно использовать иерархическую структуру, состоящую из агентов, данная структура может быть двух или трехуровневой, на рис. 3 приведена трехуровневая структура.



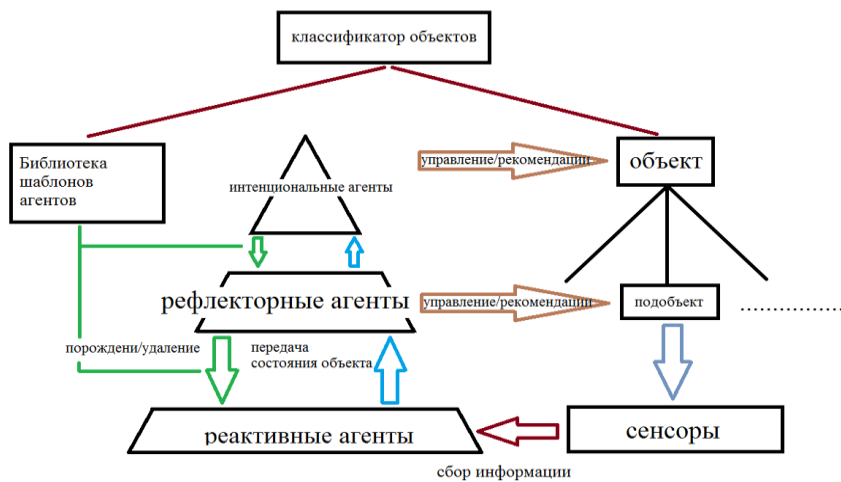


Рис. 3. Иерархическая структура определения и управления состояниями системы

На самом нижнем уровне функционируют реактивные агенты, порожденные агентами верхнего уровня, которые собирают информацию с сенсоров собирающих показания параметров субъектов нижнего уровня, преобразовывают её к определенному виду и передают агенту-родителю. Реактивные агенты не имеют ни сколько-нибудь развитого представления о внешней среде, ни механизма многошаговых рассуждений, ни достаточного количества собственных ресурсов. Реактивные агенты обладают очень ограниченным диапазоном предвидения. Они практически не способны планировать свои действия, их структура обратной связи, не будет содержать механизмов прогноза.

На втором уровне, порождающем реактивные агенты функционируют агенты, порождаемые верхним уровнем, агенты данного типа называется рефлекторными, они управляют жизненным циклом реактивных агентов и обрабатывают информацию, полученную от них. Рефлекторные агенты не имеют внутренних источников мотивации и собственных целей, а их поведение характеризуется простейшими (одношаговыми) выводами или автоматизмами [2]. Они представляют собой граничный случай понятия когнитивного агента и могут использоваться как «вспомогательные агенты». Данные агенты способны отвечать на вопросы и выполнять задания, которые ставят перед ними другие агенты, но решение этих задач не приводит к появлению у них собственных целей. Типичными примерами таких вырожденных агентов являются системы поиска в базах данных и простейшие логические регуляторы.

На самом верхнем уровне находятся интенциональные агенты, которые являются родителями агентов второго уровня, а так же принимают основные решения для реализации целей моделирования системой. Подобные агенты наделены собственными механизмами мотивации. Это означает, что в них так или иначе моделируются внутренние убеждения, желания, намерения и мотивы, порождающие цели, которые и определяют их действия [2].

Данная структура подходит для оперативного моделирования поведения системы в целом и её подобъектов. Следует отметить, что качество результатов моделирования будет зависеть в первую очередь от аппарата моделирования интегрированного в агентов различных уровней. Таким образом, применения агентных технологий позволит распределить вычислительные мощности, для проведения численного эксперимента, а так же в режиме реального времени осуществлять сбор статистической информации непосредственно с субъектов моделирования.

### Использование нейросетей как аппарата моделирования

Основной задачей имитационного моделирования является прогнозирование изменения различных параметров системы или объекта, для которых строится модель. На сегодняшний день существует огромное количество различных методов прогнозирования, их классификация приведена на рис. 4.



Рис. 4. Классификация методов прогнозирования

В большинстве случаев в агенте определенного уровня, в зависимости от структуры системы управления можно реализовать многие из известных методов, за исключением методов, при применении которых необходимо участие эксперта, но при этом возникает ряд сложностей с программной реализацией методов и с их точностью. Основной недостаток при применении большинства методов прогнозирования связан с их «статичностью» по отношению к динамически изменяющимся системам.

Система, для которой строится прогноз, со временем может изменять свою структуру, алгоритм функционирования или какие-либо свойства, но при этом прогнозирование будет осуществляться по заданному в прошлом алгоритму, что существенно ухудшит качество его результатов. Для того что бы избежать данного недостатка можно снабдить агенты механизмом прогнозирования на основе использования нейросетей.

Достоинством использования нейросетей как механизмов прогнозирования является гибкость их структуры и способность к самообучению, что позволяет приспосабливаться к изменениям, происходящим в системе для которой производится прогноз.

Различают многошаговый и одношаговый прогноз.

Многошаговым прогнозом называют долгосрочный прогноз, цель которого состоит в определении основного тренда, для некоторого фиксированного промежутка времени в будущем. При этом прогнозирующая система (в нашем случае - нейронная сеть) использует полученные прогнозные значения временного ряда для выполнения дальнейшего прогноза, то есть использует их как входные данные.

Одношаговым прогнозированием называют краткосрочный прогноз (на один шаг), при этом для получения прогнозированной величины используют только фактические данные. Ясно, что одношаговое прогнозирование более точно, но оно не позволяет выполнять долгосрочные прогнозы.

Вариант того или иного вида прогнозирования выбирается в зависимости от условий задачи в которой он осуществляется.

Следует отметить, что применение нейросетевых методов прогнозирования имеет перспективный характер использования в различных сферах человеческой деятельности. Использование данного вида прогнозирования совместно с агентными технологиями позволяет снизить интеллектуальные и временные затраты на сбор и обработку статистической информации, а так же повысить эффективность принятия управленческих решений.

Так же особенностью данного подхода является то, что в результате разработки подобной агентной системы с механизмом прогнозирования на основе нейросетей может быть получена не просто информационная система, выполняющая определенные функции, а динамическая по своей структуре и свойствам «модель реального времени», которая автоматически будет совершенствовать механизм своей работы и структуру.

### **Проектирование системы моделирования на основе агентов**

При проектировании системы моделирования описанной выше затруднительно обойтись без применения специфического программного обеспечения, предназначенного для проектирования. Применение подобного программного обеспечения объясняется рядом причин, которые затрудняют и замедляют разработку ПО:

1. Сложность и неоднородность, рассматриваемой предметной области.
2. Выполнение средой большого объема задач, и как следствие сложность самого ПО.
3. Большой объем программного кода, и как следствие необходимость продолжительного времени затраченного на разработку.
4. Необходимость хранения большого объема информации.

Весь спектр вышеперечисленных проблем присутствует в реализации программного комплекса для моделирования сложных, распределенных, динамических систем. Поэтому возникает необходимость применения специфических средств разработки ПО, позволяющих ускорить и упростить работу проектировщика, за счет частичной автоматизации его действий.

В качестве подобного средства разработки может быть выбрана среда RationalRose, поддерживающая нотацию UML.

Язык UML (универсальный язык моделирования), предназначен для описания моделей, на основе которых есть возможность автоматической генерации программного кода [3].

UML не зависит от объектно-ориентированных языков программирования, поскольку может поддерживать большинство из них, в частности C++, Си, Pascal и т.д. Этот язык не зависит от используемой методологии разработки проекта.

Созданные на UML диаграммы позволяют существенно упростить действия всех разработчиков за счет своей простоты и наглядности, а также сократить временные затраты.

UML является открытым и обладает средствами расширения базового ядра. На UML можно содержательно описывать классы, объекты и компоненты в различных предметных областях, сильно отличающихся друг от друга.

Одним из основных шагов проектирования с использованием нотации UML является построение диаграммы сценариев, которая в полной мере описывает функции выполняемые ПО. На рис. 5 приведена общая диаграмма сценариев для реализуемого программного обеспечения.

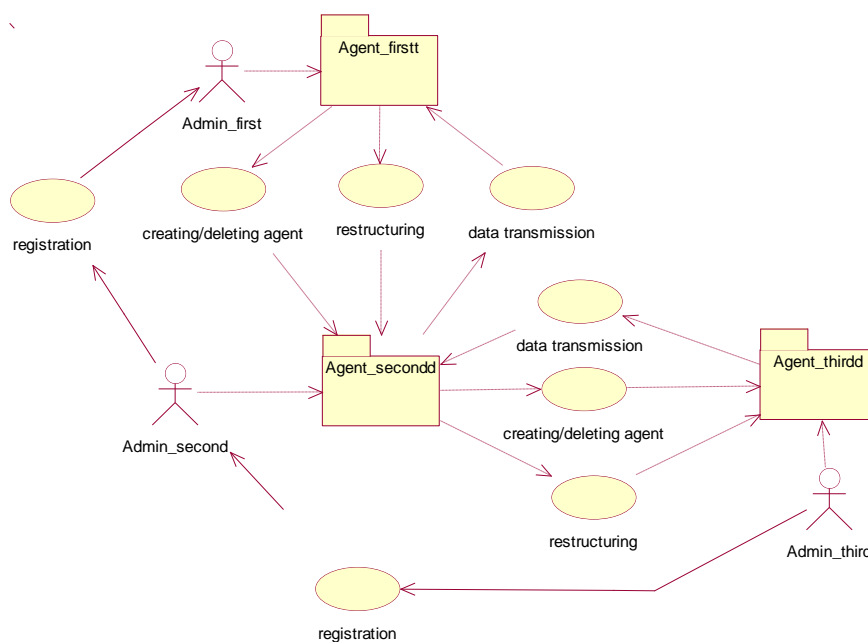


Рис. 5. UseCase diagram программной системы

Требования, которые принимаются на данном этапе, заключаются в следующем:

1. Проведение анализа списка всех возможных операций, выполняемых системой, для последующей их реализации. Проектируемая система должна выполнять ряд основных функций:

- a) заполнение БД;
- b) решение задачи прогнозирования отдельных параметров элементов СПК и СПО;
- c) решение задачи определения состояния элементов системы;
- d) решение задачи определения состояния системы в целом;
- e) решение задачи определения управляющих воздействий для перевода системы из некоторого состояния в нужное.

2. Данные функции должны включать в себя ряд дополнительных сервисных функций, также в проектируемую систему необходимо включить ряд интерфейсных функций необходимых для удобства пользователя. В совокупности список сервисных и интерфейсных функций выглядит следующим образом:

- a) ввод данных;
- b) вывод данных;
- c) передача данных;
- d) запрос решения;
- e) ввод настроек;
- f) выбор конфигурации.

3. Провести декомпозицию системы на отдельные объекты, которые будут выполнять функции, выделенные на предыдущем этапе, в данном случае список выделенных объектов следующий:

- a) агенты первого, второго и третьего уровня;
- b) администраторы соответствующих агентов.

Администраторы агентов различных уровней несут только сервисные функции по обслуживанию работоспособности агентов, а сами агенты выполняют ряд сложных действий, поэтому имеют составную структуру и на рис. 5 показаны в виде пакетов.

Для каждого из агентов необходимо составить диаграмму использования, с целью определения их основных функций по отношению друг к другу. На рис. 6 приведена Use-case диаграмма агента верхнего уровня.

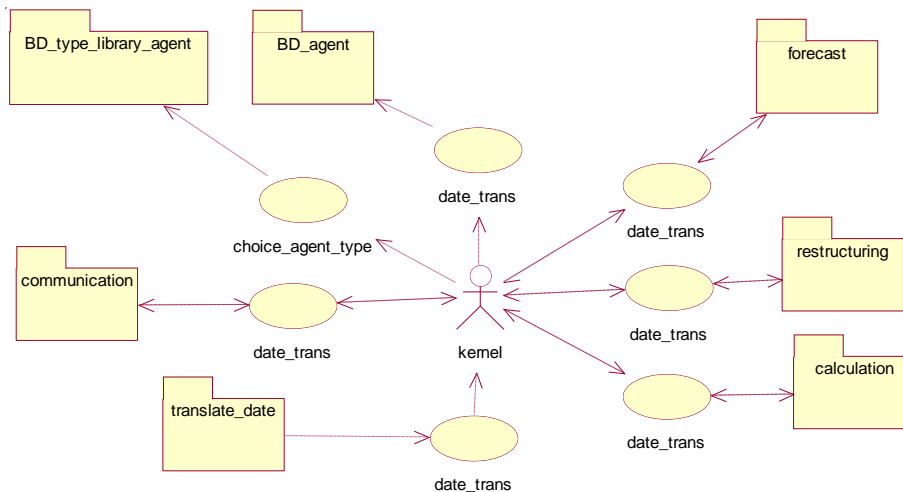


Рис. 6. Диаграмма использования агента верхнего уровня

В данной диаграмме основным элементом, управляющим всеми действиями агента, является ядро – kernel, через него будет проходить обмен информацией с другими агентами и обмен информацией между модулями решающими различные задачи. Ядро будет оценивать необходимость модификации агентов нижнего уровня, и проводить основные действия, связанные с моделированием. В общем случае последовательность действий может быть следующей:

- 1) регистрация субъекта в системе с помощью отправления заявки;
- 2) оценка ядром субъекта и генерация для него агента определенного типа из библиотеки шаблонов;
- 3) перемещение сгенерированного агента к субъекту;
- 4) сбор информации агентом и в зависимости от его типа:
  - a) передача информации на верхний уровень;
  - b) этап моделирования поведения субъекта, с соответствующей настройкой нейросети;
- 5) сохранение данных о пройденном 4 этапе;
- б) удаление части агента субъекта, отвечающей за моделирование, при этом остается «подагент», ожидающий появления новых данных;
- 7) при появлении новых данных переход к шагу 2.

На рис. 7 приведена диаграмма состояний ядра проектируемой системы, в которой наглядно отображаются режимы работы ядра и события, которые к ним приводят. Первоначально ядро находится в режиме ожидания (standby), после того как приходит заявка от субъекта на регистрацию в системе (registration), ядро по признакам которые присутствуют в заявке, выбирает стандартный шаблон агента из библиотеки (the choice of library), создает агента и пересылает его субъекту, после чего возвращается в режим ожидания.

Если приходит новая информация от уже функционирующего агента (getting information), то выбирается вся статистическая информация по данному агенту и его функционированию за весь период его существования (getting statistics) и проводится анализ, заключающийся в оценке точности прогнозов выдаваемых агентом и общем количестве собранной информации (analyze).

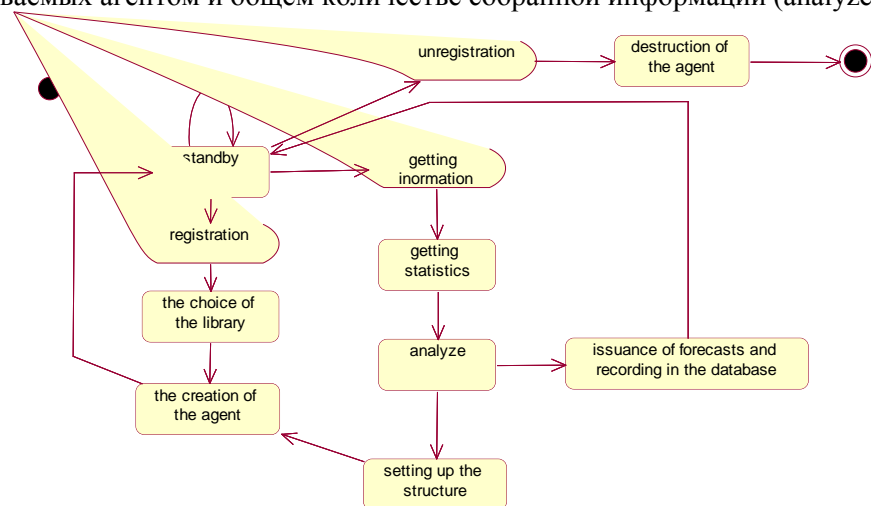


Рис. 7. Диаграмма состояний ядра системы

После проведенного анализа вся новая информация записывается в базу данных (issuance of forecasts and recording in the database) при необходимости проводится модификация агента (добавление новых слоев, перенастройка и т.д. setting up the structure) и система возвращается в режим ожидания. В случае, когда от субъекта приходит заявка на отказ от регистрации (unregistration) система удаляет существующего агента (destruction of the agent) и завершает свою работу с данным субъектом.

Таким образом, система сама будет выбирать необходимые типы агентов перемещаемых к субъектам, автоматически, с появлением новых данных, проводить настройку нейросетей, входящих в состав агентов (что приводит к большей гибкости и эффективности моделирования), и в течение всего времени функционирования улучшать качество выполняемых прогнозов.

### **Заключение**

В заключении следует отметить, что система агентов снабженная механизмом прогнозирования на основе использования нейросетей, будет обладать рядом весомых преимуществ по сравнению с другими подобными системами, и будет представлять собой распределенную в пространстве, динамическую, адаптационную, когнитивную модель.

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Лычкина, Н.Н. Имитационное моделирование экономических процессов: учебное пособие для слушателей программы МВИ / Н.Н. Лычкина. - Москва, Академия АйТи, 2005.
2. Классификация агентов. - Режим доступа:  
<http://www.aiportal.ru/articles/multiagent-systems/agent-classification.html>
3. Буч, Г., Якобсон, А., Рамбо, Дж. UML. Классика CS / Г. Буч, А. Якобсон, Дж. Рамбо.; пер. с англ. / под общ. ред. проф. С. Орлова.- 2-е изд. - СПб.: Питер, 2006. - 736 с.

### **Сведения об авторах**

*Богати́ков Валерий Николаевич* – д.т.н., ведущий научный сотрудник,  
e-mail: [vnbgtk@iimm.kolasc.net.ru](mailto:vnbgtk@iimm.kolasc.net.ru)  
*Valery N. Bogatkov* -Dr. of Sci. (Tech.), leading researcher

*Кири́лов Иван Евге́ньевич* - к.т.н., младший научный сотрудник,  
e-mail: [kirillovi@rambler.ru](mailto:kirillovi@rambler.ru)  
*Ivan E. Kirillov* - Ph.D. (Tech. Sci.), junior researcher

*Моро́зов Иван Николаевич* - к.т.н., младший научный сотрудник,  
e-mail: [moroz.84@mail.ru](mailto:moroz.84@mail.ru)  
*Ivan N. Morozov* - Ph.D. (Tech. Sci.), junior researcher

УДК 681.5

**В.В. Белош<sup>1</sup>, В.Н. Богатиков<sup>2</sup>, Т.А. Фильчакова<sup>3</sup>,**

<sup>1</sup> Чистопольский филиал Казанского национального и исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева

<sup>2</sup> Институт информатики и математического моделирования Кольского НЦ РАН, Кольский филиал ПетрГУ

<sup>3</sup> Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

## **ПОСТРОЕНИЕ СИСТЕМ ДИАГНОСТИКИ И УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТЬЮ В НЕЙРОСЕТЕВОМ БАЗИСЕ**

### **Аннотация**

Рассматривается структурная реализация системы диагностики состояний в нейросетевом базисе. Предлагается методика определения центра безопасности на основе решения задачи линейного программирования.

### **Ключевые слова:**

*оценка состояния, нечеткая логика, нейроматематика.*

**V.V. Belosh, V.N. Bogatikov, T.A. Filchakova**

## **CONSTRUCTION OF DIAGNOSTIC AND CONTROL SYSTEMS FOR THE TECHNOLOGICAL SAFETY IN THE NEURONETWORK BASIS**

### **Abstract**

A structural implementation of the diagnostic system for the states in the neuronetwork basis is considered. Methods based on the solution of the linear programming task are proposed to determine the safety center.

### **Keywords:**

*state estimation, fuzzy logic, neuromathematics.*

Методологические принципы построения системы диагностики состояний и управления технологической безопасностью, основываются на дискретных математических моделях, являющихся ядром системы диагностики состояний [1].

Принятие решений по управлению технологической безопасностью на основе диагностического многоуровневого анализа осуществляется с учетом возможных прогнозируемых состояний технологического процесса и информации о состоянии внешнего окружения.

### **Определение области и центра технологической безопасности на основе метода линейного программирования**

#### *Формирование области безопасности*

Основной задачей промышленных систем диагностики является своевременное обнаружение нарушений, которые приводят к внештатным ситуациям. Для того чтобы иметь возможность выявить возможное нарушение еще на ранней стадии его развития, необходима количественная оценка технологической безопасности. В работе рассматривается методика количественной оценки технологической безопасности на основе математического аппарата теории множеств.

Процесс функционирования любой системы можно рассматривать как последовательную схему смены ее состояний на некотором интервале времени ( $t_0, t_k$ ). Состояние системы в каждый момент времени  $t$  из этого интервала



характеризуется набором параметров этого процесса. Для функционирующего процесса можно определить область его номинальных режимов, или область работоспособного состояния, которая определяется, совокупностями параметров –  $Y = \{T_i, K_j, U_l\}$ : технологических –  $\{T_i, i=1 \dots I\}$ ; конструктивных –  $\{K_j, j=1 \dots J\}$ ; управления –  $\{U_l, l=1 \dots L\}$  (рис. 1).

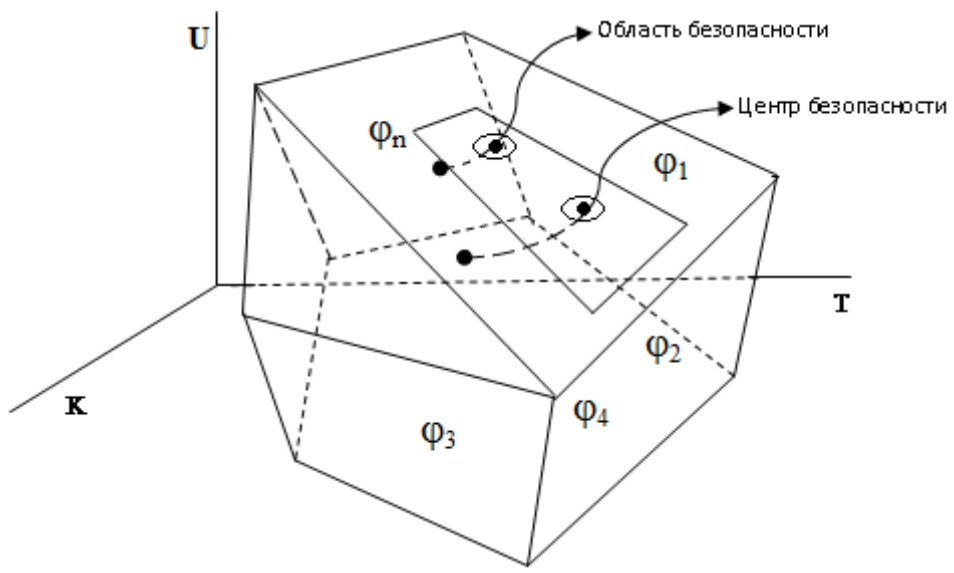


Рис. 1. Область работоспособного состояния процесса

На технологический процесс накладываются ограничения его рабочего функционирования  $\bar{\varphi}(T, K, U) \leq 0$ , зависящие от множеств параметров  $\{T_i, K_j, U_l\}$ , выход за эти ограничения означает переход процесса во внештатную ситуацию. Таким образом, эти ограничения, «вырезают» на множестве всех состояний процесса n-мерную область, в которой процесс не выходит во внештатные ситуации – это область всех работоспособных состояний процесса:  $S_p \subseteq S$ .

Определение области безопасности для класса непрерывных технологических процессов, рассмотренных выше, можно построить по методу разделения состояний. В конечном итоге по этому методу получаем систему линейных ограничений [1]:

$$(X_{iq}^<, z) < 0, (i=1, \dots, I), \tag{1}$$

$$(X_{iq}^>, z) > 0, (i=1, \dots, I), \tag{2}$$

или для квазидинамических режимов:

$$(X_{iq}^<(k), z(k)) < \Delta x(k+1), (i=1, \dots, I), \tag{3}$$

$$(X_{iq}^>(k), z(k)) > \Delta x(k+1), (i=1, \dots, I). \tag{4}$$

Эти системы высекают в пространстве параметров системы область работоспособных состояний (рис. 1). Эти ограничения, в данном случае, линейны.

Определения центра безопасности при линейных ограничениях сводится к задаче нелинейного программирования - необходимо максимизировать сумму расстояний от точки до границ области

$$\sum_{i=1}^{i=I} |d_i(\bar{z})| \rightarrow \max \quad (5)$$

при ограничениях (1), (2) или (3), (4).

*Описание алгоритма определения области центра безопасности*

• **Первый шаг**

Определение диапазонов значений коэффициентов матрицы  $A$  и свободных членов  $\mathbf{b}$ , в которых выполняются ограничения (1), (2) для  $x_{ik}^{(\min)} < x_i < x_{ik}^{(\max)}$ , ( $i=1, 2, \dots, I$ ;  $k=1, 2, \dots, K_i$ ).

**Постановка задачи.** При заданных ограничениях  $x^{(\min)}$  и  $x^{(\max)}$  найти диапазоны изменения коэффициентов системы  $a_{ij}^{(\min)}$  и  $a_{ij}^{(\max)}$  ( $i=1, I$ ;  $j=1, I$ ), а также  $b_i^{(\min)}$  и  $b_i^{(\max)}$  ( $i=1, \dots, I$ ) таким образом, чтобы была справедлива система ограничений (1), (2).

Здесь следует отметить, что подобного рода задачи часто встречаются при моделировании реальных систем. Как правило, бывают известны лишь диапазоны изменения переменных состояния  $x$ . В этом случае очень важно определить связь между текущими значениями переменных состояния и значениями, показываемыми контрольно-измерительным оборудованием. Эта связь может быть задана матрицей  $A$ , коэффициенты которой изменяются в некотором неизвестном диапазоне.

**Решение.** Предлагаемый метод решения осуществляет поиск ограничений перебором с переменным шагом. Для этого задаем начальное положение системы и определяем минимальное значение шага. Поиск проходит в два этапа – сначала ищется матрица максимальных значений коэффициентов, а затем минимальных.

Рассмотрим алгоритм поиска минимальных значений [2]. Максимальные значения ищутся аналогично.

Матрице  $A^{(\min)}$  присваивается начальное значение, определяемое заданными коэффициентами. Затем идет последовательное изменение (уменьшение) каждого коэффициента на величину шага, определяемую соответствующим значением матрицы шагов  $dA$  (для каждого коэффициента системы рассчитывается свой шаг, таким образом существенно повышается эффективность алгоритма). После изменения каждого коэффициента делается проверка, не вышло ли решение (1) за пределы искомого диапазона (о том, как делается эта проверка, будет сказано ниже). В случае, если проверка не дала положительного результата, выполняется откат – коэффициенту присваивается исходное значение. Далее вычисляется новый шаг для текущего коэффициента – увеличение вдвое, если проверка была пройдена успешно, или уменьшение вдвое в противном случае. Новое значение шага записывается в матрицу  $dA$ . В случае, если шаг оказался меньше заданного минимального значения, текущий коэффициент более не меняется.

После того, как будет сделан проход по всей матрице  $A^{(\min)}$ , программа анализирует матрицу шагов и смотрит, остались ли элементы, не достигшие предела. Если таковые найдены, процесс повторяется для этих элементов. Если же все элементы достигли предела, программа переходит к следующему этапу.

Проверка на принадлежность решения  $Ax + b = 0$  диапазону (2) для коэффициентов матрицы  $A$  и вектора  $b$  рассчитанных на очередной итерации производится следующим образом. Большое количество раз случайным образом генерируется система коэффициентов матрицы  $A$  и вектора  $b$  из текущего диапазона. Если в каждом случае решения системы выполняются ограничения (3) и (4), проверка считается удачно пройденной. Если же хотя бы при одной из попыток был выход решений за допустимый диапазон, проверка завершается неудачно.

При достаточно большом количестве испытаний надежность составляет 95% – 97%, что во многих случаях достаточно для практических расчетов.

**Алгоритм.** Приведенный выше метод решения может быть записан в виде следующего алгоритма.

Увеличиваем (при поиске минимума – уменьшаем) значение очередного коэффициента на соответствующее значение из матрицы  $dA$ .

Делаем статистическую проверку в функции `check()`.



Рис. 2. Общая блок-схема программы

Если проверка завершилась неудачно, возвращаем коэффициенту исходное значение, а соответствующий элемент из матрицы  $dA$  уменьшаем вдвое.

Если же проверка прошла успешно, увеличиваем шаг изменения (элемент матрицы  $dA$ ) вдвое.

В случае, если значение соответствующего элемента матрицы  $dA$  стало меньше, чем заданный предел точности, считаем, что граница изменения данного коэффициента системы достигнута, и в дальнейшем пропускаем этот коэффициент.

Переходим к следующему коэффициенту.

Как только все коэффициенты достигли предельных значений, переходим к следующему этапу.

Ниже приведены блок-схемы, описывающие программу (рис. 3).

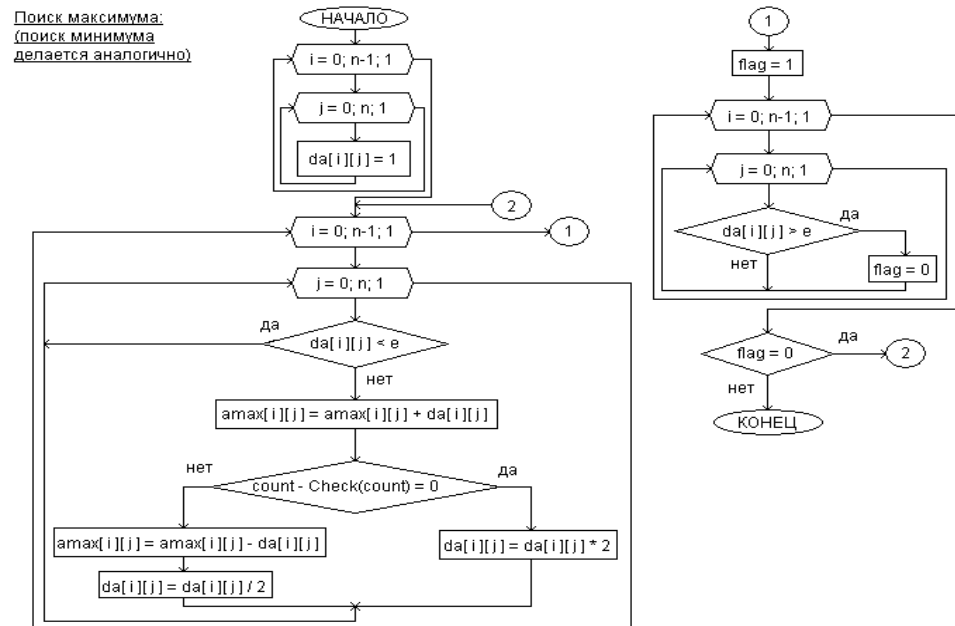


Рис. 3. Блок-схема поиска максимума коэффициентов

### • Второй шаг

**Формирование функции цели.** Смысл формирования заключается в следующем [3].

Из аналитической геометрии известно, что отклонение точки  $(x_I, y_I, z_I)$  от плоскости, записанному в нормированном виде:

$x \cos \alpha + y \cos \beta + z \cos \gamma + \rho = 0$ , будет равно:

$$d = x_I \cos \alpha + y_I \cos \beta + z_I \cos \gamma - \rho. \quad (6)$$

В нашем случае координаты точки образованы коэффициентами матрицы  $A$  и свободными членами  $b$ , а постоянными коэффициентами являются заранее заданные минимальные и максимальные значения переменных состояния.

В обозначениях формул (1), (2)  $(X_{iq}^<, z) < 0$ ,  $(i=1, \dots, I)$  и  $(X_{iq}^>, z) > 0$ ,  $(i=1, \dots, I)$ , это соответствие следующее: вектора  $X_{iq}^<$  - образованы минимальными и максимальными значениями переменных состояния;  $z$  - образованы коэффициентами матрицы  $A$ .

В предыдущем алгоритме определяются диапазоны коэффициентов матрицы, и соответственно, вектора  $z$ .

Для того чтобы не решать задачу нелинейного программирования, что связано с необходимостью искать сумму абсолютных величин отклонений или, по-другому, расстояний от точки до границ, образованных ограничивающими плоскостями, в тех случаях когда отклонение точки от плоскости отрицательно – надо изменить знак отрицательного  $d_i$ , при формировании целевой функции (5).

Алгоритм формирования целевой функции следующий:

- 1) выбирается точка из возможного диапазона переменных  $z$ ;
- 2) осуществляется приведение уравнений ограничений к нормальному виду;
- 3) определяется отклонение  $d_i$  точки от  $i$  границы;
- 4) если отклонение  $d_i$  отрицательно, коэффициенты, с которыми данная функция входит в критерий, меняются знак на противоположный. Таким образом, в целевой функции формируется не сумма отклонений, а сумма расстояний;
- 5) если отклонение  $d_i$  положительно, коэффициенты, с которыми данная функция входит в критерий, не меняют знак на противоположный;
- 6) пункты 3 – 5 повторяются, пока не определятся знаки отклонений до всех границ.

Таким образом, в целевой функции автоматически учитывается то, что осуществляется поиск суммы расстояний точки от ограничений  $\sum_{i=1}^{i=I} |d_i(\bar{z})|$ .

• **Третий шаг**

На данном шаге осуществляется решение задачи линейного программирования:

$$\sum_{i=1}^{i=I} d_i(\bar{z}) \rightarrow \max \quad (5')$$

При ограничениях:

$$(X_{iq}^<, z) < 0, (i=1, \dots, I), \quad (1')$$

$$(X_{iq}^>, z) > 0, (i=1, \dots, I), \quad (2')$$

а также

$$z_{\min} < z < z_{\max}. \quad (6)$$

Полученное решение будет определять координаты центра безопасности в случае равноценности границ. Если границы не равноценны, необходимо ввести веса для  $d_i(\bar{z})$ .

**Индекс безопасности**

Выделение центра технологической безопасности позволяет численно определять смещение рабочей точки ХТП от центра безопасности – наиболее безопасного состояния процесса.

Количественная характеристика, характеризующая удаленность текущей рабочей точки процесса  $s^*$  от точки, характеризующей центр безопасности  $s_0$ , покажет степень безопасности для данного состояния ХТП. Эту количественную характеристику будем называть индексом безопасности.

Графическая иллюстрация предлагаемой метрики приводится на рис. 4 [9].

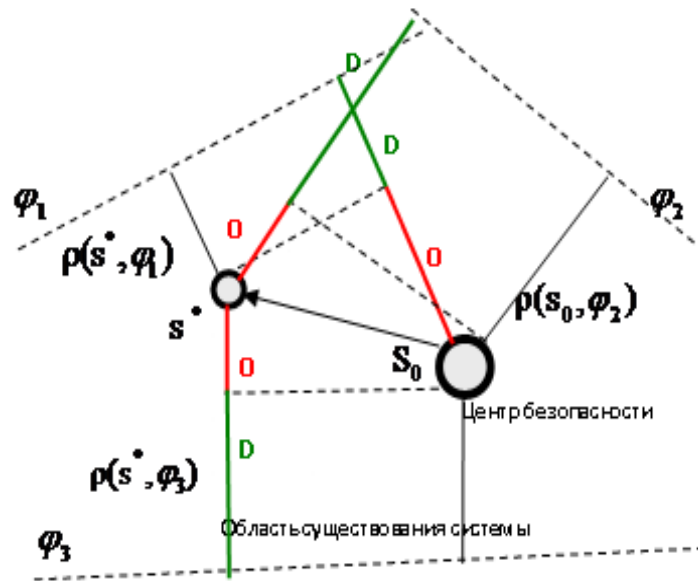


Рис. 4. Иллюстрация индекса безопасности

#### Методика определения индекса безопасности

Пусть  $T = \{T_1, T_2, \dots, T_p\}$  – множество технологических параметров, которыми описывается некоторое состояние ХТП. Набор конкретных значений параметров, описывающих состояние в некоторый момент времени, назовем ситуацией. Множество всевозможных ситуаций, возникающих в результате функционирования ХТП, может использоваться для формирования «решающей таблицы», задающей соответствия между ситуацией и набором управляющих решений [6]. Размер решающей таблицы определяется числом ситуаций, которое, в свою очередь зависит от степени конкретизации значений, набора параметров, характеризующих данный ХТП. Размерность решающей таблицы может быть уменьшена за счет выделения типовых ситуаций, на которых может быть сосредоточено внимание экспертов [7].

Поставим в соответствие каждому параметру ХТП лингвистическую переменную  $\langle \beta_i, E_i, D_i \rangle$  [8], где:  $\beta_i$  – название лингвистической переменной;  $E_i = \{E_{1i}, E_{2i}, \dots, E_{mi}\}$  – терм-множество лингвистической переменной  $\beta_i$ ;  $D_i$  – базовое множество лингвистической переменной  $\beta_i$ . Каждому элементу терм-множества  $E_i$ , ставится в соответствие своя функция принадлежности (рис. 5).

Для описания термов  $E_{ij}$ , соответствующих значениям  $\beta_i$ , используются нечеткие переменные. Каждый терм описывается нечетким множеством в базовом множестве данной лингвистической переменной. Множество, состоящее из набора лингвистических переменных  $\beta_i$ , нечетко определяет некоторое состояние технологического процесса. Такое множество назовем нечеткой ситуацией.

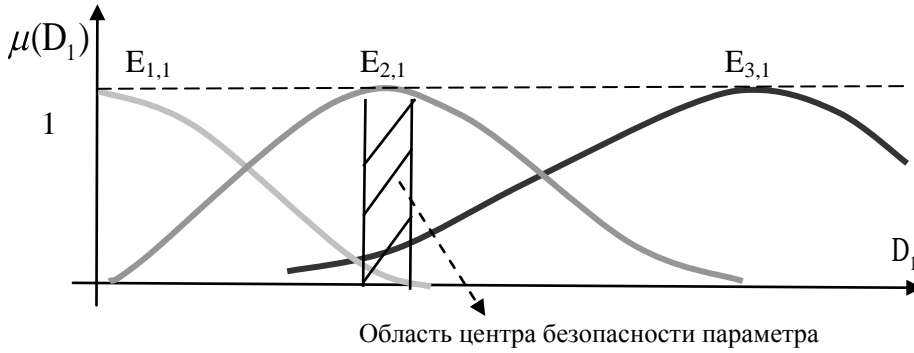


Рис. 5. Функции принадлежности лингвистической переменной  $\langle \beta_i, T_i, D_i \rangle$

Если каждый параметр  $T_i$  из множества  $T$  описывается соответствующей лингвистической переменной  $\langle \beta_i, T_i, D_i \rangle$ , то нечеткой ситуацией  $\tilde{S}$  называется [7] нечеткое множество второго уровня:

$$\tilde{S} = \{ \langle \mu_s(T_i) / T_i \rangle, T_i \in T \}$$

где  $\mu_s(T_i) = \{ \langle \mu_{\mu_s(T_i)}(E_i^j) / E_i^j \rangle, j = 1 \dots M_i; i = 1 \dots T_p \}$

Типовые нечеткие ситуации могут использоваться для идентификации некоторой входной нечеткой ситуации по степени их близости. В качестве меры близости между ситуациями рассматривается два критерия: степень нечеткого включения и степень нечеткого равенства.

Степень включения ситуации  $\tilde{S}_i$  в ситуацию  $\tilde{S}_j$  обозначается  $\nu(\tilde{S}_i, \tilde{S}_j)$  и определяется выражением:  $\nu(\tilde{S}_i, \tilde{S}_j) = \&_T \nu(\mu_{S_i}(T), \mu_{S_j}(T))$ , где

$$\nu(\mu_{S_i(T)}, \mu_{S_j(T)}) = \&_{E_k} (\mu_{\mu_{S_i(T)}}(E_k) \rightarrow \mu_{\mu_{S_j(T)}}(E_k))$$

$$\mu_{\mu_{S_i(T)}}(E_k) \rightarrow \mu_{\mu_{S_j(T)}}(E_k) = \max \{ 1 - \mu_{\mu_{S_i(T)}}(E_k), \mu_{\mu_{S_j(T)}}(E_k) \}$$

Для ограничения возможных вариантов альтернатив, возникающих при диагностике ХТП, будем считать, что ситуация  $\tilde{S}_i$  нечетко включается в  $\tilde{S}_j$ ,  $\tilde{S}_i \subseteq \tilde{S}_j$ , если степень включения  $\tilde{S}_i$  в  $\tilde{S}_j$  не меньше некоторого порога включения  $t_{inc} \in [0.6; 1]$ , определяемого условиями управления, то есть  $\nu(\tilde{S}_i, \tilde{S}_j) \geq t_{inc}$ . Другими словами, ситуация  $\tilde{S}_i$  нечетко включается в ситуацию  $\tilde{S}_j$ , если нечеткие значения признаков ситуации  $\tilde{S}_i$  нечетко включаются в нечеткие значения соответствующих признаков ситуации  $\tilde{S}_j$ . Фиксация порога включения в некоторой точке интервала  $[0.6; 1]$  зависит от особенностей объекта управления, требований к качеству управляющих решений и т. д.

В пределах достоверности, ограничиваемых порогом нечеткого равенства  $t$ , все ситуации одного класса эквивалентности  $\tilde{A}_i$  можно считать

одной ситуацией, которая получается нечетким объединением ситуаций, принадлежащих классу  $\tilde{A}_i$ . Полученная ситуация может использоваться при идентификации входной ситуации  $\tilde{S}^*$  посредством сравнения ее с ситуациями из S на нечеткое равенство.

Для целей определения индекса безопасности в качестве типовой нечеткой ситуации достаточно иметь одну нечеткую ситуацию, которая характеризует центр технологической безопасности, обозначим эту ситуацию  $\tilde{S}_0$ .

Таким образом, для определения индекса безопасности для текущего состояния процесса необходимо сравнить на нечеткое равенство входную нечеткую ситуацию  $\tilde{S}^*$  с нечеткой ситуацией, которая характеризует центр безопасности  $\tilde{S}_0$ . При этом степень нечеткого равенства:

$$In(\tilde{S}^*)_{\tilde{S}_0} = \nu(\tilde{S}^*, \tilde{S}_0) \& \nu(\tilde{S}_0, \tilde{S}^*) \quad (7)$$

и покажет величину, определенную как индекс безопасности ХТП (рис. 6).

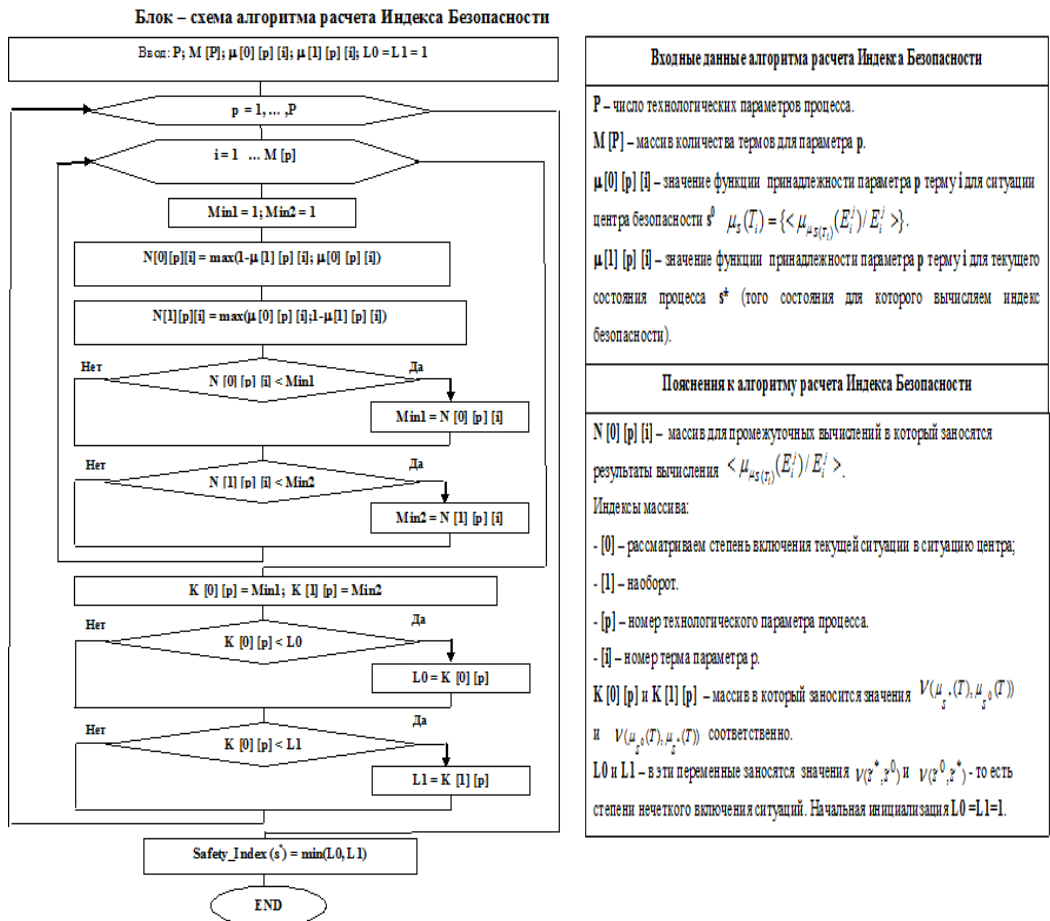


Рис. 6. Обобщенная структура алгоритма определения индекса безопасности [9]



## Расчет индекса безопасности для группы аппаратов

Пусть ХТС состоит из  $R$  аппаратов, для каждого из которых рассчитан свой индекс безопасности  $D_i$ , который показывает степень удаленности рабочей точки процесса от центра безопасности. Рассмотрим множество  $\{D_1, D_2, D_3, \dots, D_R\}$  состоящее из индексов безопасности для каждого из процессов ХТС. Совокупность этих индексов определяет состояние всей системы.

Для расчета индекса безопасности для группы аппаратов применим следующую методику.

Поставим каждому индексу безопасности  $D_i$  ( $i \in I = \{1, 2, \dots, R\}$ ) в соответствие лингвистическую переменную  $\langle \lambda_i, E_i, X_i \rangle$ , где  $\lambda_i$  - название переменной - «оценка состояния  $i$ -го аппарата»;  $E_i = \{E_{i1}, E_{i2}, \dots, E_{Mi}\}$  - термножество лингвистической переменной  $\lambda_i$ ;  $X_i$  - базовое множество лингвистической переменной  $\lambda_i$ .

Таким образом, перейдем от индекса безопасности  $D_i$  для  $i$ -го аппарата к оценке состояния этого аппарата по его индексу безопасности, для этого необходимо построить термножества лингвистической переменной  $\lambda_i$  (рис. 6).

Для описания термов  $T_{ij}$  ( $j \in H = \{1, 2, \dots, M_i\}$ ), соответствующих значениям  $\beta_i$ , используются нечеткие переменные  $\langle T_{ij}^i, X_i, Q_j^i \rangle$ , то есть  $T_{ij}$

описывается нечетким множеством  $\tilde{Q}_j^i$  в базовом множестве  $D_i$ :

$\tilde{Q}_j^i = \{ \langle \mu_{\tilde{Q}_j^i}(x) / x \rangle \}$ ,  $x \in X_i$ . где  $\mu_{\tilde{Q}_j^i}(d)$  - степень принадлежности элемента  $d$  нечеткому множеству  $\tilde{Q}_j^i$ .

Далее применяем методику аналогичную, рассмотренной выше.

Пусть  $D = \{D_1, D_2, \dots, D_R\}$  - множество индексов безопасности, значениями которых описывается состояние всей технологической системы. Каждый индекс безопасности описывается соответствующей лингвистической переменной  $\langle \lambda_i, E_i, X_i \rangle$ .

Индекс безопасности для группы аппаратов рассчитывается как степень нечеткого равенства некоторой текущей ситуации  $\tilde{Z}^*$  - определяющей состояние всей системы с ситуацией, которая определяет центр безопасности для всей системы  $\tilde{Z}_0$ . Степень нечеткого равенства  $In(\tilde{Z}^*, \tilde{Z}_0) = \nu(\tilde{Z}^*, \tilde{Z}_0) \& \nu(\tilde{Z}_0, \tilde{Z}^*)$  покажет индекс безопасности всей системы.

## Основные этапы методики практического нахождения области и центра безопасности

В основе методики, предлагаемой в данной работе, лежит возможность построения модели состояний в виде обыкновенных дифференциальных уравнений или дифференциальных уравнений в частных производных [1, 2]. Методика состоит из следующих этапов:

1. Осуществляется построение математической модели в виде уравнений состояний.

2. На основе данных уравнений строится система ограничений (1) – (4).

3. Выполняется разработка алгоритма определения центра безопасности для текущей ситуации как задачи линейного программирования.

4. Строятся функции степени принадлежности соответствующим лингвистическим переменным для каждого из выявленных параметров для дальнейшего вычисления степеней нечеткого включения и нечеткого равенства состояний.

5. Разрабатываются алгоритмы степени нечеткого включения нечеткого равенства значений текущих технологических параметров относительно центра безопасности для определения индекса безопасности.

Состояния, степень нечеткого равенства которых будет удовлетворять определенному условию ( $t_{inc} \in [0.6; 1]$ ) будут представлять собой область безопасного функционирования объекта.

Для определения центра безопасности состояния оборудования и систем управления технологического процесса проводится динамический анализ статистических данных о наработке на отказ оборудования и систем управления, по которым строится вероятностная оценка отказов оборудования и систем управления. Вероятность отказа в пределах от 0 до 5 процентов определяется как область безопасности.

Для реализации алгоритма определения центра безопасности предлагается использовать приближенный нейросетевой алгоритм решения задачи линейного программирования [10].

#### **Решение задачи линейного программирования**

Задача линейного программирования представляется в виде:

$$Ax \leq b, \quad c^T x \rightarrow \min$$

Требуется построить алгоритм, находящий по заданной матрице  $A$  размера  $M \times N$ , векторах  $b$  размерности  $M \times 1$  и  $c$  размерности  $1 \times N$  приближенное решение  $x$  размерности  $(N \times 1)$ .

*Входной сигнал* нейронной сети  $x$ , *выходной сигнал* нейронной сети  $y$ , его *желаемое значение*  $\bar{y}$  и *вектор ошибки системы*  $e = (y - \bar{y})$ .

Применяем градиентную итерационную процедуру настройки входного сигнала нейронной сети.

Используем функционал

$$F = \sum_{j=1}^M |e_j| + D * \sum_{i=1}^N c_i x_i.$$

Здесь  $D$  — весовой коэффициент. Его минимизацию можно производить по градиентной процедуре.

Окончательно нейронный алгоритм решения задачи линейного программирования имеет вид

$$x(0) = x_0,$$

$$y(k) = f(Ax - b),$$

$$x(k + 1) = x(k) - H(A^T y(k) + Dc).$$

Структура нейронной сети решения задачи линейного программирования с контуром настройки представлена на рис. 7.

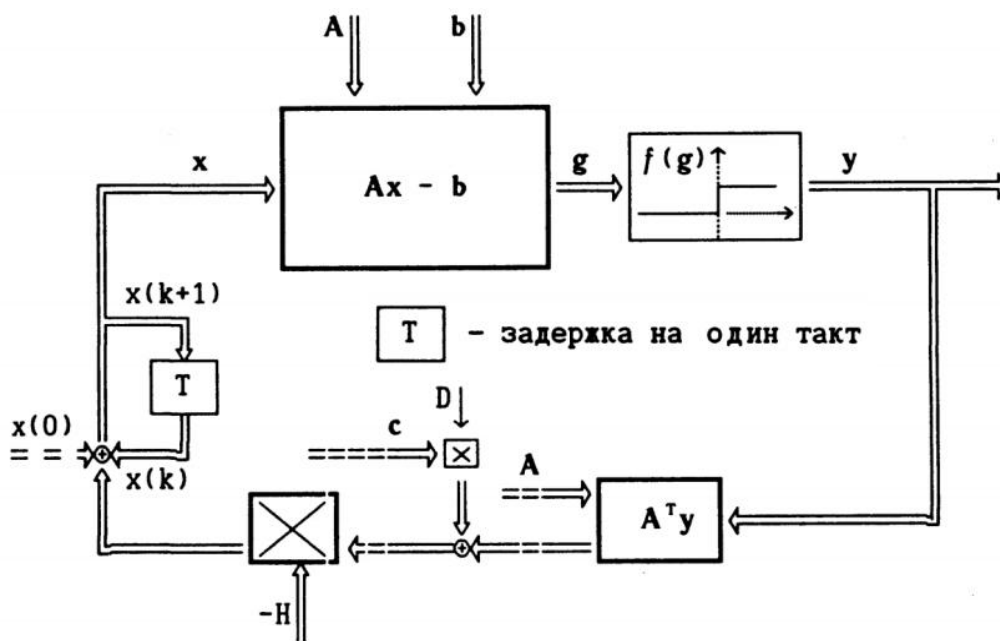


Рис. 7. Структура нейронного алгоритма решения задачи линейного программирования с контуром настройки

### Система оценки состояний

Система управления реализует следующие этапы вычислений для оценки состояний:

- 1) ввод исходной информации для определения центра безопасности;
- 2) определение центра безопасности;
- 3) определение индекса безопасности;
- 4) если  $\text{Ind}_{\text{inc}} \in [0.6; 1]$ , система находится в нормальном состоянии (пункты 1 ÷ 4) повторяются; в противном случае осуществляется переход к диагностическим мероприятиям.

### Заключение

Применение нейросетевого базиса на начальном этапе требует затрат ресурсов на обучение системы. В дальнейшем, в обычных режимах работы за счет реализации параллелизма работы нейросетей быстродействие системы управления повышается.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Богатиков, В.Н. Построение дискретных моделей химико-технологических систем. Теория и практика / В.Н. Богатиков, Б.В. Палюх. - Апатиты: КНЦ РАН, 1995. - 164 с.
2. Приложения метода разделения состояний к управлению технологической безопасностью на основе индекса безопасности / В.В. Алексеев и др. - Тверь: ТГТУ, 2009. - 368 с.

3. Александров, П.С. Курс аналитической геометрии и линейной алгебры / П.С. Александров. - М.: Наука, 1979. - 512 с.
4. Данциг, Д. Линейное программирование, его применения и обобщения / Д. Данциг. - М., Прогресс, 1966. - 600 с.
5. Заде, Л. Понятие лингвистической переменной и ее применение к принятию приближенных решений / Л. Заде. - М.: Мир.- 1976.-167 с.
6. Поспелов, Д.А. Ситуационное управление: Теория и практика / Д.А. Поспелов. - М.: Наука, 1986.- 288 с.
7. Мелихов, А.Н. Ситуационные советующие системы с нечеткой логикой / А.Н. Мелихов, Л.С. Бернштейн, С.Я. Коровин. - М.: Наука, 1990. – 272 с.
8. Тоичкин, Н.А. Диагностика состояний и управление технологической безопасностью с использованием индекса безопасности (на примере цеха выпарки производства хлора и каустика): диссертация канд. техн. наук: Тоичкин Николай Александрович. – Апатиты. – 2006. – 215 с.
9. Галушкин, А.И. Нейроматематика: методы решения задач на нейрокомпьютерах / А.И. Галушкин, В.А. Судариков, Е.В. Шабанов // Математическое моделирование. -1991. -Т.3, № 8. –С.93-111.

#### **Сведения об авторах**

*Белош Виктор Владимирович* – к.т.н., доцент кафедры компьютерных и телекоммуникационных систем, e-mail: [bvv1950@mail.ru](mailto:bvv1950@mail.ru)  
*Viktor V. Belosh* - Ph.D. (Eng.), associate professor, the chair of computer and telecommunication systems

*Богатиков Валерий Николаевич* - д.т.н. вед.н.с.,  
e-mail: [vnbgtk@iimm.kolasc.net.ru](mailto:vnbgtk@iimm.kolasc.net.ru)  
*Valery N. Bogatikov* - Dr. Sci. (Eng.), leading research associate

*Фильчакова Татьяна Александровна* - к.х.н. доцент кафедры прикладной математики  
*Tatiana A. Filchakova* - Ph.D. (Chem.), associate professor, chair of applied mathematics

УДК 681.5; 502.55

**Н.Ю. Рыженко**

Институт информатики и математического моделирования Кольского НЦ РАН,  
Кольский филиал ПетрГУ

### **ПРОСТРАНСТВЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ БЕЗОПАСНОСТИ ОБЪЕКТОВ ПРИРОДНО-ПРОМЫШЛЕННЫХ КОМПЛЕКСОВ В СИСТЕМЕ ARCGIS**

#### **Аннотация**

В работе рассматриваются возможности использования системы ARCGIS при моделировании природно-промышленных объектов и анализе их безопасности. Приведены примеры 3D моделирования и определения зон затопления при аварийной ситуации с максимальным ущербом на примере хвостохранилища.

#### **Ключевые слова:**

*безопасность, гидротехнические сооружения, геоинформационные системы.*

**N.U. Ryzhenko**

### **SPATIAL MODELING AND ANALYSIS OF OBJECTS OF NATURAL SAFETY INDUSTRIAL COMPLEX IN ARCGIS**

#### **Abstract**

The paper looks at the possibilities of ARCGIS modeling natural and industrial objects and analyzing their security. Examples of 3D modeling and identification of areas of flooding in an emergency situation with the maximum damage on the example of the tailings.

#### **Keywords:**

*safety, waterworks, GIS.*

Одной из важнейших характеристик моделирования природно-промышленных комплексов (ППК) является комплекс параметров и показателей последствий возможных аварий. В настоящее время, широко используются математические модели развития аварийных ситуаций без учета рельефа местности. Третья координата, определяющая высоту в каждой точке, опускается и выражается «минимальной шероховатостью поверхности», что, в свою очередь, приводит к неизбежным ошибкам в определении географических размеров возможных последствий. В целях совершенствования в дальнейшем методики определения масштабов развития аварий, что способствует обезопасить не только объекты ППК, но и прилегающие территории, необходимо переосмыслить процесс моделирования вариантов развития чрезвычайных ситуаций, с возможностью отображения результатов в графическом представлении. В качестве примера инструмента для решения поставленной проблематики можно использовать геоинформационную систему ArcGIS. Географические информационные системы (ГИС) – набор программных продуктов, сочетающих в себе функции визуализации географических данных с операциями над атрибутивной информацией об объектах карты, хранящейся в базах данных. Инструментарий современных продуктов в этой сфере позволяет проводить над географическими данными сложные пространственные запросы.

Воспользуемся приложением 3D Analyst из общего пакета ГИС. В качестве его основного функционала служит: получение карт отмывки рельефа,

изолиний, уклона, зон видимости или экспозиции склонов. Данные топографические поверхности дают возможность связать вводимые параметры (источники информации) с рельефом реальной местности и визуально проследить, как модификация элементов поверхностей будут влиять на результирующие данные. Комбинация карт, отражающих рельеф местности, с системой данных в каждой условной (исследуемой) точке, предоставит более реалистичную картину необходимой территории, что в свою очередь позволяет выполнять точный анализ в рамках поставленных задач.

Рассмотрим типовой пространственно-распределенный опасный промышленный объект хвостохранилище АНОФ-2 – это гидротехническое сооружение, предназначенное для складирования отходов апатито-нефелинового производства фабрики и золы Апатитской ТЭЦ. Оно образовано дамбами в части акватории губы Белой озера Имандра. На первом этапе, используя данные спутниковых снимков и технологическое описание объекта, создана таблица атрибутов изолиний, содержащая значения высоты в различных точках хвостохранилища.

Для дальнейшего анализа поверхности необходимо представить данные в виде модели триангуляционных нерегулярных сетей (TIN). TIN-модели используются для представления явлений, имеющих сплошное распространение по территории, таких как рельеф земной поверхности или градиент температуры. Поверхность представлена набором точек (узлов) и соединяющих их граней, образующих сеть смежных треугольников. Другими словами, TIN делит поверхность на смежные, неперекрывающиеся треугольники. TIN можно создать из любой комбинации точечных, линейных и полигональных объектов, что позволяет отображать модель в трехмерном виде [1] (рис.1).

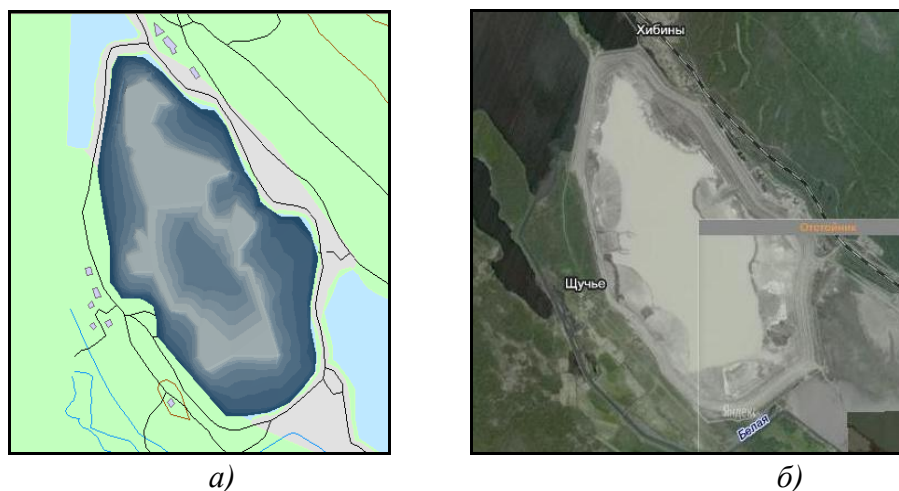
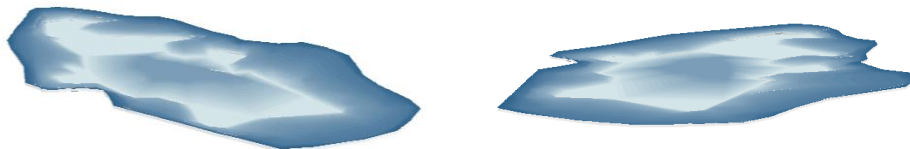


Рис. 1. Пример моделирования хвостохранилища АНОФ-2:  
а) слой TIN модели; б) фото со спутника

Для прорисовки трехмерных моделей используется приложение ArcScene. Оно позволяет просматривать модель под любым углом путем вращения или поворота объектов во View, позволяет управлять увеличением или уменьшением изображения объектов, перемещать и осуществлять пролет над ними (рис. 2).



*Рис. 2. 3D - модель хвостохранилища АНОФ-2 с разных ракурсов*

Используя возможности инструмента 3D Анализ TIN Polygon Volume, было вычислено для каждой изолинии объем и площадь между этими полигонами. Они позволяют рассчитать объем и площадь всего объекта.

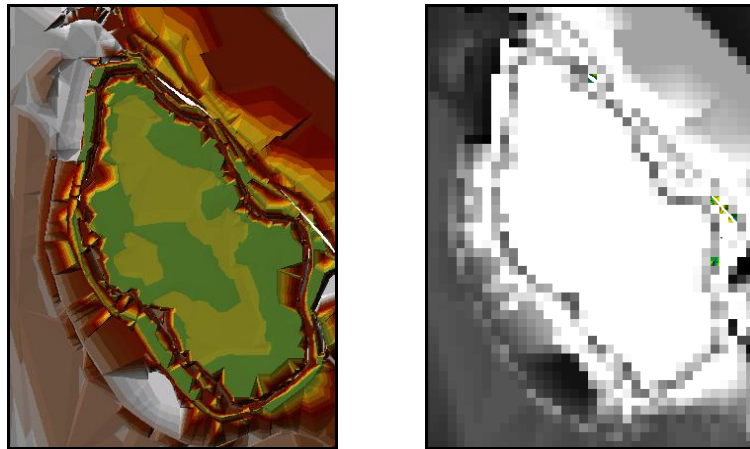
Следующий этап предполагает моделирование развития возможных аварий. При аварии на гидротехнических сооружениях направление растекания техногенного селя определяется топографией местности, наличием русловой сети, канав, озер, болот, а также возвышений и искусственных насыпей. Отказ ограждающей дамбы характеризует максимальную по уровню риска аварию на хвостохранилище [2]. Как известно из анализа аварий, имевших место на объектах-аналогах, процесс разрушения дамбы развивается быстро и имеет наиболее тяжелые последствия.

Анализ топографии прилегающей к хвостохранилищу АНОФ-2 местности и состояния дамб показывает, что при его аварии возможны четыре основные трассы движения потока, в разных направлениях. Рассмотрим случай разрушения дамбы №1, так как последствия данной аварии могут привести к максимальному ущербу. Схема развития этого аварийного процесса представлена для створа 1-1 (рис. 4), т.к. на этом участке дамба №1 отделяет хвостохранилище от озера Имандра и в случае ее прорыва масса хвостов тела намывной дамбы и шлама из отстойного пруда сразу же попадает в озеро Имандра, нанося ему огромный экологический ущерб. Данная авария может привести к человеческим жертвам, материальным потерям и огромному экологическому ущербу. Ущерб от аварии и ликвидация последствий аварии составляет по данным АО «Апатит» несколько миллиардов рублей.

Для определения территории затопления в результате рассматриваемой аварии необходимо указать точку прорыва. Для этого создан шейп-файл с точечным объектом – местом прорыва. Относительно его было вычислено расстояние с взвешенной стоимостью.

Карта расстояния с взвешенной стоимостью отражает в каждой ячейке растра минимальную накопленную стоимость перемещения до ближайшего (наиболее дешевого) источника [3]. Стоимостью может быть время, деньги или заданные значения предпочтения. Функции, создающие карту расстояния с взвешенной стоимостью, вместо вычисления прямого расстояния от одной точки до другой, вычисляют суммарную стоимость прохода через каждую ячейку на пути к ближайшему источнику, на основании длины пути и стоимости прохода (например, легче идти по полю, чем по болоту). В нашем случае стоимостью прохода являлась карта высот местности, так как при аварии под затопление попадают территории с низкими высотами. Для получения растра – GRID-файла (представление реальных поверхностей в виде равных квадратных

ячеек, организованных по строкам и столбцам; для каждой ячейки грида известно ее географическое местоположение) – был создан TIN-файл объединяющий данные высот местности и рельефа хвостохранилища (рис. 3).



а)

б)

Рис. 3. TIN (а) и GRID (б) высот местности и рельефа хвостохранилища

Полученный растровый слой был подвержен переклассификации. Растру присваиваются новые значения - значения предпочтительности, чувствительности. То есть все значения были поделены на 10 равных частей. Тем значениям, которые ближе всего располагаются к месту аварии, дано значение 10, самым дальним 1 (рис. 4).

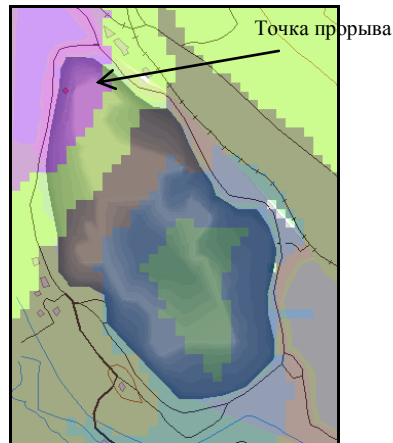


Рис. 4. Карта расстояния с взвешенной стоимостью

Так как складированное вещество потечет по территории с наименьшей высотой, то нам потребовалась и карта с переклассификацией значений высот в значения предпочтительности. Данные грида высот были также поделены на 10 равных частей. Точкам с наименьшим значением присвоено значение 10, а с наибольшим – значение 1.



С помощью инструмента ArcGis - калькулятор растра, были объединены полученные карты - карта расстояния с взвешенной стоимостью и карта высот. В результате получен растровый слой, который показывает зону вероятного затопления территории при аварии на дамбе №1 хвостохранилища – АНОФ - 2. На рис. 5 он отмечен темным цветом.



Рис. 5. Зона возможного затопления при аварии на дамбе №1 в створе 1-1

Таким образом, использование ArcGis при анализе безопасности объектов природно-промышленных комплексов дает возможность применения к данным ГИС пространственных операторов для получения новой информации. Эти инструменты представляют основу для пространственного моделирования и геообработки. Три основных типа данных ГИС - растровый, векторный и TIN, позволяют легко получить новую информацию, определить пространственные отношения, а инструменты ArcGis, такие как Spatial Analysis, 3D Analysis, позволяют провести пространственный анализ, построить 3D модели.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Визуализация рельефа и создание 3D моделей местности в ArcGIS. – Режим доступа: <http://gis-lab.info/qa/3dviz-ag.html>
2. Рыженко, Н.Ю. Анализ безопасности хвостохранилища / Н.Ю. Рыженко, С.Ю. Яковлев, Н.В. Исакевич / Управление безопасностью природно-промышленных систем: сборник научных трудов. – Апатиты: КНЦ РАН, 2008. - Вып. VII. – С.87-92.
3. ArcGIS Desktop Tutorials. – Режим доступа: <http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.2/index.cfm?TopicName=Tutorials>

#### Сведения об авторе

Рыженко Наталья Юрьевна - к.т.н., младший научный сотрудник,  
e-mail: [nryzhenko@iimm.kolasc.net.ru](mailto:nryzhenko@iimm.kolasc.net.ru)  
Nataly U. Ryzhenko - Ph.D. (Tech. Sci.), junior researcher

УДК 004.9

**А.А. Рыженко<sup>1</sup>, Р.Ш. Хабибулин<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Институт информатики и математического моделирования Кольского НЦ РАН,  
Кольский филиал ПетрГУ

<sup>2</sup> Академия Государственной противопожарной службы МЧС России, г. Москва

## **ИНФОРМАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ВЗРЫВОВ И ПОЖАРОВ НА ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ОБЪЕКТАХ**

### **Аннотация**

В работе приведены примеры моделей расчетов последствий взрывов и пожаров на объектах, выявлены недостатки и варианты их решений с использованием современных информационных технологий.

### **Ключевые слова:**

*модель, развитие пожара, трехмерная визуализация.*

**A.A. Ryzhenko, R.Sh. Khabibulin**

## **INFORMATION IMAGING EXPLOSION AND FIRE AT INDUSTRIAL SITES ENTERPRISES**

### **Abstract**

The paper presents examples of models calculations consequences of explosions and fires at sites identified gaps and their solutions, using modern information technologies.

### **Keywords:**

*model, the development of fire, three-dimensional visualization.*

### **Введение**

Не смотря на снижение количества пожаров и погибших при пожаре за последние годы, актуальными остаются вопросы предупреждения и прогнозирования возможных пожароопасных ситуаций на объектах различного назначения. Высокой опасностью отличаются производственные объекты, где при наличии сложных технологических процессов, хранении горючих веществ возможно возникновение ситуаций приводящих к пожарам и взрывам.

Как показывает практика на ликвидацию последствий аварий с пожарами и взрывами на производственных объектах в большинстве случаев требуются усилия и средства, значительно превышающие первоначально необходимые для осуществления профилактических мер.

Для анализа аварий и пожаров на объектах нефтепродуктообеспечения, относящихся к категории пожаровзрывоопасных (ПВО), собраны данные за последние 10 лет, систематизированы в разработанной специализированной базе данных [1]. Источники информации: статистические данные федеральной базы «Пожары», материалы описаний пожаров, опубликованные в печати статьи, записи специалистов.

Исходя из проведенного анализа статистики аварий и пожаров, происходящих на производственных объектах наблюдается снижение количества пожаров на производственных объектах за последние 5 лет (4-5% от общего количества пожаров), однако материальный ущерб в результате пожаров

и взрывов остается значительным и может составлять до 50% от суммарного ущерба от всех пожаров [2].

Целью проведения данного статистического исследования являлось изучение причин, особенностей развития и последствий аварий и пожаров. Ведение статистики аварий и инцидентов на промышленных объектах необходимо специалистам аналитикам для прогноза развития возможных ситуаций, что обусловлено непосредственным влиянием на прилегающую территорию, атмосферные и водные ресурсы. Глобальные картографические электронные ресурсы (Google Map, Yandex Map и другие) наглядно отображают, что большая часть предприятий России попадают в 10-15 км зону влияния на прилегающие жилую и зеленую зоны. Более того, небольшие промышленные объекты, такие как котельные, АЗС и им подобные, лежат в черте города или на ее границе. Такое расположение объектов требуют особого внимания в сфере анализа риска возникновения потенциальных аварий и их возможных последствий. Важным фактором в условиях современных требований к промышленным объектам, является учет дополнительных внешних параметров и характеристик, таких как, например: изменения климатических условий по сезонам, рельеф местности, влияние соседних промышленных объектов, возможная цепная реакция, использование естественных и искусственных преград и т.п.

Большинство современных методик оценки риска и расчета последствий аварий абстрагируются от многих показателей. Например, важная характеристика для формирования зон поражения является учет рельефа местности, т.е. значений третьей координаты в каждой точке (с некоторым допуском по расстоянию). Но, большинство методических указаний рассматривают сценарии со следующей условностью: наиболее худший сценарий, с учетом шероховатости поверхности приближающейся к нулю. Другими словами, вокруг промышленного объекта степь и мелкий кустарник. Характерной особенностью многих областей РФ является холмистость, возвышенная местность, гладких ровных пустошей на территориях практически нет. С другой стороны, некоторые промышленные объекты специально расположены на возвышенностях по отношению к жилой зоне, что существенно сказывается на увеличении территории последствий аварий. Например, некоторые котельные устанавливаются выше потребителей для того, чтобы сократить давление воды (уменьшить расходы). В дополнении, некоторые территории изрезаны системой естественных и искусственных водных ресурсов в виде ручьев, топей, небольших речушек, что существенно сказывается на масштабы территории влияния последствий аварий.

Одним из вариантов выхода из данной ситуации является использование информационных систем с поддержкой технологий 3D ГИС с возможностью обратной связи (рис. 2). Статистика показывает, что наиболее частая авария на промышленных ПВО объектах - разлив вещества с большой вероятностью последующего пожара. Типовой сценарий развития аварий можно представить в виде: внешний фактор воздействия на резервуар, частичная разгерметизация, гидродинамическая волна или растекание жидкости, затем пожар. Анализ в существующих методиках таких сценариев дает в результате только концентрические кольца с различным радиусом и вероятностью поражения (рис. 1).

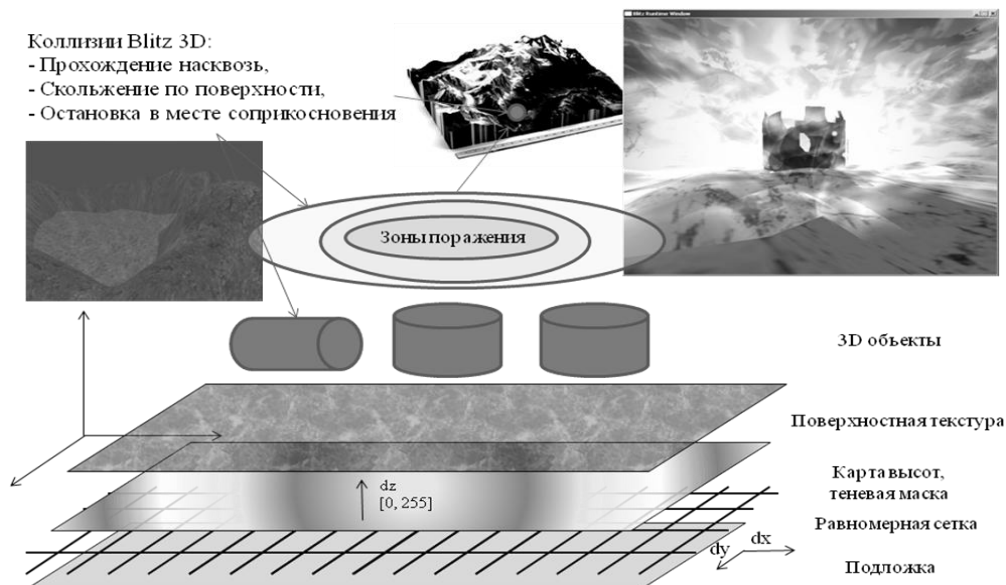


Рис. 1. Технология взаимодействия классического типа 2,5D – прямая задача

В разрабатываемой системе, предлагается следующим этапом провести анализ поверхности прилегающей территории. На карты ГИС накладываются кольца зон поражения, запускается система детального анализа узлов сетки изолиний карт с допустимой детализацией. В каждом узле получаем координату высоты, степень риска поражения и коэффициент влияния.

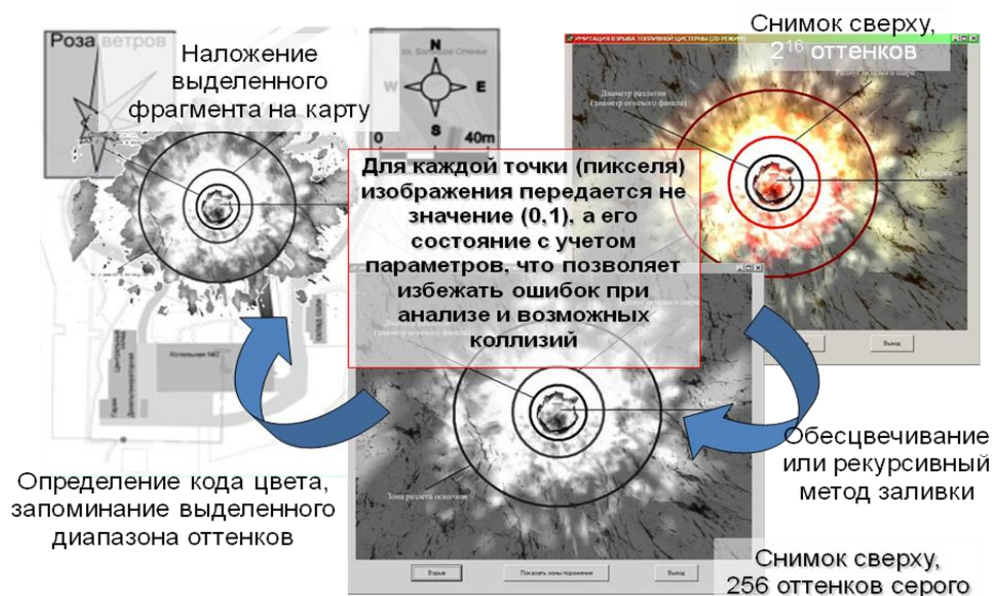


Рис. 2. Технология 3D ГИС с обратной задачей – учет высот в каждой точке

Затем происходит анализ высот в виде логических цепочек, строится карта возможных зон поражения с учетом высот рельефа. Дополнительно анализируются возможные естественные и искусственные препятствия: лесные зоны, бетонные и деревянные заграждения, насыпные валы, искусственные рвы и т.д. В результате анализа системы специалист получает детальную картину воздействия последствий аварий на прилегающую территорию. Система позволяет сократить расходы на ненужные системы оповещения в зонах возвышенности или за преградами, оценить дополнительные источники распространения загрязняющих веществ, получить 3D изображение зон влияния на соседние объекты (рис. 2).

Тем не менее, необходимо учитывать рынок программных продуктов. Стоимость современных ГИС значительно может превысить ожидаемый эффект. Профессиональный пакет требует значительных вложений не только на первом этапе, но и для дальнейшего сопровождения. В связи с этим предлагается рассмотреть альтернативные варианты, с учетом итогового результата.

В настоящее время общая позиция государства по отношению к программному обеспечению все больше склоняется на использование бесплатных или условно бесплатных программных продуктов. Нарастающие требования к лицензированию и сопровождению программного обеспечения для юридических лиц все больше сказывается на организации. Если раньше допускалась незначительная халатность по отношению к установленному ПО, то сейчас проводят периодические проверки и штрафуют за использование пиратских и самовольно установленных программных продуктов.

Альтернативных крупноблочных вариантов на рынке ПО недостаточно, появляется все больше продуктов решающих незначительные профильные задачи. В последнее время широкое распространение получили предметно-ориентированные языки программирования, способные намного упростить процесс реализации конкретного приложения для определенного рабочего места (рис. 3).

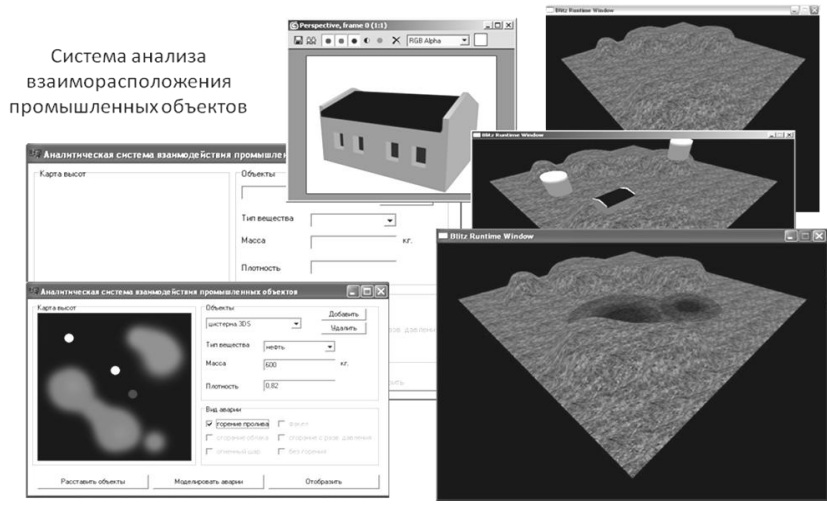


Рис. 3. Пример 3D моделирования зданий и сооружений горнопромышленного комплекса с использованием графического пакета и предметно ориентированного языка программирования

Классические технологии построения 3D поверхности предлагают три варианта: равномерная сетка, изолинии и теневая маска. Классический ГИС использует первый вариант как основной. Но, некоторые коммерческие версии позволяют строить с использованием изолиний. Технология теневой маски используется только в современных графических ядрах и имеет массу преимуществ. Пример использования механизма представлен на рис. 4.

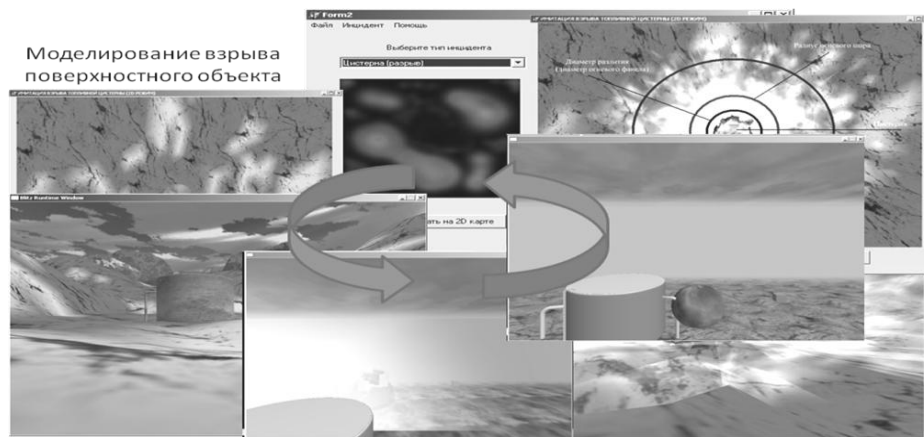


Рис. 4. Пример использования – 3D моделирование зданий и сооружений горнопромышленного комплекса

## Заключение

Согласно современным требованиям и ПО, их реализующих, получаем следующую картину: для моделирования крупной организации со всеми возможными атрибутами конкурентов классическим ГИС технологиям не существует. С другой стороны, для решения однозадачных направлений лучше использовать современные графические ядра из категории условно бесплатного ПО в совокупности с предметно-ориентированным языком программирования.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Хабибулин, Р.Ш. База данных об аварийных ситуациях, пожарах и взрывах на объектах нефтепродуктообеспечения. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2008620072 от 30.01.08. Роспатент, 2008 г.
2. Хабибулин, Р.Ш., Лепихов, В.О. Интернет-картографическая система поддержки принятия решений по управлению пожарным риском на производственных объектах / Р.Ш. Хабибулин, В.О. Лепихов // Системы безопасности – 2011: материалы двадцатой научно-техн. конф.- М.: Академия ГПС МЧС России, 2011. – С.187-188.

## Сведения об авторах

*Рыженко Алексей Алексеевич* – к.т.н., старший научный сотрудник,  
e-mail: [ryzhenko@iimm.kolasc.net.ru](mailto:ryzhenko@iimm.kolasc.net.ru)

*Alexey A. Ryzhenko* – Ph.D. (Tech. Sci.), senior researcher

*Хабибулин Ренат Шамильевич* - к.т.н., адъюнкт-профессор,  
e-mail: [Kh-r@yandex.ru](mailto:Kh-r@yandex.ru)

*Renat Sh. Khabibulin* - Ph.D. (Tech. Sci.), associate professor

УДК 004.942

**Ю.О. Самойлов, В.В. Быстров**

Институт информатики и математического моделирования Кольского НЦ РАН,  
Кольский филиал ПетрГУ

## **ИНФОРМАЦИОННЫЕ СРЕДСТВА И ТЕХНОЛОГИИ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ**

### **Аннотация**

В статье приведен обзор существующих сред имитационного моделирования и существующих разработок в области качества образования, а также кратко рассматривается разрабатываемая в ИИММ КНЦ информационная технология для оценки качества образования и выработки образовательной стратегии.

### **Ключевые слова:**

*имитационное моделирование, качество, образование, оценка, агентное моделирование.*

**Y.O. Samoilov, V.V. Bystrov**

## **INFORMATION TECHNOLOGIES AND METHODS OF EDUCATION QUALITY ESTIMATION**

### **Abstract**

The review of the existing imitating modeling environment and also existing education quality developments are given in the article. The developed information technology of education quality estimation and education-based strategy of IIMM KRC of RAS is also briefly considered.

### **Keywords:**

*imitating modeling, quality, education, estimation, agent-based modeling.*

### **Введение**

В наше время основополагающим звеном практически любого предприятия или организации являются люди, и именно персонал играет важнейшую роль в его развитии в условиях рыночных отношений. К современному работнику предъявляются работодателем все более обширные требования, затрагивающие, кроме умения на высоком профессиональном уровне выполнять свои прямые трудовые обязанности, еще и владение информационными технологиями. Следовательно, для развития и стабильной деятельности экономики региона необходимо соответствующее кадровое обеспечение. За подготовку кадров в первую очередь отвечает система образования. Таким образом, исследования в области образования и качества образовательных услуг, соответствующих требованиям времени и работодателей, являются актуальными и важными.

Для того, чтобы своевременно реагировать на изменения требований рынка труда к будущим работникам, необходимо каким-либо образом оценивать образовательную деятельность ВУЗа. Оценка эту, естественно, рационально связать со студентами, ведь именно их суммарный уровень и качество получаемых знаний могут рассматриваться как один из показателей качества образования учебного заведения в целом.

В рамках научно-практических исследований ИИММ КНЦ РАН для решения задачи оценки качества образования было решено использовать

моделирование как средство изучения сложных систем. В соответствии с классическим жизненным циклом моделирования необходимо решить следующие задачи: построить формальную модель образовательного процесса, реализовать компьютерную модель с помощью современных средств и методов имитационного моделирования, провести верификацию модели, на основе анализа результатов моделирования выработать типовые сценарии и стратегии развития учебного заведения. Для упрощения рутинных операций по организации взаимодействия между пользователем и моделью разрабатывается специальное программное обеспечение. Основное назначение данного программного комплекса автоматизировать операции настройки, многократной имитации, обработки и анализа результатов моделирования.

### **Современные средства имитационного моделирования**

В настоящее время автоматизация широко применяется во многих областях деятельности. Одним из инструментов для решения задачи автоматизации является моделирование.

Современные объекты управления обладают высокой степенью сложности (структурной, функционирования, выбора поведения и развития), что значительно затрудняет использование аналитических методов исследования. В этом случае применение имитационного моделирования (ИМ) является более эффективным.

Существует четыре основных подхода ИМ [1]: динамическое моделирование, системная динамика (СД), дискретно-событийный (ДС) и агентное моделирование.

В России активное использование универсальных и специализированных сред ИМ для персональных ЭВМ началось в конце XX в. Этому способствовали следующие факторы:

1. Проведение регулярных всероссийских научных мероприятий по ИМ. В октябре 2003 г. состоялась первая всероссийская конференция по имитационному моделированию ИММОД, проводимая раз в два года.
2. Создание портала GPSS, содержащего информацию о литературе и мероприятиях по ИМ.
3. Появление современной литературы и материалов конференций (ИММОД, МОДС, Winter Simulation Conference и др.), находящихся в свободном доступе.
4. Разработка отечественной универсальной среды имитационного моделирования AnyLogic фирмой "XJ Technologies".

В работе [2] приведен график сравнительного роста числа российских и зарубежных организаций, пользующихся услугами компании "XJ Technologies". В период с 2000 по 2007 гг. доля российского рынка компании "XJ Technologies" увеличилась более чем на 25 % всех заказов на имитацию систем. Наибольший интерес к применению имитационных моделей отмечается в логистике, производстве и бизнесе.

Основными факторами, ограничивающими развитие ИМ, являются нехватка квалифицированных кадров и использование нерациональных методов [2]. Среди частных проблем можно отметить [1] неоптимальную разработку имитационных моделей, отсутствие эффективной машинной реализации, несоблюдение компромисса между универсальностью и прикладной областью.



Имитационное моделирование может успешно применяться в исследовании производственных систем. Например, имеется опыт использования программных продуктов имитационного моделирования в горном деле, машиностроении, теплофизике и энергосберегающих технологиях [3].

#### Характеристики некоторых наиболее распространенных сред ИМ

Характеристика среды	Arena	ExtendSim	Anylogic	Automod	Promodel
Год выпуска	1998	1998	1999	1999	1999
Разработчик	Rockwell Software	Imagine That, Inc.	XJ Technologies	Applied Materials Inc.	PROMODEL Corporation
Специализированный язык	Нет	ModL	Java	Встроенный язык	Встроенный язык
Вид библиотек	Стандартные	Стандартные	Стандартные	Настраиваемые шаблоны	Настраиваемые шаблоны
Создание пользовательских библиотек и шаблонов	Есть	Есть	Есть	Нет	Нет
Импорт чертежей	Есть	Нет	Есть	Есть	Есть
Парадигмы ИМ: а) динамические системы	Нет	Нет	Есть	Нет	Нет
б) системная динамика	Нет	Нет	Есть	Нет	Нет
в) агентное моделирование	Нет	Есть	Есть	Нет	Нет
г) комбинированный подход	Нет	Есть	Есть	Нет	Нет
Модуль оптимизации	OptQuest	Встроенный	OptQuest	AutoStat	SimRunner
Потоки случайных чисел	Неограниченное число	Неограниченное число	Неограниченное число	Неограниченное число	100 потоков
Стандартные теоретические распределения	12	18	29	7	20
Разработка интерфейса для пользователя модели	Нет	Нет	Есть	Нет	Нет
Операционная система, версия не ниже	Windows 2000	Windows 2000, Mac OS X 10.4	Windows 2000, Apple Mac OS X 10.4, SuSE Open Linux 10.2, Ubuntu Linux 7.04	Windows XP	Windows 2000
Рекомендуемые требования к оперативной памяти	256 Мб (512 Мб и более)	256 Мб (2 Гб)	1 Гб	512 Мб	512 Мб (2 Гб)
Наличие демоверсии	Есть	Есть	Есть	Есть	Нет

Задачи, решаемые ИМ для исследования производственных систем, можно разделить на три основные группы [4]: определение потребности в оборудовании, оценка производительности, оценка технологических операций.

В работе [8] приведены характеристики более 50 современных сред ИМ. На основе данных этих источников можно считать, что одними из наиболее распространенных сред являются Arena [6], Extend [7], AnyLogic [8], AutoMod [9], Promodel [10], характеристики которых приведены в таблице выше.

Необходимо отметить, что некоторыми характеристиками обладают все рассматриваемые среды, а именно:

- наличие связи с внешними приложениями;
- использование трехмерной анимации;
- документирование;
- поддержка парадигмы дискретно-событийного моделирования;
- иерархичность представления;
- эмпирические распределения;
- независимые прогоны моделируемой системы;
- разработка сценариев;
- планирование статистических экспериментов;
- интерактивный отладчик.

Для сравнения необходимо задать критерии анализа. Наиболее важными являются следующие параметры сред ИМ.

1. Основные характеристики, в число которых входят следующие возможности: использование различных парадигм ИМ, описание логики поведения объекта на встроенном языке, простота освоения среды моделирования, поддержка иерархического моделирования сложных систем, возможность интерактивной отладки и разработки интерфейса для пользователя модели, импорт и экспорт данных, обеспечение разработки сценариев моделирования, поддержка непрерывно-дискретного моделирования, связь среды ИМ с другим программным обеспечением.

2. Требования к оборудованию и программному обеспечению - объем оперативной памяти, вид и версия операционной системы.

4. Реализация анимации и динамической графики, обеспечивающих визуализацию модели и отображение ее параметров (часы, шкалы, графики и т. д.).

5. Различные статистические возможности, такие как возможность задания потоков независимых случайных величин, возможность задания эмпирических распределений, осуществление независимых прогонов модели, планирование проведения статистических экспериментов, оптимизация параметров модели.

6. Поддержка пользователя среды (наличие справочного материала, демоверсии и осуществление технической поддержки).

7. Формирование отчетов с выходными данными, графиками, диаграммами, оценкой параметров модели и т. д.

Разработка всех рассмотренных сред ИМ начата в конце XX в. и связана с быстрым развитием аппаратной базы ЭВМ. Среда ИМ обладают следующими возможностями: предоставление визуального интерфейса разработки моделей, что облегчает их применение для непрограммирующего пользователя; поддержка иерархии в структуре модели, обеспечивающей четкую и наглядную

структуру, обеспечение связи с внешними приложениями, трехмерная анимация, документирование, отладка, анализ, оптимизация модели имитируемой системы. На сайтах разработчиков рассмотренных сред ИМ (кроме "PROMODEL Corporation") можно загрузить демоверсию среды.

Отличительными особенностями приведенных сред ИМ являются наличие специализированного языка, вид библиотеки элементов, возможность создания пользовательских библиотек и шаблонов, импорт чертежей, парадигмы моделирования, возможность разработки интерфейса для пользователя модели, требования к оперативной памяти и программному обеспечению ЭВМ. Рассмотрим эти различия более подробно.

Специализированные среды ИМ отличаются поддержкой, в качестве шаблонов, уже созданных объектов, имитирующих элементы и процессы производства. Универсальные среды могут имитировать производственные системы, но для разработки модели требуются большие затраты времени. Однако у них имеется возможность создания пользовательских библиотек и шаблонов.

Все рассмотренные среды, за исключением Extend, поддерживают импорт чертежей из систем автоматизированного проектирования (например, AutoCad).

Рассматриваемые среды позволяют создавать модели непрерывных и дискретных систем с помощью ДС-подхода.

Среда ИМ AnyLogic имеет ряд преимуществ: наличие всех парадигм ИМ (высокая гибкость выбора подхода); возможность выбора между парадигмами или применение комплексного подхода; обладает всеми свойствами, необходимыми для разработки имитационных моделей. Данная среда предоставляет возможность экспортировать разработанную модель в приложение или апплет, обеспечивая этим доступность применения результатов исследования заказчиками проекта. AnyLogic разработана на универсальном языке программирования Java, что позволяет среде не зависеть от вида операционной системы. Отметим, что AnyLogic является одной из наиболее распространенных сред ИМ в России (более 30 % моделей, представленных на конференции ИММОД-2009, разработано в среде AnyLogic) и применяется в различных областях: производственных, социально-экономических, транспортных и др. Например, в угольной промышленности возможные варианты имитации: конвейерный транспорт, проходческое оборудование, логистика, автомобильный и железнодорожный транспорт, процесс развития предприятия и др.

### **Обзор научно-исследовательских работ в области управления качеством образования**

В настоящий момент существует множество различных работ, посвященных решению проблемы управления качеством образования. Нужно отметить, что некоторые исследования доведены до стадии реализации в виде программного продукта, тестируемого или уже внедренного в некоторые учебные заведения. Большая часть – это разработки ведущих российских и зарубежных вузов, а именно результаты научно-исследовательских работ их научных сотрудников. В данном разделе зарубежные разработки затрагиваться

не будут. Будет дано описание наиболее близких по тематике и методам разработки российских систем поддержки управления качеством образования.

1. В статье «Моделирование информационной системы оценки качества образования» за авторством К.И. Костенко и С.Д. Некрасова [12] дано описание ИС, поддерживающей осуществление основных видов деятельности по оценке качества образования. Выбранный авторами подход к созданию информационной системы основан на идеологии создания и использования массивов слабоформализованных предметных и профессиональных знаний. Он делает возможным развертывание корпоративных полей знаний, ориентированных на решение разнообразных задач с помощью технологий обработки знаний, в том числе задач управления и принятия решений.

В настоящее время решаются следующие задачи:

- расширение информационной среды материалами, регламентирующими проведение практик, содержащими сведения о выпускниках и профессиональных траекториях, аннотированную базу тем курсовых и дипломных работ;
- построение структур основных профессиональных задач по специальностям, которые осваивают студенты КубГУ;
- составление базы актуальных для современного работодателя профессиональных задач по специальностям, которые осваивают студенты КубГУ;
- сопоставление списков первой и второй обозначенных выше задач для принятия решений и внесения корректив в образовательные программы подготовки квалифицированных специалистов КубГУ;
- построение модели процесса наполнения базы первичных данных, получаемых по результатам опросов студентов, преподавателей и работодателей и автоматизации процесса прохождения опросов, определяемого регламентом предоставления информации;
- развитие системы типов (классов) интерактивных опросных форм;
- создание функциональных механизмов обработки фактической информации, включая базы профессиональных знаний, управляющих процессом оценки ситуации и принятия решений.

2. В рамках диссертационной работы «Мультиагентное имитационное моделирование образовательного процесса накопления знаний» [13] за авторством Назойкина Е.А. реализована мультиагентная модель и интерфейс, позволяющий работать с ней, в среде Simplex3 Таким образом, в настоящий момент:

- разработан комплекс моделей и программ мультиагентной имитации образовательного процесса в ВУЗе в универсальной системе имитационного моделирования Simplex3 с описанием агентов на объектно-ориентированном языке моделирования Simplex-MDL с внешними процедурами и EDL описанием экспериментов в среде экспериментирования;
- разработаны программы имитационного эксперимента и поиска оптимальных решений на языке Simplex-EDL в различных условиях передачи и представления информации с процедурами накопления знаний и распределения учебной нагрузки;

- разработан пользовательский интерфейс, обеспечивающий диалоговый режим работы с имитационной моделью для проведения эксперимента с различными параметрами состояния и стратегиями поведения агентов;

- разработаны рекомендации и учебно-методические материалы по имитационному моделированию и повышению качества образовательного процесса в ВУЗе.

3. В Бийском технологическом институте (филиал АлтГТУ) разработана интегрированная автоматизированная информационная система (ИАИС) ВУЗа (Н.Ю. Ануфриева, О.А. Бубарева, Е.С. Молодцова, В.В. Парахин, К.Г. Паутов, Ф.А. Попов, А.А. Тютякин) [11]. Она обеспечивает функции оперативного и стратегического управления основными видами вузовской деятельности. Данная система обеспечивает поддержку принятия решений, как руководством института, так и руководством АлтГТУ, предоставляя им в оперативном режиме необходимые сведения о финансовом, кадровом и материально-техническом состоянии института, а также о его учебной и научной деятельности. Эта же система является источником данных для формирования отчетов, направляемых в федеральную службу по надзору в сфере образования и науки, в органы статистического наблюдения, в налоговую службу, в пенсионный фонд, а также в др. административно-управленческие и контролирующие структуры.

В структуре ИАИС выделены подсистемы управления: кадрами, бухгалтерским учетом, финансовыми и материальными ресурсами, трудом и заработной платой, учебным процессом, научными исследованиями, библиотечной деятельностью, качеством образовательных услуг, делопроизводством, информационными ресурсами. Упомянутый выше информационный портал и коммуникационно-интеграционная подсистема также являются структурными элементами ИАИС.

На базе этой ИАИС система информационной поддержки (СИП). Для управления объектами ИАИС базовой среди CALS-технологий является технология PDM (Product Data Management), реализуемая PDM-системой.

В рамках своих функций PDM-система способна обеспечить:

- информационно-справочную поддержку СМК посредством хранения полного комплекта электронных документов системы качества, включая приказы федерального уровня, стандарты предприятия, должностные инструкции и т. д.;

- внедрение процессного подхода в управлении качеством за счет автоматизированного управления потоками работ, составляющими основные рабочие процессы ВУЗа;

- функция управления потоками работ также обеспечивает проверку процессов, включающую их мониторинг;

- классификацию хранимой документации СМК в соответствии с принятыми уровнями документов СМК;

- формирование календарного плана работ, распределения ресурсов по отдельным задачам и контроля выполнения задач со стороны руководства.

## **Технология управления качеством образования научно-образовательного комплекса**

В рамках ИИММ КНЦ РАН разработана технология управления качеством образования научно-образовательного комплекса. Главным образом отличия заключаются в среде и выбранной парадигме моделирования (если моделирование имело место быть), а также в функциональном наполнении разработанной ИС.

Для оценки качества образования используется уровень подготовки выпускаемых специалистов, который определяется объемом и структурированностью полученных студентами знаний по каждой дисциплине учебного плана. Технология опирается на имитационное моделирование образовательного процесса. Для каждого студента имитируется уровень усвоения каждой дисциплины. Для имитации образовательных процессов используются мультиагентные технологии, агентами моделируются преподаватели и студенты, сценами – среды взаимодействия агентов. Основными действиями агентов на сцене «аудиторные занятия» являются: передача знаний преподавателем, посещение занятий студентом, усвоение знаний студентом. На передачу знаний влияют такие параметры преподавателя как: квалификация; компетентность; опыт работы. Параметры преподавателей, влияющие на эффективность передачи знаний, являются управляющими относительно качества образования. Также влияют параметры сцены: лабораторная база, библиотека, качество аудиторий. На посещение занятий студентом влияют параметры преподавателя (личные качества и профессиональные качества), параметры сцены и параметры студента (мотивация, состояние здоровья). Кроме того, на посещение занятий студентом влияют «внешние» параметры: занятия физкультурой и спортом, бытовые условия, доступность развлечений. Ряд этих параметров влияет на состояние здоровья и мотивацию. На мотивацию также влияют такие параметры как: «порог отчисления», стипендия и административные меры. На увеличение уровня знаний в первую очередь влияет посещение занятий. Также оказывает существенное влияние уровень усвоения дисциплин, связанных с данной дисциплиной и базовые знания. Управление качеством образования осуществляется путем подбора значений управляющих параметров модели при многократной имитации. Параметры могут быть изменены как перед запуском имитации, так и на любом шаге в режиме пошаговой имитации.

В статье мы отметим некоторые моменты разработки компьютерной модели. В качестве основного метода моделирования используется агентный подход, т.к. в отличие от системной динамики разработчик определяет поведение агентов на индивидуальном уровне, а глобальное поведение системы в целом возникает как результат деятельности множества агентов (моделирование «снизу вверх»).

Для оценки качества образования используются значения уровней знаний, полученные студентами по каждой дисциплине учебного плана. Для каждого студента имитируется уровень усвоения каждой дисциплины. Для имитации образовательных процессов используются агентные технологии. Используются два типа агентов, имитирующих проактивные сущности, и один тип сцены. Сценами являются аудиторные занятия, на которых происходят действия агентов по передаче и получению знаний. Сцены имеют ряд

параметров, которые могут влиять на эффективность действий агентов и, соответственно, на качество образования. Сцена «Аудиторные занятия» имеет следующие параметры: учебный план, лабораторная база, библиотека, качество аудиторий. Учебный план представляет собой набор дисциплин с проекцией на временную шкалу и связей между дисциплинами, отражающими степень их взаимного влияния с точки зрения усвоения. Набор отношений между дисциплинами является подмножеством декартова произведения набора дисциплин на себя. Лабораторная база определяется набором и качеством лабораторного оборудования. Библиотека – ассортиментом и количеством изданий для каждой группы дисциплин. Качество аудиторий –соответствием санитарным нормам и наличием мультимедийной техники.

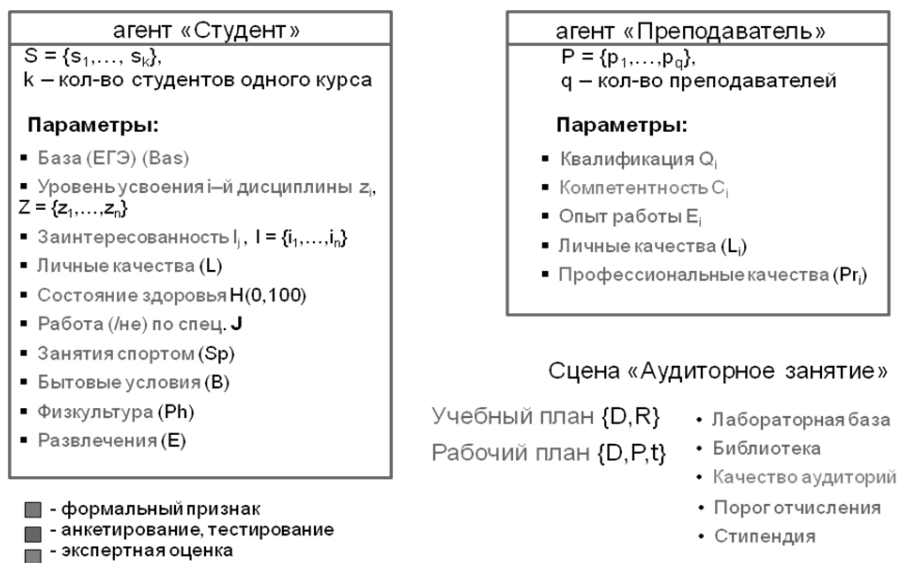
Агентами реализуются проактивные сущности – преподаватель и студент. Количество агентов первого типа равно количеству преподавателей. Каждый агент параметризуется по данным конкретного преподавателя. Параметрами являются: квалификация, компетентность, опыт работы, профессиональные качества, личные качества. Квалификацию преподавателя определяет ученая степень. Профессионально-педагогическая компетентность содержит пять видов компетентности, значения каждого из которых определяются экспертными методами: специальная и профессиональная компетентность в области преподаваемой дисциплины, методическая компетентность в области способов формирования знаний, умений у студентов; социально-педагогическая компетентность в области процессов общения; дифференциально-психологическая компетентность в области мотивов, способностей, направлений учащихся, аутопсихологическая компетентность в области достоинств и недостатков собственной деятельности и личности. Опыт работы задается формально. Профессиональные и личные качества определяются с помощью анкетирования. Параметры преподавателей, влияющие на эффективность передачи знаний, являются управляющими относительно качества образования.

Количество агентов второго типа равно количеству студентов одного курса (взаимодействие между студентами разных курсов в модели не рассматривается). Каждый агент также параметризуется по данным конкретного студента и, кроме того, имеет набор параметров (уровень усвоения каждой дисциплины учебного плана), которые являются выходными и используются для оценки качества образования. Основными параметрами «студента» являются: базовые знания, уровень усвоения дисциплины, способности, мотивация, состояние здоровья. Базовые знания для студентов первого курса определяются по результатам ЕГЭ, далее учитываются значения параметра усвоения каждой дисциплины учебного плана. Способности определяются в процессе психодиагностического тестирования. Мотивация и состояние здоровья могут изменяться в процессе имитации.

Основными действиями агентов на сцене «аудиторные занятия» являются: передача знаний преподавателем, посещение занятий студентом, усвоение знаний студентом. На передачу знаний влияют такие параметры преподавателя как: квалификация, компетентность, опыт работы. Также влияют параметры сцены: лабораторная база, библиотека, качество аудиторий. На посещение занятий студентом влияют параметры преподавателя (личные качества и профессиональные качества), параметры сцены и параметры студента

(мотивация, состояние здоровья). Кроме того, на посещение занятий студентом влияют внешние параметры модели: занятия физкультурой и спортом; бытовые условия; доступность развлечений. Ряд этих параметров влияет на состояние здоровья и мотивацию. На мотивацию также влияют такие внешние параметры как: порог отчисления, стипендия и административные меры. На увеличение уровня знаний в первую очередь влияет посещение занятий. Также оказывает существенное влияние уровень усвоения дисциплин, связанных с данной дисциплиной и базовые знания. Кроме того влияют такие параметры студента как: мотивация; способности и состояние здоровья. А также оказывают влияние на уровень усвоения дисциплины параметры сцены: лабораторная база; библиотека; качество аудиторий.

Все вышеизложенные параметры можно представить в виде следующей схемы на рисунке.



### *Параметризация модели*

#### **Заключение**

Проблема обеспечения качества образования по-прежнему является задачей актуальной и большое количество различных прикладных разработок, рассмотренных в данной статье, помимо разработки ИИММ КНЦ РАН, является тому подтверждением. Перечисленные работы в данном направлении являются далеко не единственными и существуют другие разработки как отечественных, так и зарубежных НИИ.

Предлагаемый же ИИММ КНЦ РАН подход к управлению качеством обучения обеспечивает путем многократной имитации формирование предпочтительных с точки зрения качества выпускаемых специалистов, сценариев управления образовательной деятельностью учебного заведения. Имитационная модель дает возможность прогнозирования последствий изменения значений управляющих параметров относительно качества образования. Это также позволяет проектировать программы переподготовки специалистов путем оперативного изменения учебных и рабочих планов.



#### ЛИТЕРАТУРА

1. Борщев, А.В. Практическое агентное моделирование и его место в арсенале аналитика / А.В. Борщев // Exponenta PRO, 2004. -№ 3/4 (7/8). -С.38-47.
2. Борщев, А.В. Применение имитационного моделирования в России - состояние на 2007 г. /А.В. Борщев // III Всерос. науч.- практ. конф. Имитационное моделирование. Теория и практика (ИММОД-2007), г. Санкт-Петербург, 17-19 октября 2007г: сб. докл., 2007. -Т.1. -С.11-16.
3. Зиновьев, В.В., Гречишкин, П.В. Практическое применение программных средств имитационного моделирования / В.В. Зиновьев, П.В. Гречишкин // III Всерос. науч.-практ. конф. Имитационное моделирование. Теория и практика (ИММОД-2007), Санкт-Петербург, 17-19 октября 2007г.: сб. докл., 2007. - С.78-82.
4. Лоу, А.М., Кельтон, А.Д. Имитационное моделирование. Классика CS. 3-е изд. / А.М. Лоу, А.Д. Кельтон. Спб.: Питер: Киев: Издательская группа BHV, 2004. - 847с.: ил.
5. Swain, J.J. Discrete event simulation software: New frontiers in simulation / J.J. Swain //OR/MS Today. -2007. -V.34, № 5. -pp.32-43.
6. Vapat, V., Sturrock, D. The Arena product family: enterprise modeling solutions / V. Vapat, D. Sturrock // Proc. of the Winter Simulation Conf. New Orleans (USA), 7-10 Dec. -2003. -pp.210-217.
7. Krahl, D. Extend: An interactive simulation tool // Proc. of the Winter Simulation Conf / D. Krahl. New Orleans (USA), 7-10 Dec. -2003. -pp.188-196.
8. Карпов, Ю.Г. Имитационное моделирование систем. Введение в моделирование с AnyLogic 5 / Ю.Г. Карпов. - СПб.: БХВ-Петербург, 2009. – 400 с.
9. Rohrer, M.W. Maximizing simulation ROI with AutoMod / M.W. Rohrer // Proc. of the Winter Simulation Conf. New Orleans (USA), 7-10 Dec.-2003. -pp.201-209.
10. Harrell, C.R. Simulation modeling using Promodel technology / C.R. Harrell // Proc. of the Winter Simulation Conf. New Orleans (USA), 7-10 Dec. -2003. -pp.175-181.
11. Использование pdm-технологий в задачах информационной поддержки системы менеджмента качества вуза. -Режим доступа: <http://info-alt.ru/pdm>
12. Костенко, К.И. Моделирование информационной системы оценки качества образования / К.И. Костенко, С.Д. Некрасов // Университетское управление: практика и анализ. - 2003. – № 3(26). -С.77-83.
13. Назойкин, Е.А. Мультиагентное имитационное моделирование образовательного процесса накопления знаний: дис. ... канд. техн. наук., защищена 19.05.2011, г. Москва, Моск. гос. ун-т приклад. биотехнологии. – М., 2011.- 209 с.: ил.

#### Сведения об авторах

*Самойлов Юрий Олегович* - аспирант, инженер-программист,  
e-mail: [samoilov@arcticsu.ru](mailto:samoilov@arcticsu.ru)

*Уи. О. Samoilov* - post-graduate, programmer

*Быстров Виталий Викторович* - к.т.н., научный сотрудник, e-mail: [vitbist@mail.ru](mailto:vitbist@mail.ru)  
*Vitalij V. Bystrov* -Ph.D. (Tech. Sci.), researcher

УДК 004.94

**Д.Н. Халиуллина**

Институт информатики и математического моделирования Кольского НЦ РАН

## **ТЕХНОЛОГИЯ УПРАВЛЕНИЯ ФИНАНСОВЫМИ ВЛОЖЕНИЯМИ В ИННОВАЦИОННОМ ПРЕДПРИЯТИИ**

### **Аннотация**

В работе рассмотрены вопросы инвестирования научно-инновационного предприятия. Особое внимание уделено технологии управления инвестиционной политикой предприятия, а именно одному из направлений – инновационному инвестированию.

### **Ключевые слова:**

*инновации, научно-инновационное предприятие, время инвестирования.*

**D.N. Khaliullina**

## **TECHNOLOGY OF MANAGEMENT OF ENTERPRISE INNOVATIVE INVESTMENT**

### **Abstract**

The paper present issues of innovative enterprise investment. The technology of management of enterprise investment policy, specifically one of this area – innovative investment, is given special attention.

### **Keywords:**

*innovation, innovative enterprise, investment time.*

### **Введение**

Инновации в любом из секторов экономики требуют финансовых вложений, которые позволяют получить дополнительную прибыль, повысить эффективность деятельности организации или получить социально-экономический эффект.

Научно-инновационное предприятие на начальных этапах своего развития не всегда может развиваться в течение длительного периода времени за счет лишь собственных сил вследствие больших затрат на научные исследования и разработки, малой известности продукции на рынке, и как следствие ее низкой окупаемости. При этом существует большая вероятность обанкротиться по причине низкого спроса на продукцию или его полного отсутствия, поэтому проблема инвестирования для данного предприятия особенно актуальна.

В первую очередь инвестиции необходимы для обеспечения нормального функционирования предприятия в будущем. Они необходимы для того, чтобы обеспечить:

- расширение производства;
- предотвращение морального и физического износа основных фондов и повышение технического уровня производства;
- повышение качества продукции предприятия;
- осуществление мероприятий по охране окружающей среды;
- достижение других целей предприятия [1].

Для поддержания предприятия на рынке и помощи в его становлении и преодолении этапов кризиса до тех пор, пока предприятие полностью не сможет успешно развиваться самостоятельно, возникает необходимость введения внешних инвестиций, которые по тем или иным причинам было невозможно использовать, как часть стартового капитала. Эти инвестиции характеризуются непосредственно их суммой и временем передачи средств на баланс предприятия. При этом наиболее важным аспектом инвестирования является способность предсказать дальнейшее развитие предприятия.

### Инновационное инвестирование предприятия

Для научно-инновационного предприятия большую роль играет инновационное инвестирование в нематериальные активы и новое строительство. В разработанной модели научно-инновационного предприятия предусмотрен выбор следующих форм инвестиций: инновационное инвестирование (разработка новой научно-технической продукции); новое строительство (создание филиалов, дочерних предприятий и т.п.) [2].

При выборе первой формы инвестиций увеличиваются отчисления на научные исследования и разработки, изменяется проект, но структура предприятия не меняется. При выборе второй формы инвестиций в рамках модели создается сеть виртуальных предприятий с общим финансовым фондом, причем каждое предприятие развивается самостоятельно, начиная с первой фазы, а первичное предприятие выступает в качестве головного (рис.1).

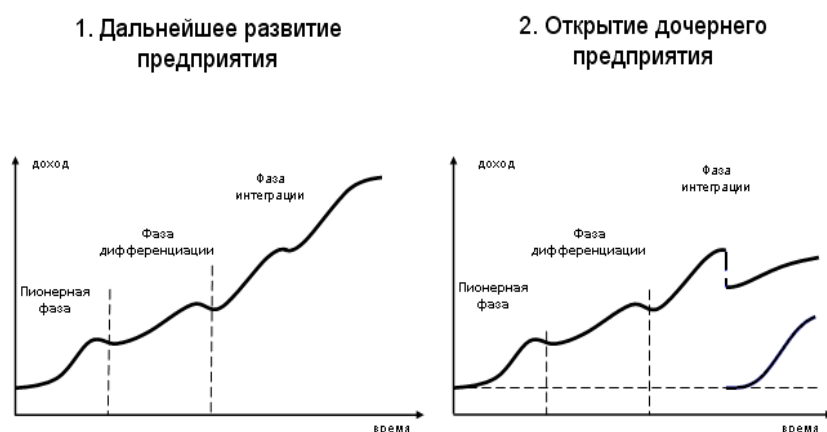


Рис. 1. Варианты инвестиционной политики

Одним из направлений инвестиционной политики предприятия является инновационное инвестирование. В работе модели можно выделить основные этапы инвестирования новых проектов:

- определение цели инвестирования;
- установка инвестиционного капитала и времени инвестирования и имитация модели;
- установка суммы инвестирования и имитация модели;
- выбор наилучшего варианта инвестирования.

Рассмотрим процесс инвестирования более подробно. Сначала устанавливается инвестиционный капитал (1), требуемый отрезок времени функционирования модели путем задания его концов  $t_1$  и  $t_2$  и интервал времени  $\Delta t$ , с которым будет производиться инвестирование (2).

$$C_i = C(t_i), \quad (1)$$

где  $C_i$  - капитал  $i$ -го моделирования;

$C(t_i)$  - капитал в  $i$ -ый момент времени;

$t_i$  -  $i$ -ое время инвестирования;  $i = \overline{1, k}$ .

$$t_i = t_1 + i \cdot \Delta t, \quad (2)$$

где  $t_1$  - начальное время инвестирования;

$t_i$  -  $i$ -ое время инвестирования;

$\Delta t$  - шаг моделирования;

$i$  - номер моделирования;  $i = \overline{1, k}$ .

После многократной имитации (рис. 2) на данном отрезке времени определяется вариант с наилучшим показателем. Значения времени и вложенного капитала нормализуются (3), а выбор наилучшего варианта осуществляется согласно установленному критерию  $P$  (5).

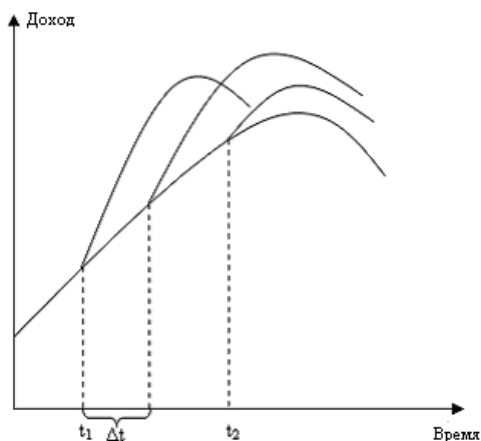


Рис. 2. Многократная имитация

$$t_{ni} = \frac{t_i}{\max(t_i)} \text{ и } C_{ni} = \frac{C_i}{\max(C_i)}, \quad (3)$$

где  $t_{ni}$  - нормализованное значение времени  $i$ -го инвестирования;

$C_{ni}$  - нормализованное значение капитала  $i$ -го моделирования;

$t_i$  -  $i$ -ое время инвестирования;

$C_i$  - капитал  $i$ -го моделирования,  $i = \overline{1, k}$ .

$$p_i = C_{ni} - t_{ni}, \quad (4)$$

где  $p_i$  -  $i$ -ый частный критерий выбора наилучшего времени инвестирования;

$t_{ni}$  - нормализованное значение времени  $i$ -го инвестирования;

$C_{ni}$  - нормализованное значение капитала  $i$ -го моделирования;  $i = \overline{1, k}$ .

$$P = \{p_1, p_2, \dots, p_k\} \rightarrow \max, \quad (5)$$

где  $P$  – критерий выбора наилучшего времени инвестирования;

$p_i$  -  $i$ -ый частный критерий выбора наилучшего времени инвестирования;  $i = \overline{1, k}$ .

При необходимости достижения более высокой точности в качестве исследуемого отрезка берется интервал с лучшими показателями, а значение инвестиционного капитала корректируется.

После определения времени, при котором показатели развития модели являются удовлетворительными, начинается варьирование суммы инвестирования ( $invest_j$  -  $j$ -ая сумма инвестиций, где  $j = \overline{1, m}$ ). Значения времени и вложенного капитала также нормализуются по формуле (3) (здесь  $k = m$ ), а выбор наилучшего варианта осуществляется согласно установленному критерию  $G$  (6), который учитывает максимальную отдачу с начала момента инвестирования  $\Delta C$  и время её достижения  $\Delta t$  (рис. 2).

$$G = \{g_1, g_2, \dots, g_m\} \rightarrow \max, \quad (6)$$

где  $G$  – критерий выбора наилучшего варианта инвестирования;

$g_j$  -  $j$ -ый частный критерий выбора наилучшего варианта инвестирования,

$$g_j = C_{nj} - t_{nj}, \quad (7)$$

где  $g_j$  -  $j$ -ый частный критерий выбора наилучшего времени инвестирования;

$t_{nj}$  - нормализованное значение времени  $j$ -го инвестирования;

$C_{nj}$  - нормализованное значение капитала  $j$ -го моделирования;  $j = \overline{1, m}$ .

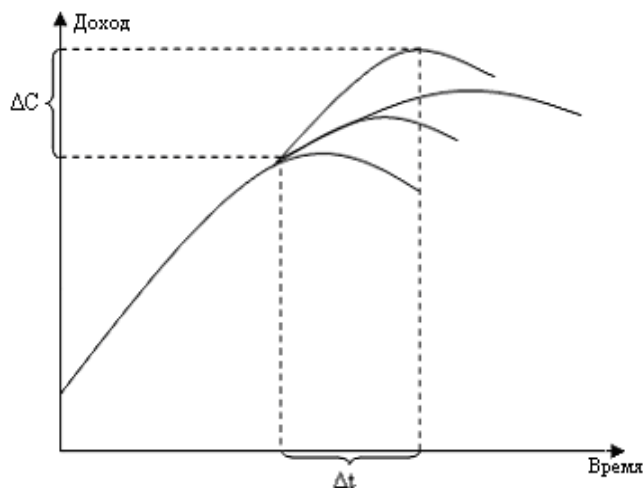


Рис. 3. Выбор наилучшего варианта инвестирования

## Заключение

В качестве результата применения данной технологии, когда инвестиции идут на разработку новой научно-технической продукции, можно представить оценку эффективности инвестирования в различное время (рис. 4).

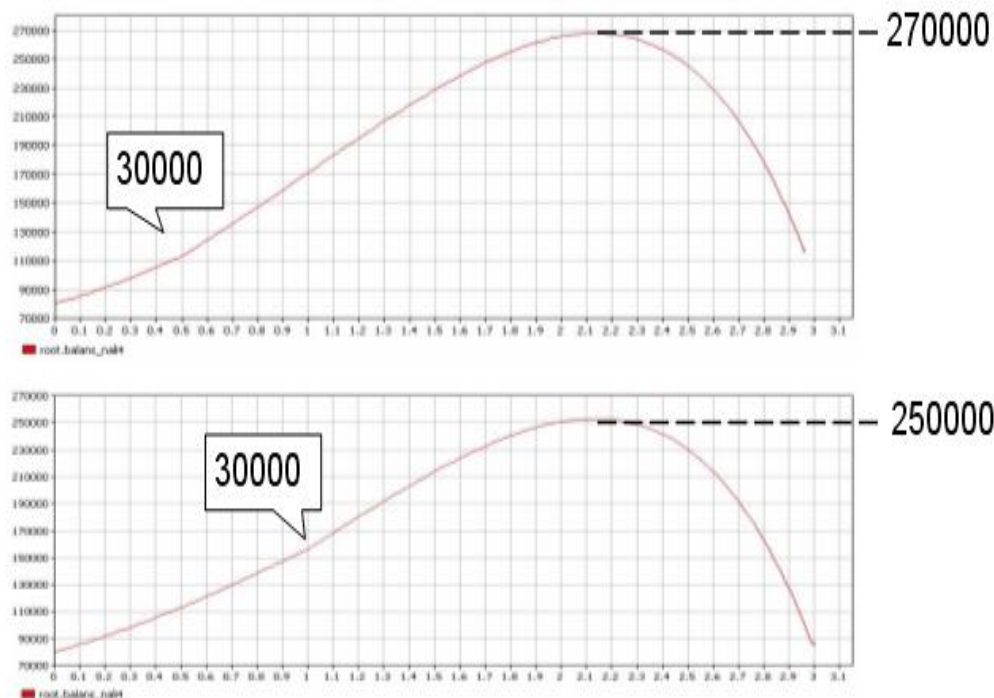


Рис. 4. Оценка эффективности инвестирования в различное время

Анализ результатов показывает, что не вовремя вложенный капитал может привести к значительной потере денежных средств, и это может пагубно сказаться на дальнейшем развитии инновационного предприятия.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Попков, В.П. Организация и финансирование инвестиций / В.П. Попков, В.П. Семенов. - СПб: Питер, 2001. - 224 с.
2. Горохов, А.В. Информационная технология управления инвестиционной политикой сети инновационных предприятий / А.В. Горохов, К.И. Иванов, Д.Н. Халиуллина // Вестник Кольского научного центра. - Апатиты: КНЦ РАН. - 3/2011. - С.81-88.

## Сведения об авторе

Халиуллина Дарья Николаевна - младший научный сотрудник,  
e-mail: [khaliullina@iimm.kolasc.net.ru](mailto:khaliullina@iimm.kolasc.net.ru)  
Darya N. Khaliullina - researcher

УДК 004.94

А.А. Зуенко<sup>1,2</sup>, С.В. Баженов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт информатики и математического моделирования Кольского НЦ РАН,  
Кольский филиал ПетрГУ

<sup>2</sup> Кольский филиал ПетрГУ

## РЕАЛИЗАЦИЯ БИБЛИОТЕКИ АК-ОБЪЕКТОВ\*

### Аннотация

В работе рассмотрена программная реализация базовых операций АК, а также приведены примеры работы пользовательского интерфейса созданной библиотеки.

### Ключевые слова:

*алгебра кортежей, логико-семантический анализ, библиотека АК-объектов.*

A. A. Zouenko, S. V. Bazhenov

## IMPLEMENTATION OF N-TUPLE ALGEBRA LIBRARY

### Abstract

In this paper implementation of n-tuple algebra library is considered and examples of its work are given.

### Keywords:

*n-tuple algebra, logical-semantic analysis, NTA-objects library.*

### Введение

Алгебра кортежей (АК) – алгебраическая система, предназначенная для моделирования и анализа многоместных отношений. Носителем АК является совокупность многоместных отношений, выраженных в матрицеподобных структурах (*C*-системах, *C*-кортежах, *D*-системах, *D*-кортежах), которые называются АК-объектами. В логике *C*-кортежу (*D*-кортежу) соответствует конъюнкция (дизъюнкция) одноместных предикатов, а *C*-системе (*D*-системе) – дизъюнктивная (конъюнктивная) нормальная форма. В отличие от матриц и реляционных таблиц, компонентами АК-объектов служат не отдельные элементы, а их множества. Все операции в АК выполняются без разложения АК-объектов в набор элементарных кортежей, поскольку законы АК основываются на известных свойствах декартовых произведений [1]. В АК операции алгебры множеств обобщены на случай, когда многоместные отношения сформированы в различных схемах (декартовых произведениях).

Матрицеподобная структура АК-объектов дает возможность ясной интерпретации многих логических операций и методов рассуждений в терминах проекций декартовых произведений. Использование в АК обобщенных операций и отношений, аналогичных по смыслу соответствующим операциям и отношениям алгебры множеств, расширяет аналитические возможности АК по сравнению с реляционной алгеброй и теорией бинарных отношений, а также дает возможность реализовывать не только известные в логике методы, но и создает предпосылки для разработки новых методов логико-семантического анализа [2, 3].

---

\* Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты № 12-07-006689-а и № 12-07-000550-а), Президиума РАН (проект 4.3 Программы № 15), ОНИТ РАН (проект 2.3 в рамках текущей Программы фундаментальных научных исследований).

В настоящей статье представлена программная реализация различных видов АК-объектов, а также базовых операций, определенных на них. Описывается оконный пользовательский интерфейс данной библиотеки, обеспечивающий реализацию вычислений в стиле АК. Возможности разработанной библиотеки и интерфейса продемонстрированы на примере задачи выполнимости конъюнктивной нормальной формы (КНФ). К этой задаче сводятся методы проверки логического следования в системах дедуктивных рассуждений. В АК решение задачи выполнимости КНФ осуществляется путем преобразования *D*-системы в *C*-систему, при этом применяются специальные методы ускорения вычислительных процедур, основанные на матричных свойствах АК-объектов [1, 4, 5].

### Особенности реализации

Библиотека АК-объектов реализована с помощью RAD (rapid application development) среды программирования, а именно C++ Builder 6. Для хранения данных широко применяются контейнерные классы из STL (standard template library): `list`, `vector`, `map`, `basic_string`. Для создания пользовательского интерфейса использовались компоненты из VCL (visual control library).

Был задействован набор библиотек Boost версии 1.33, что обеспечило элегантное решение следующих задач:

- разбор регулярных выражений для вычисления сложных выражений, вводимых пользователем (использована библиотека `boost::regex`);
- создание класса, представляющего компоненту АК-объекта (задействована библиотека `boost::dynamic_bitset`).

Для удобства пользователя реализован класс `akDomain`, позволяющий работать с доменами, основанными на разных типах данных: строковом, целочисленном и десятичном. Для строкового типа за основу был взят класс `WideString`, для целочисленного – `int`, а для десятичного – `double`.

Разработан класс атрибута (`akAttribute`), одно из полей которого содержит его имя, а второе указывает на соответствующий атрибуту домен.

Класс схемы АК-объекта `akScheme` нужен для поддержки хранения АК-объектов в разработанном формате, а также для приведения двух систем к одной схеме отношения. Схема отношения является упорядоченным набором атрибутов, для хранения и обработки которого использовался контейнер `list`.

Создан класс для представления компоненты (класс `akComponent`). Данные хранятся в виде набора битов. Количество битов в наборе совпадает с мощностью соответствующего домена. Каждый бит указывает, включен ли соответствующий ему элемент домена, в данную компоненту. Для хранения набора битов используется класс `boost::dynamic_bitset`. В отличие от `bitset`, входящего в STL, класс `boost::dynamic_bitset` позволяет задавать конкретный размер множества в процессе выполнения программы, а не при ее написании. Были созданы “обертки” для задействованных методов упомянутого класса, а также добавлен новый метод, возвращающий `true`, если все элементы множества установлены в `true`. Другими словами, класс `akComponent` “перепредставляет” некоторые методы `boost::dynamic_bitset`, дополняя их собственной функциональностью.



Компоненты, объединяясь в списки, образуют столбцы. Поскольку основой для хранения компонент в системе являются столбцы, класса для представления кортежа создано не было. Вместо этого, кортежи хранятся и передаются в виде массива итераторов, как элементы соответствующих столбцов.

Данные в *C*-системах и *D*-системах представляются одними и теми же элементами и даже имеют одну и ту же структуру, поэтому целесообразным решением было создание чисто абстрактного класса `akISystem`, организующего хранение содержимого системы и служащего интерфейсом для классов `akCSystem` и `akDSystem`. Также `akISystem` содержит реализацию методов, общих для *C*-систем и *D*-систем. Данные в классе `akISystem` хранятся в виде упорядоченного набора столбцов (контейнер `list`).

В программных классах `akCSystem` и `akDSystem` реализованы базовые операции, предусмотренные для *C*-систем и *D*-систем: пересечение, объединение, дополнение. Имеются операции нахождения всех возможных способов слияния кортежей с одной различной компонентой и удаления заведомо лишних кортежей (содержащих пустые компоненты в случае *C*-систем и полные компоненты в случае *D*-систем, а также входящих в какой-либо другой кортеж системы). Если же требуется вычислить выражение, содержащее *C*- и *D*-объекты одновременно, то нужно применить специально предусмотренные методы преобразования в альтернативные классы.

Операция преобразования *D*-системы в *C*-систему используется, в частности, при решении задачи выполнимости КНФ, причем для ускорения вычислений применяется ортогонализация промежуточных *C*-систем. В основе ортогонализации лежат процедуры преобразования *D*-кортежа в *C*-систему и нахождения пересечения полученных *C*-систем.

Далее опишем принципы организации пользовательского программного интерфейса, использующего представленную библиотеку. Данный интерфейс позволяет в режиме оконного диалога осуществлять ввод и редактирование АК-объектов, а также задавать в виде строки программу вычислений сложных выражений с АК-объектами. Для хранения исходных данных и результатов вычислений используется формат XML. Структура XML-файлов представлена ниже. В ней, прежде всего, отражены элементы, которые предназначены для управления (хранения на диске, обработки, удаления) экземплярами классов библиотеки АК-объектов.

## Организация хранения данных в XML

Предусмотрена возможность работы с XML-файлами, для чего был задействован юнит `XMLDoc`. С помощью `XML data binding wizard` на основе XSD-схемы был сгенерирован код, облегчающий доступ к элементам XML-дерева. При чтении данных из файла выполняется обход дерева, создаются и заполняются соответствующие объекты. При записи в файл выполняется обход всех имеющихся объектов, заполняется и сохраняется в файл полученное дерево. Важной особенностью приложения в целом является поддержка Unicode для имен объектов, а также для элементов доменов.

Корневой элемент XML-документа – `ntDoc` – содержит элементы для хранения доменов, атрибутов, схем отношений и систем.

Элемент для хранения доменов `ntDomain` содержит два атрибута. Атрибут `name` служит для обозначения имени домена, а атрибут `type` указывает тип данных домена и может принимать следующие значения: “string” для строкового типа данных, “int” – для целочисленного, “float” – для числа с плавающей запятой. Внутри `ntDomain` содержатся элементы `element`, которые содержат значения, принадлежащие домену.

Элемент `ntAttribute` содержит лишь два атрибута: имя атрибута `name` и имя соответствующего ему домена `domain`.

Элемент `ntScheme` имеет атрибут `name` для обозначения имени схемы и содержит элементы `element`, в каждом из которых указывается атрибут, входящий в схему.

Элемент `ntSystem` имеет более сложную структуру. Атрибут `name` указывает имя системы. `Scheme` содержит имя схемы для описываемой системы. `Type` может принимать значение “c” для *C*-систем или “d” для *D*-систем. Каждая система состоит из элементов `nt`, служащих для представления кортежей. Каждый элемент `nt` содержит элементы `component`, обозначающие компоненты. Каждая компонента содержит элементы `element`, указывающие, какие элементы домена входят в данную компоненту.

### **Особенности пользовательского интерфейса**

Программа оснащена интуитивным оконным пользовательским интерфейсом на основе VCL, позволяющим редактировать АК-объекты и производить операции с ними. Имеется базовая форма и несколько дополнительных. На базовой форме расположены меню, панель инструментов и панель вкладок, содержащая четыре вкладки, на которых находятся все остальные элементы. Предполагается, что пользователь для конкретной решаемой задачи один раз введет исходные данные, используя все вкладки по очереди, чтобы все остальное время работать с последней вкладкой. Возврат на другие вкладки понадобится только для изменения исходных данных.

Одна из особенностей разработанного интерфейса – хранение в таких визуальных компонентах, как `TComboBox`, `TList`, `TStringGrid` пар «Строка – указатель на объект». Иными словами, каждая строка в каждом визуальном компоненте ассоциирована с объектом, который она представляет. Названные визуальные компоненты в паре со строкой могут хранить только указатель на объект типа `TObject` (и его наследников). Были созданы специальные классы, агрегирующие классы из библиотеки АК-объектов и классы, агрегирующие итераторы, указывающие на объекты классов из библиотеки АК-объектов. Все указанные специальные классы являются наследниками `TObject` и потому могут ассоциироваться со строками в упомянутых визуальных компонентах.

### **Разбор выражений**

С помощью `boost::regex` реализован разбор сложных выражений следующего вида:

- <Имя системы>;
- <Выражение><знак бинарной операции><Выражение>;
- <Знак унарной операции><Выражение>;
- (<Выражение>);

Введенное выражение разбирается на объекты типа `akToken`, представляющие лексемы. В случае успешного разбиения (то есть, если были найдены только знаки операций, скобки и имена существующих систем) последовательность `akToken` переводится из инфиксной формы в постфиксную, а именно в инверсную польскую запись (ПОЛИЗ).

В случае успешного перевода в ПОЛИЗ строится дерево объектов типа `akOperation`, представляющих выражения. В случае успешного построения дерева проводится проверка корректности с точки зрения АК. В случае корректности построенного дерева производится вычисление результата.

Объекты класса `akToken` содержат указатель на объект типа `akOperation` и поле, обозначающее тип конкретной лексемы (скобка, конкретный оператор, система). Как и `akToken`, класс `akOperation` был введен для разбора и вычисления выражений и служит для их представления. Выражением может быть и система сама по себе. Из этого вытекает очевидное решение: создать абстрактный класс, наследниками которого будут классы систем (`akSystem`) и классы других операций (рис. 1). В `akOperation` имеются виртуальные методы для вычисления (или возвращения) результата, получения типа результата без его вычисления и проверки корректности поддерева. Кроме `akSystem`, от класса операции унаследованы классы унарной и бинарной операции, которые, в свою очередь, стали родителями для классов конкретных операций.

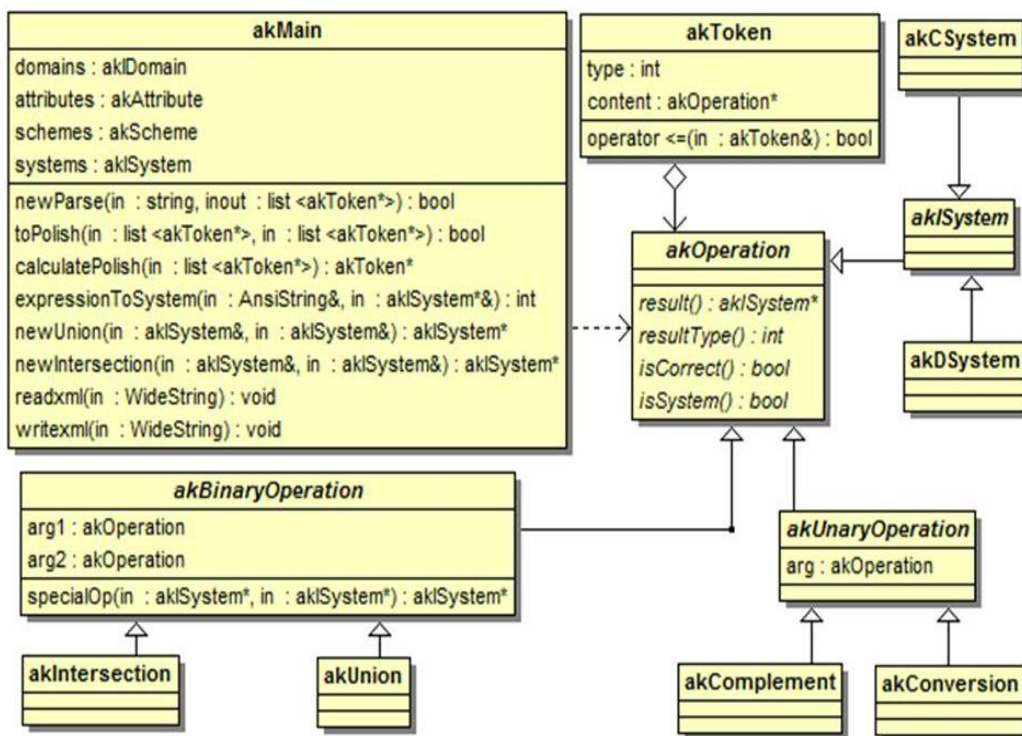


Рис. 1. Классы для представления выражений

Также имеется базовый для библиотеки АК-объектов класс, ориентированный на решение сразу нескольких задач, среди которых размещение АК-объектов в памяти и обеспечение доступа к ним, реализация операций над АК-объектами на верхнем уровне, поддержка основанного на XML формата хранения АК-объектов в файле, реализация разбора сложных выражений и вычисление соответствующих операций над АК-объектами.

### Демонстрация работы программы на примерах

*Пример 1.*

Докажем справедливость одного из правил вывода натурального исчисления, которое называется правилом дилеммы [1]:

$$\frac{A \supset C, B \supset C, A \vee B}{C}$$

что можно записать как

$$\frac{\bar{A} \vee C, \bar{B} \vee C, A \vee B}{C}$$

Подразумевается, что из формул над чертой выводится формула под чертой. Можно считать, что верхние формулы представляют собой посылки, а нижняя – следствие из них. Преобразуем конъюнкцию посылок в АК-объект  $F$ , а предполагаемое следствие – в  $G$ :

$$F = \begin{bmatrix} \{0\} & \emptyset & \{1\} \\ \emptyset & \{0\} & \{1\} \\ \{1\} & \{1\} & \emptyset \end{bmatrix}$$

$$G[X_A X_B X_C] = * * \{1\}$$

Введем АК-объекты  $F$  и  $G$  в программу:

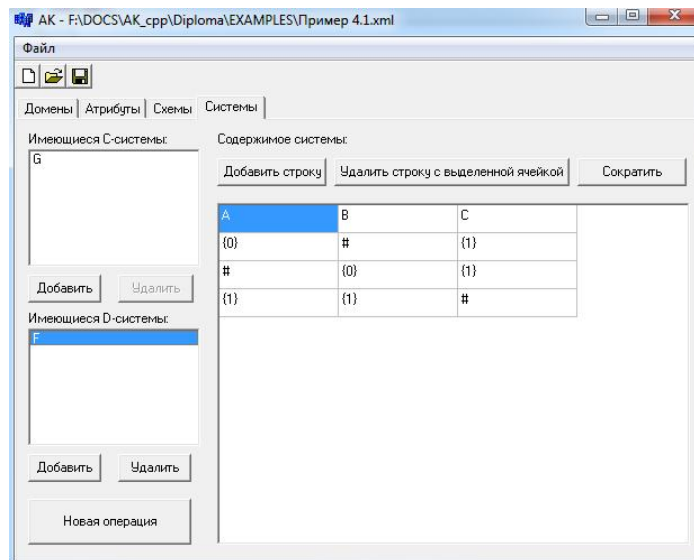


Рис. 2. Ввод АК-объектов

Символ “#” на рис. 2 обозначает фиктивную компоненту “ $\emptyset$ ”.

Чтобы решить задачу, достаточно проверить  $F \cap \bar{G} = \emptyset$ . Для этого введем в программу соответствующее выражение:

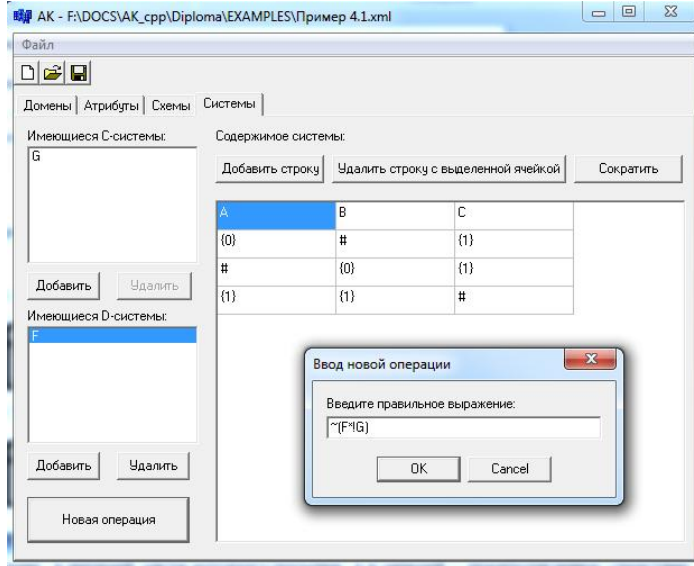


Рис. 3. Ввод выражения

Здесь символ “~” означает преобразование в альтернативный класс, «\*» - пересечение, «!» - дополнение. Введенная строка разбивается на лексемы:

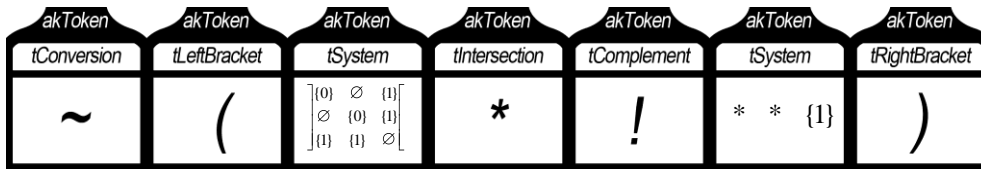


Рис. 4. Внутреннее представление распознанной строки

Затем выражение преобразуется в польскую инверсную запись:



Рис. 5. Выражение в форме ПОЛИЗ

Производится построение дерева:

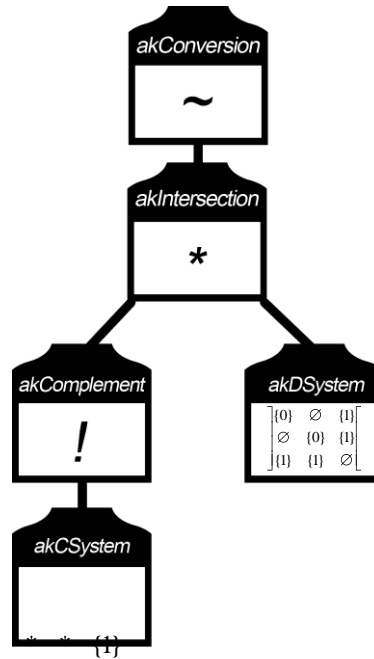


Рис. 6. Дерево операций

Далее вызывается метод result элемента на вершине дерева, который производит вычисление результата. В данном случае результат пуст, а значит, правильность логического следствия доказана.

*Пример 2.*

Проверить правильность логического вывода для следующего рассуждения: «Если Джонс не встречал этой ночью Смита, то либо Смит был убийцей, либо Джонс лжет. Если Смит не был убийцей, то Джонс не встречал Смита этой ночью, и убийство имело место после полуночи. Если убийство имело место после полуночи, то либо Смит был убийцей, либо Джонс лжет. Следовательно, Смит был убийцей».

Выразим данное рассуждение на языке исчисления высказываний [1]. Введем обозначения:

- A – Джонс встречал этой ночью Смита;
- B – Смит был убийцей;
- C – Джонс лжет;
- D – Убийство имело место после полуночи.

Тогда заданное рассуждение можно сформулировать так:

- первое предложение:  $\neg A \supset (B \oplus C)$ ;
- второе предложение:  $\neg B \supset (\neg A \wedge D)$ ;
- третье предложение:  $D \supset (B \oplus C)$ ;
- следствие: B.

Преобразуем первые три предложения для того, чтобы избавиться от импликации и строгой дизъюнкции. Получаем:

$$1) \neg A \supset (B \oplus C) = A \vee (B \wedge \neg C) \vee (\neg B \wedge C);$$

$$2) \neg B \supset (\neg A \wedge D) = B \vee (\neg A \wedge D);$$

$$3) D \supset (B \oplus C) = \neg D \vee (B \wedge \neg C) \vee (\neg B \wedge C).$$

Для представления этих формул АК-объектами используем универсум  $X_1 \times X_2 \times X_3 \times X_4 = \{0,1\}^4$ , где  $A = B = C = D = 1$  и  $\neg A = \neg B = \neg C = \neg D = 0$ . Тогда посылки, которые являются ДНФ, выражаются С-системами:

$$P_1 = \begin{bmatrix} \{1\} & * & * & * \\ * & \{1\} & \{0\} & * \\ * & \{0\} & \{1\} & * \end{bmatrix}; P_2 = \begin{bmatrix} * & \{1\} & * & * \\ \{0\} & * & * & \{1\} \end{bmatrix}; P_3 = \begin{bmatrix} * & * & * & \{0\} \\ * & \{1\} & \{0\} & * \\ * & \{0\} & \{1\} & * \end{bmatrix},$$

а следствие – С-кортежем  $S[X_2] = [\{1\}]$ . Введем АК-объекты  $P_1, P_2, P_3$  и  $S$  в программу:

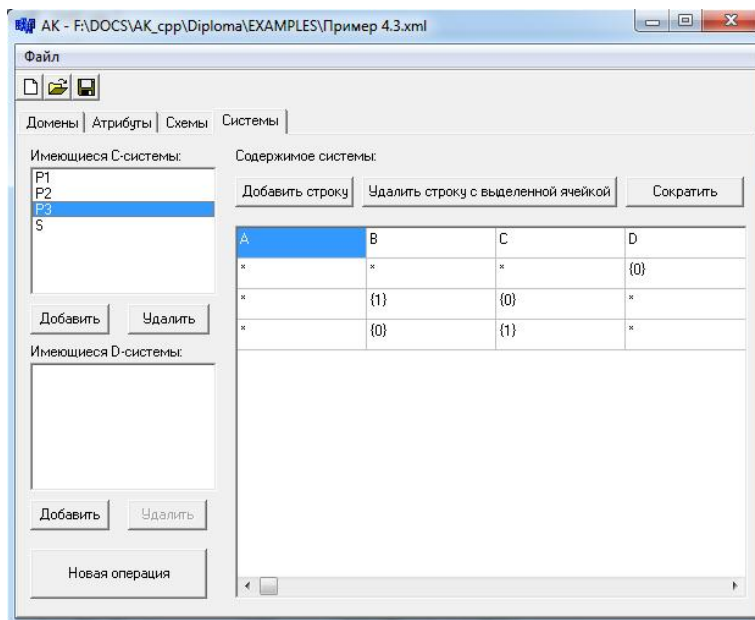


Рис. 7. Окно программы с введенными АК-объектами

Для решения задачи определим пустоту АК-объекта  $P_1 \cap P_2 \cap P_3 \cap \bar{S}$ . Введем в программу соответствующее выражение:

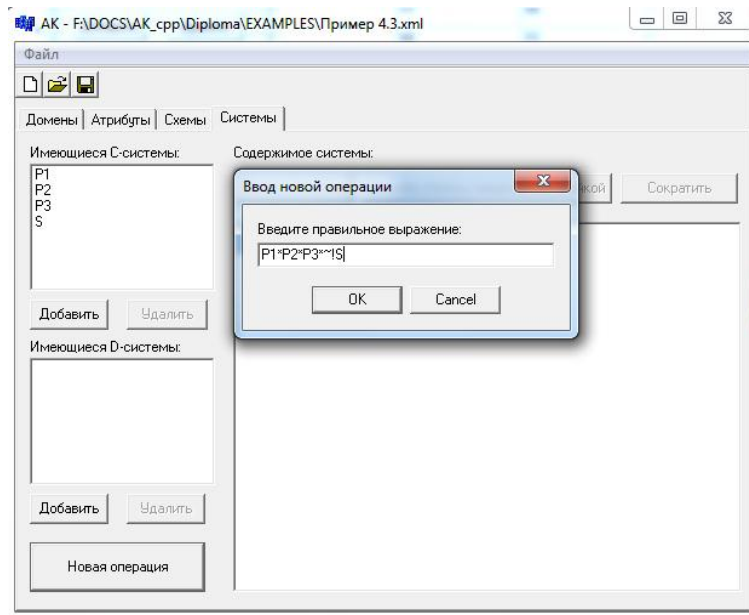


Рис. 8. Ввод выражения

Здесь символ «\*» используется для обозначения операции пересечения, «!» - дополнения, «~» - преобразования в альтернативный класс. Программа разбирает выражение, строит дерево операций и вычисляет результат. После сокращения получаем:

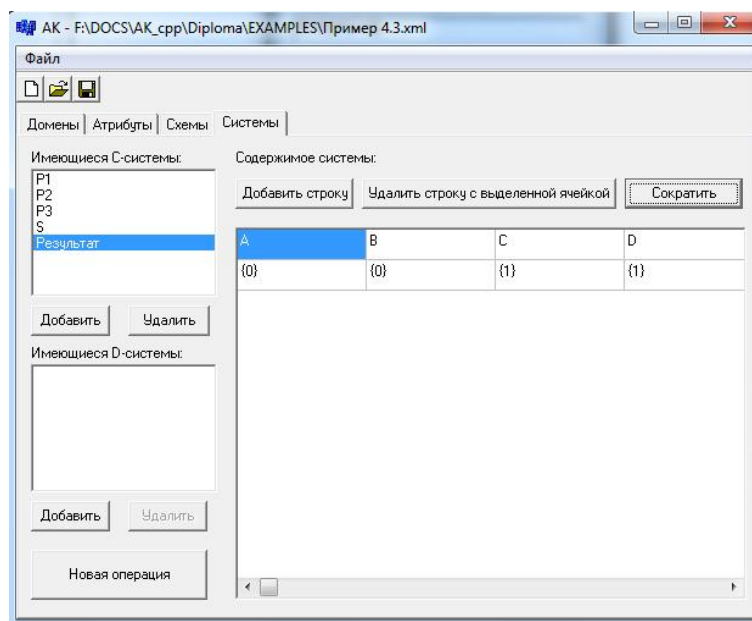


Рис. 9. Результат

Как видим, получилась система  $[\{0\} \{0\} \{1\} \{1\}] \neq \emptyset$ , т.е. вывод неверный.



## Заключение

Разработан ряд классов, отражающих сущности АК. Библиотека реализует не только операции, необходимые для решения задачи выполнимости КНФ, но и другие базовые операции над АК-объектами, имеет большой потенциал для расширения и может служить основой для продолжения работ в заданном направлении. Был применен один из методов ускорения вычислительных процедур, а именно ортогонализация.

Созданный в рамках данной работы программный интерфейс может использоваться при решении пользовательских задач, возникающих в области логико-семантического анализа информации, задач логико-вероятностного анализа структурно-сложных систем, задач планирования, задач моделирования динамических систем и т.п. [6, 7].

## ЛИТЕРАТУРА

1. Кулик, Б.А., Зуенко, А.А., Фридман, А.Я. Алгебраический подход к интеллектуальной обработке данных и знаний / Б.А. Кулик, А.А. Зуенко, А.Я. Фридман. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. – 235 с.
2. Kulik, B., Fridman, A., Zuenko, A. Logical Analysis of Intelligence Systems by Algebraic Method / B. Kulik, A. Fridman, A. Zuenko // Cybernetics and Systems 2010: Proceedings of Twentieth European Meeting on Cybernetics and Systems Research (EMCSR 2010) Vienna, Austria, 2010. – pp.198-203.
3. Зуенко, А.А. Реализация комбинированных методов логико-семантического анализа с использованием алгебры кортежей / А.А. Зуенко, Б.А. Кулик, А.Я. Фридман // Тринадцатая национальная конференция по искусственному интеллекту с международным участием, 16-20 октября 2012г., г. Белгород: труды конференции. - Белгород: Изд-во БГТУ, 2012. -Т.2. - С.67-75.
4. Кулик, Б.А. Математическое отношение как основная структура логики / Б.А. Кулик // Труды междунар. научной школы «Моделирование и анализ безопасности и риска в сложных системах – 2008» СПб., ГУАП, 2008. – С.190-192.
5. Зуенко, А.А. Унификация обработки данных и знаний на основе общей теории многоместных отношений / А.А. Зуенко, Б.А. Кулик, А.Я. Фридман // Искусственный интеллект и принятие решений, 2010. – Вып. 3. – С.52-62.
6. Kulik, B. Logical Analysis of Intelligence Systems by Algebraic Method /B. Kulik, A. Fridman, A. Zuenko // Cybernetics and Systems 2010: Proceedings of Twentieth European Meeting on Cybernetics and Systems Research (EMCSR 2010) Vienna, Austria, 2010. – pp.198-203.
7. Зуенко, А.А. Булевы алгебры как средство интеллектуального анализа систем рассуждений / А.А. Зуенко, А.Я. Фридман, Б.А. Кулик // XII Международная научная конф. имени Т.А. Таран «Интеллектуальный анализ информации ИАИ-2012», г. Киев, 16-18 мая 2012 г.: сб. тр. / гл. ред. С.В. Сирота. – К.: Просвіта, 2012. – С.70-78.

## Сведения об авторах

*Зуенко Александр Анатольевич* - к.т.н, научный сотрудник,

e-mail: [zuenko@iimm.kolasc.net.ru](mailto:zuenko@iimm.kolasc.net.ru)

*Alexander A. Zouenko* - Ph.D. (Tech. Sci.), researcher

*Баженов Сергей Владиславович* – студент, e-mail: [bazhenov@arcticsu.ru](mailto:bazhenov@arcticsu.ru)

*Sergey V. Bazhenov* – student

Научное издание

**ТРУДЫ  
Кольского научного центра РАН  
4/2012(11)**

**ИНФОРМАЦИОННЫЕ  
ТЕХНОЛОГИИ  
ВЫПУСК 3**

Технический редактор Мигулян С.И.  
Редактор Малыгина С.Н.

**Лицензия ПД № 00801 от 6 октября 2000 г.**

Подписано к печати 20.12.2012 г.  
Формат бумаги 60x84 1/8  
Бумага офсетная. Печать офсетная. Гарнитура Times/Cirillic  
Усл. печ. л. 25.2. Заказ № 25. Тираж 100 экз.

---

*Российская Академия Наук*

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Кольский научный центр центра Российской академии наук  
184209, г. Апатиты Мурманская область, ул. Ферсмана, д.14

Отпечатано подразделением оперативной полиграфии  
Кольского филиала Петр ГУ.  
184209, г. Апатиты, Мурманская область, Космонавтов, 3