

# **СИСТЕМЫ И СРЕДСТВА ИНФОРМАТИКИ**

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

Издается с 1989 года

Журнал выходит ежеквартально

## **Учредитель:**

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

## **РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ**

академик РАН И. А. Соколов — председатель Редакционного совета  
академик РАН Г. И. Савин

академик РАН А. Л. Стемпковский

член-корреспондент РАН Ю. Б. Зубарев

профессор Ш. Долев (S. Dolev, Beer-Sheva, Israel)

профессор Ю. Кабанов (Yu. Kabanov, Besancon, France)

профессор М. Никулин (M. Nikulin, Bordeaux, France)

профессор В. Ротарь (V. Rotar, San-Diego, USA)

профессор М. Финкельштейн (M. Finkelstein, Bloemfontein, South Africa)

## **РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ**

академик РАН И. А. Соколов — главный редактор

профессор, д.ф.-м.н. С. Я. Шоргин — заместитель главного редактора

д.т.н. В. Н. Захаров проф., д.г.-м.н. Р. Б. Сейфуль-Мулюков

проф., д.ф.-м.н. А. И. Зейфман д.ф.-м.н. В. И. Синицын

проф., д.т.н. В. Д. Ильин проф., д.т.н. И. Н. Синицын

проф., д.ф.-м.н. Л. А. Калиниченко проф., д.ф.-м.н. В. Г. Ушаков

проф., д.т.н. К. К. Колин к.ф.-м.н. А. К. Горшенин — отв. секретарь

проф., д.ф.-м.н. В. Ю. Королев к.ф.-м.н. С. А. Христочевский

## **Редакция**

профессор, д.г.-м.н. Р. Б. Сейфуль-Мулюков

к.ф.-м.н. Е. Н. Арутюнов

С. Н. Стригина

© Федеральный исследовательский центр «Информатика  
и управление» Российской академии наук, 2018

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

Журнал входит в систему Российского индекса научного цитирования (РИНЦ)

Журнал включен в базу данных CrossRef (систему DOI — Digital Object Identifier),  
в базу данных Ulrich's periodicals directory

и в информационную систему «Общероссийский математический портал Math-Net.Ru»

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

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

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

# **СИСТЕМЫ И СРЕДСТВА ИНФОРМАТИКИ**

**Том 28 № 3 Год 2018**

## **СОДЕРЖАНИЕ**

Аналитическое моделирование распределений с инвариантной мерой в вольтерровских стохастических системах

**И. Н. Синицын, В. И. Синицын**

**4**

Выбор серверного решения для цифровой платформы поиска и анализа текстов

**В. В. Ядринцев, К. В. Клюбина, И. А. Тихомиров,**

**А. Ф. Гершельман**

**26**

Анализ функционирования информационно-аналитических систем: методика расчета временных затрат и численности персонала

**А. В. Борисов, А. В. Босов, А. В. Иванов, А. И. Стефанович**

**39**

Бета-полиномиальные априорные плотности в байесовских моделях надежности

**А. А. Кудрявцев, С. И. Палионная, С. Я. Шоргин**

**54**

Прогнозирование моментов конечных нормальных смесей с использованием нейронных сетей прямого распространения

**А. К. Горшенин, В. Ю. Кузьмин**

**62**

Оценка формы отклика в сигналах магнитоэнцефалограмм с шумом в виде конечной нормальной смеси

**М. Б. Гончаренко**

**72**

Анализ зависимостей между показателями при прогнозировании объема грузоперевозок

**К. Р. Усманова, С. П. Кудияров, Р. В. Мартышкин,**

**А. А. Замковой, В. В. Стрижов**

**86**

Некоторые аспекты оценки эффективности облачных технологий

**А. А. Засаринный, Ю. С. Ионенков, А. П. Сучков**

**104**

Анализ процессов межведомственного информационного взаимодействия

**А. П. Сучков**

**118**

Архитектура системы предоставления сервисов цифровой платформы для научных исследований

**В. А. Кондрашев**

**131**

# **СИСТЕМЫ И СРЕДСТВА ИНФОРМАТИКИ**

Том 28 № 3 Год 2018

## **СОДЕРЖАНИЕ**

Накладные расходы виртуализации и влияющие  
на них факторы

**В. Б. Егоров** **141**

Метаязык для гибридных интеллектуальных систем  
визуального управления электрическими сетями:  
ресурсы, свойства и действия

**А. В. Колесников, С. В. Листопад, Ф. Г. Майтаков** **153**

Визуально-образное моделирование эффекта синергии  
в гибридных интеллектуальных многоагентных системах

**И. А. Кириков, А. В. Колесников, С. В. Листопад** **165**

Стадии целенаправленного извлечения знаний,  
имплицированных в параллельных текстах

**И. М. Зацман** **175**

Определение индикаторов интенсивности переноса научных  
знаний в сферу технологий

**В. А. Минин, И. М. Зацман, В. А. Хавансков,  
С. К. Шубников** **189**

Процессы генерализации в аналоговой и цифровой  
картографии

**Д. А. Никишин** **204**

Линейное упорядочение множества правил в системе  
извлечения биографических фактов Т-парсер

**И. М. Адамович, О. И. Волков** **217**

Технология назначенных платежей в среде цифровых  
двойников

**В. Д. Ильин** **227**

Некоторые оценки поисковых возможностей  
интернет-каталогов российских библиотек

**Н. Е. Калёнов** **236**

Об авторах **243**

Правила подготовки рукописей статей **247**

Requirements for manuscripts **251**

# АНАЛИТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ С ИНВАРИАНТНОЙ МЕРОЙ В ВОЛЬТЕРРОВСКИХ СТОХАСТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ\*

*И. Н. Синицын<sup>1</sup>, В. И. Синицын<sup>2</sup>*

**Аннотация:** Разработаны точные и приближенные методы аналитического моделирования процессов в нелинейных вольтерровских стохастических системах (ВСтС) в условиях аддитивных и параметрических белых шумов. Изучена устойчивость стационарных регулярных и нерегулярных режимов по первым двум вероятностным моментам. Подробно рассмотрены вопросы аналитического моделирования одномерных распределений с инвариантной мерой в двумерной дифференциальной ВСтС. Результаты допускают обобщения на случаи автокоррелированных шумов, функций взаимодействия, допускающих интегральное (интегродифференциальное) представление, а также дискретных и непрерывно-дискретных ВСтС.

**Ключевые слова:** аналитическое моделирование; вольтерровская стохастическая система (ВСтС); динамика популяций; метод нормальной аппроксимации (МНА); метод статистической линеаризации (МСЛ); нормальный (гауссовский) стохастический процесс (СтП); стохастическая система (СтС); уравнение Пугачева для характеристической функции; уравнение Фоккера–Планка–Колмогорова (ФПК) для плотности; распределение с инвариантной мерой

**DOI:** 10.14357/08696527180301

## 1 Введение

Методы теории распределений с инвариантной мерой впервые были разработаны для задач механики с гладкими нелинейными характеристиками и подробно рассмотрены в [1–11]. В [12–16] эти методы использованы в задачах системного анализа управления и информатики. В [17, 18] методы теории распределений с инвариантной мерой впервые развиты для стохастических систем (СтС) с разрывными характеристиками.

Вопросам анализа и синтеза стохастических динамических моделей популяций посвящена обширная литература (см., например, [19, 20]). В основе

---

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

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

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

исследований по стохастической динамике популяций лежат одно- и многопопуляционные модели, описываемые дифференциальными линейными и нелинейными ВСтС, рассматривались интегродифференциальные ВСтС, приводимые к дифференциальному. При этом стохастические возмущения принимались в виде аддитивных и параметрических белых шумов, как правило гауссовских. Поэтому основным аппаратом была теория ВСтС на основе уравнений Фоккера–Планка–Колмогорова (ФКП) [21–23]. Размерность исходных уравнений предполагалась небольшой, для многомерных ВСтС использовались модели с аддитивными (гауссовскими) белыми шумами.

В [24] разработаны два эффективных метода аналитического моделирования эквивалентных нормальных (гауссовских) распределений в многоуровневых ВСтС. Первый метод основан на нормальной аппроксимации для многомерной ВСтС с аддитивными и нелинейными параметрическими гауссовскими и негауссовскими белыми шумами для функций межвидового взаимодействия произвольного вида, в том числе разрывных. Второй метод основан на статистической линеаризации функций межвидового взаимодействия и сведении исходной ВСтС к эквивалентной ВСтС с аддитивными линейными и параметрическими шумами, получена совместная система уравнений для вероятностных моментов первого и второго порядка. Рассмотрены вопросы аналитического моделирования стационарных регулярных и стохастических процессов (СтП). В качестве тестовых примеров рассмотрены уравнения нелинейного корреляционного аналитического моделирования одной и двух популяций в стохастической среде. Изучены стационарные СтП и их устойчивость. Сформулированы основные выводы и обобщения.

Рассмотрим точные и приближенные методы аналитического моделирования СтП в ВСтС на основе теории распределений с инвариантной мерой.

Статья содержит введение, 4 раздела и заключение. Уравнения для распределений в гауссовых и негауссовых ВСтС представлены в разд. 2. Точные методы аналитического моделирования распределений с инвариантной мерой в ВСтС рассмотрены в разд. 3. Четвертый раздел посвящен применению методов нормальной аппроксимации и статистической линеаризации. В последнем разд. 5 изучены распределения с инвариантной мерой в двумерной ВСтС. Заключение содержит выводы и некоторые обобщения.

## 2 Уравнения для распределений в вольтерровских стохастических системах

**2.1.** Следуя [24], примем, что детерминированная дифференциальная вольтерровская система описывается векторным дифференциальным уравнением вида:

$$\dot{Y} = [\varepsilon - \gamma(Y, t)] Y, \quad Y(t_0) = Y_0. \quad (1)$$

Здесь  $Y = [Y_1 \cdots Y_N]^T$  — вектор численности популяций;  $\varepsilon = [\varepsilon_{ij}]$  — матрица коэффициентов прироста (гибели);  $\gamma = \gamma(Y, t) = [\gamma_{ij}]$  ( $i, j = \overline{1, N}$ ) — матрица функций межвидового взаимодействия. Добавим в (1), во-первых, вектор аддитивных возмущений типа белых шумов  $\alpha_0 + \sigma_\alpha^{(1)} V^{(1)}$  и, во-вторых, векторы параметрических белых шумов  $\varepsilon_0 + \sigma_\varepsilon^{(2)} V^{(2)}$  и  $\gamma_0 + \sigma_\gamma^{(3)} V^{(3)}$ , где  $V^{(l)} = [V_1^{(l)} \cdots V_N^{(l)}]^T$  ( $l = \overline{1, 3}$ ) — векторы белых шумов, представляющих собой производные от соответствующих процессов с независимыми приращениями  $W$ ,  $V = \dot{W}$ ;  $\alpha_0 = [\alpha_{01} \cdots \alpha_{0N}]^T$ ,  $\varepsilon_0 = [\varepsilon_{01} \cdots \varepsilon_{0N}]^T$ ,  $\gamma_0 = [\gamma_{01} \cdots \gamma_{0N}]^T$  — векторы аддитивных и параметрических детерминированных постоянных возмущений;  $\sigma_\alpha^{(1)} = [\sigma_{\alpha,ij}^{(1)}]$  ( $i, j = \overline{1, n}$ ) — матрица стохастических аддитивных возмущений;  $\sigma_\varepsilon^{(2)} = [\sigma_{\varepsilon,ij}^{(2)}]$  и  $\sigma_\gamma^{(3)} = [\sigma_{\gamma,ij}^{(3)}]$  — матрицы стохастических параметрических возмущений. Таким образом, в качестве исходного векторного стохастического дифференциального уравнения возьмем следующее векторно-матричное уравнение (понимаемое в смысле Стратоновича [21–23]):

$$\begin{aligned} \dot{Y} = & \left\{ \varepsilon_0 + \sigma_\varepsilon^{(2)}(t)V^{(2)} - \left[ \gamma(Y, t) + \gamma_0 + \sigma_\gamma^{(3)}(Y, t)V^{(3)} \right] \right\} Y + \alpha_0 + \\ & + \sigma_\alpha^{(1)}(t)V^{(1)}, \quad Y(t_0) = Y_0. \end{aligned} \quad (2)$$

Для приведения уравнения (2) к форме Ито используется следующая формула [21–23]:

$$a = a_\theta + \theta \left[ \frac{\partial}{\partial \eta} B(Y, t) \nu(t) B(\eta, t)^T \right]_{\eta=Y}^T. \quad (3)$$

Здесь  $\theta = 1/2$ , причем вектор-функция  $a_\theta$  отвечает регулярной части (2), а матричная функция  $B$  — стохастической части (2) при  $V = [V^{(1)T} V^{(2)T} V^{(3)T}]^T$ . В силу (3) ВСтС будет описываться следующим векторно-матричным стохастическим дифференциальным уравнением Ито:

$$\dot{Y} = a(Y, t) + B(Y, t)V, \quad Y(t_0) = Y_0. \quad (4)$$

Здесь введены следующие обозначения:

$$\begin{aligned} a &= a(Y, t) = \varepsilon_0 Y - [\gamma_0 + \gamma(Y, t)] Y + \alpha_0 + \Delta a(Y, t); \\ B = B(Y, t) &= \begin{bmatrix} [b^{(1)}(Y, t)] & 0 & 0 \\ 0 & [b^{(2)}(Y, t)] & 0 \\ 0 & 0 & [b^{(3)}(Y, t)] \end{bmatrix}, \end{aligned}$$

где

$$b^{(1)}(Y, t) = \left[ \sigma_\alpha^{(1)}(t) \ 0 \ 0 \right];$$

$$\begin{aligned} b^{(2)}(Y, t) &= \begin{bmatrix} 0 & p\sigma_{\varepsilon}^{(1)}(t)Y & 0 \end{bmatrix}; \\ b^{(3)}(Y, t) &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & \sigma_{\gamma}^{(3)} - \gamma(Y, t)Y \end{bmatrix}, \end{aligned}$$

а вектор-функция  $\Delta a(Y, t)$  вычисляется согласно (3).

**Замечание 2.1.** Если  $\gamma(Y, t)$  является эредитарной матричной функцией, описываемой интегральным уравнением с затухающей памятью, то такую интегродифференциальную систему можно привести к дифференциальной путем введения соответствующих инструментальных переменных [21–24].

**2.2.** Из общей теории нелинейных дифференциальных СтС [21–23] известно, что одно- и многомерные распределения получаются путем интегрирования уравнений для плотностей ФПК в случае гауссовых СтС и интегродифференциальных уравнений Пугачева для характеристических функций в случае негауссовых СтС. При больших возмущениях интегрирование этих уравнений встречает серьезные вычислительные трудности даже для одномерных распределений. Среди известных приближенных методов аналитического моделирования распределений широкое распространение получили методы нормальной аппроксимации (МНА) и статистической линеаризации (МСЛ), а также методы параметризации распределений (методы моментов, семиинвариантов, ортогональных разложений и их модификаций) [21–23, 25–27].

**2.3.** В случае гауссовых белых шумов в ВСтС, основываясь на уравнении (4), представим уравнение ФПК для одномерной плотности  $f_1 = f_1(y; t)$  с соответствующим начальным условием в следующем виде:

$$\begin{aligned} \frac{\partial f_1}{\partial t} &= -\frac{\partial^T}{\partial y} [a(y, t)f_1(y, t)] + \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial y} \frac{\partial^T}{\partial y} [B(y, t)\nu(t)B(y, t)^T f_1(y, t)], \\ f_1(y; t_0) &= f_0(y). \end{aligned} \quad (5)$$

Полагая в (5), во-первых,  $\partial f_1 / \partial t = 0$ , во-вторых, постоянными интенсивности  $\nu$  белых шумов и параметров ВСтС, получим следующее уравнение для определения стационарных распределений:

$$\frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial y} \frac{\partial^T}{\partial y} [B(y)\nu B(y)^T f_1(y)] - \frac{\partial^T}{\partial y} [a(y)f_1(y)] = 0. \quad (6)$$

Двумерное распределение СтП в (4) вычисляется по следующей формуле:

$$f_2(y_1, y_2; t_1, t_2) = f_1(y_1; t_1) f(y_2; t_2 | y_1; t_1).$$

Здесь переходная плотность  $f(y_2; t_2 | y_1; t_1)$  удовлетворяет уравнению ФПК вида (5) для момента времени  $t_2$ :

$$\begin{aligned} \frac{\partial f(y_2; t_2 | y_1; t_1)}{\partial t_2} &= -\frac{\partial^T}{\partial y_2} [a(y_2; t_2) f(y_2; t_2 | y_1; t_1)] + \\ &+ \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial y_2} \frac{\partial^T}{\partial y_2} \left[ B(y_2; t_2) \nu(t_2) B(y_2; t_2)^T f(y_2; t_2 | y_1; t_1) \right], \\ f(y; \tau | \eta; \tau) &= \delta(y - \eta). \end{aligned}$$

Аналогично вычисляются распределения третьего и высших порядков  $n$ , если использовать следующие начальные условия:

$$\begin{aligned} f_n(y_1, \dots, y_{n-1}, y_n; t_1, \dots, t_{n-1}, t_{n-1}) &= \\ &= f_{n-1}(y_1, \dots, y_{n-1}; t_1, \dots, t_{n-1}) \delta(y_n - y_{n-1}) \end{aligned}$$

и рекуррентные формулы:

$$f_n(y_1, \dots, y_n; t_1, \dots, t_n) = f_1(y_1; t_1) f(y_2; t_2 | y_1; t_1) \cdots \\ \cdots f(y_n; t_n | y_{n-1}; t_{n-1}) \text{ при } t_1 \leq t_2 \leq \cdots \leq t_n.$$

Для негауссовых белых шумов в ВСтС вида (4) (в том числе с разрывными характеристиками), когда известны одномерные характеристические функции  $h_j(\mu; t)$  независимых белых шумов  $V^{(1)}$ ,  $V^{(2)}$  и  $V^{(3)}$ , интегродифференциальное уравнение Пугачева для одномерной характеристической функции  $g_1 = g_1(\lambda; t)$  вместе с начальными условиями имеет вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial g_1}{\partial t} &= \frac{1}{(2\pi)^N} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \left[ i\lambda^T a + \sum_{j=1}^N \chi_j(B_j \lambda; t) \right] \exp(i(\lambda - \mu)^T y) g_1(\mu; t) dy d\mu, \\ g_1(\lambda; t_0) &= g_0(\lambda). \quad (7) \end{aligned}$$

Здесь  $\chi_j = (\partial/\partial t) \ln h_j(\mu; t)$  — логарифмические производные  $h_j(\mu; t)$  ( $j = \overline{1, N}$ ). Характеристические функции  $n$ -мерных распределений СтП описываются уравнениями вида (7) с заменой  $t$  на  $t_n$  и начальными условиями

$$g_n(\lambda_1, \dots, \lambda_n; t_{n-1}, t_{n-1}) = g_{n-1}(\lambda_1, \dots, \lambda_{n-2}, \lambda_{n-1} + \lambda_n; t_1, \dots, t_{n-1}).$$

**Замечание 2.2.** В том случае, когда возмущения в (4) являются автокоррелированными и известны их авто- и взаимоковариационные функции, согласно [21–23] следует добавить уравнения формирующих фильтров (ФФ). При этом порядок исходных уравнений увеличится на число ФФ. Для ВСтС сверхбольшой размерности, если учесть фильтрационные свойства ВСтС, целесообразно применение методов канонических разложений [22, 23, 28].

**2.4.** Важным частным классом ВСтС являются системы с сингулярной диффузионной матрицей  $\sigma = B\nu B^T$ :

$$\dot{Y}' = Q(Y', Y'', t); \quad \dot{Y}'' = P(Y', Y'', t) + B_0(Y', Y'', t) V_0. \quad (8)$$

Здесь  $Y'$  и  $Y''$  —  $s$ -мерные векторы ( $2s = N$ );  $V_0$  —  $r$ -мерный гауссовский белый шум интенсивности  $\nu_0 = \nu_0(t)$ , причем матрица диффузии  $\sigma_0 = \sigma_0(Y', t) = B_0(y', y'', t)\nu_0(t)B_0(y', y'', t)^T$  не сингулярна ( $|\det \sigma_0^{-1} \neq 0$ ). В этом случае уравнения для одномерных распределений записываются на основе (5), (6) или (7)

**2.5.** В [19] Вольтерра исследовал детерминированную систему « $N$  хищников —  $N$  жертв» с одним трофическим уровнем. Стохастическим аналогом такой системы будет следующая:

$$\begin{aligned} \dot{Y}_i &= \left( \varepsilon_{0i} + \sigma_i^\varepsilon V^{(2)} \right) Y_i - \sum_{j=1}^N \left( p_{0ij} + \sigma_{ij}^p V^{(3)} \right) Y_i Y_j + \alpha_{0i} + \sigma_i^\alpha V^{(1)}, \\ Y_i(t_0) &= Y_{i0}. \end{aligned} \quad (9)$$

Полагая

$$\begin{aligned} Y &= [Y_1 \cdots Y_N]^T; \quad V = \left[ V^{(1)T} \ V^{(2)T} \ V^{(3)T} \right]^T; \\ a &= a(Y, t) = \left[ \alpha_{0i} + \varepsilon_{0i} Y_i - \sum_{j=1}^N p_{0ij} Y_i Y_j \right]; \\ B &= B(y, t) = \begin{bmatrix} b^{(1)}(Y, t) & 0 & 0 \\ 0 & b^{(2)}(Y, t) & 0 \\ 0 & 0 & b^{(3)}(Y, t) \end{bmatrix}, \end{aligned}$$

где

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

приведем (9) к виду (4).

Аналогично приводятся в виду (4) ВСтС с двумя трофическими уровнями:

$$\dot{Y}'_l = \left( \varepsilon'_{0l} + \sigma_l'^{\varepsilon} V'^{(2)} \right) Y'_l - \sum_{j=1}^{N'} \left( p_{0lj}' + \sigma_{lj}'^p V'^{(3)} \right) Y'_l Y''_j + \alpha'_{0l} + \sigma_l'^{\alpha} V'^{(1)},$$

$$Y'_l(t_0) = Y'_{l0} \quad (l = \overline{1, N'}) ; \quad (10)$$

$$\dot{Y}''_k = - \left( \varepsilon''_{0k} + \sigma_k''^{\varepsilon} V''^{(2)} \right) Y''_k + \sum_{j=1}^{N''} \left( p''_{0kj} + \sigma_{kj}''^p V''^{(3)} \right) Y''_k Y'_j +$$

$$+ \alpha''_{0k} + \sigma_k''^{\alpha} V''^{(1)}, \quad Y''_k(t_0) = Y''_{k0} \quad (k = \overline{1, N''}) . \quad (11)$$

### 3 Точные методы аналитического моделирования распределений с инвариантной мерой

**3.1.** Из теории распределений с инвариантной мерой в гауссовских СтС известны следующие теоремы [21–23]:

**Теорема 3.1.** Функция  $f_1(y, t)$  будет решением уравнения ФПК (5) с гауссовским шумом  $V$  с интенсивностью  $\nu = \nu(t)$  и матрицей диффузии  $\sigma(y, t) = B(y, t)\nu(t)B(y, t)^T$  тогда и только тогда, когда векторная функция  $a(y, t)$  допускает представление

$$a(y, t) = a_1^1(y, t) + a_2^1(y, t) \quad (12)$$

такое, что функция  $f_1$  является плотностью инвариантной меры обыкновенного дифференциального уравнения

$$\dot{Y} = a_1^1(Y, t), \quad (13)$$

т. е. удовлетворяет условию

$$\frac{\partial f_1}{\partial t} + \frac{\partial^T}{\partial y} (a_1^1 f_1) = 0, \quad (14)$$

а соответствующая функция  $a_2^1(y, t)$  в (12) определяется формулой

$$a_2^1(y, t) = \frac{1}{2} \left[ \sigma \frac{\partial \ln f_1}{\partial y} + \left( \frac{\partial^T}{\partial y} \sigma \right)^T \right].$$

**Теорема 3.2.** Пусть в условиях теоремы 3.1 известны:

- (1) неотрицательная скалярная функция  $\mu_1 = \mu_1(y, t)$ , являющаяся плотностью интегрального инварианта уравнения (13);
- (2) обратная матрица диффузии  $\sigma^{-1}$ ,  $\det |\sigma^{-1}| \neq 0$ ;

(3) векторная функция  $\Gamma_1 = \Gamma_1(y, t)$ , где

$$\Gamma_1(y, t) = \sigma^{-1} \left\{ a_2^1 - \frac{1}{f_1} \left[ \frac{\partial}{\partial y} (\sigma f_1) \right]^T \right\},$$

удовлетворяет условию отсутствия вихря

$$\frac{\partial \Gamma_{1i}}{\partial y_j} = \frac{\partial \Gamma_{1j}}{\partial y_i} \quad (i, j = \overline{1, N});$$

(4) скалярная функция  $F_1 = F_1(y, t)$ , где

$$F_1(y, t) = \int \Gamma_1^T(y, t) dy$$

является первым интегралом обыкновенного дифференциального уравнения (13);

(5) выполнено условие нормировки

$$\int \mu_1(y, t) \exp F_1(y, t) dy = 1.$$

Тогда существует СтП  $Y = Y(t)$ , для которого одномерная плотность определяется формулой:

$$f_1(y, t) = \mu_1(y, t) \exp F_1(y, t).$$

**Теорема 3.3.** В условиях теорем 3.1 и 3.2 функция  $\mu_1 = \mu_1(y, t)$ , являющаяся плотностью интегрального инварианта (13), будет плотностью одномерного распределения (5) тогда и только тогда, когда существует матричная функция  $A_1 = A_1(y, t)$ , такая что

$$a_2^1 \mu_1 \equiv \left( \frac{\partial A_1}{\partial y} \right)^T, \quad A_1 + A_1^T = \sigma \mu_1,$$

где  $a_2^1 = a - a_1^1$ .

**3.2.** В случае, когда уравнения ВСтС имеют вид (8), справедливы следующие теоремы [21–23].

**Теорема 3.4.** При невырожденной матрице диффузии  $\sigma_0$  одномерное распределение СтП в ВСтС (8) определяется следующими формулами:

$$f_1(y', y'', t) = \mu_1(y', y'', t) \exp F_1(y', y'', t),$$

где

$$\begin{aligned} F_1(y', y'', t) &= \int \Gamma_1^T dy' dy''; \\ \Gamma_1(y', y'', t) &= \sigma_0^{-1} P_2^1, \quad \frac{\partial \Gamma_{1i}}{\partial y_j} = \frac{\partial \Gamma_{1j}}{\partial y_i}; \\ \frac{\partial \mu_1}{\partial t} + \frac{\partial^T}{\partial y'}(Q\mu_1) + \frac{\partial^T}{\partial y''}(P_1^1\mu_1) &= 0; \\ P_2^1 &= \frac{\sigma_0}{2} \frac{\partial \ln f_1}{\partial y''}, \quad P = P_1^1 + P_2^1. \end{aligned}$$

**Теорема 3.5.** В условиях теоремы 3.4 справедлив аналог теоремы 3.3, устанавливающий следующие необходимые и достаточные условия:

$$P_2^1\mu_1 = \left( \frac{\partial R_1}{\partial y''} \right)^T, \quad R_1 + R_1^T = \sigma_0\mu_1.$$

Здесь  $P_2^1 = P - P_1^1$ ,  $\mu_1$  — плотность конечного интегрального инварианта уравнений  $\dot{Y}' = Q$  и  $\dot{Y}'' = P_1^1$ . При этом

$$f_1(y', y'', t) = \mu_1(y', y'', t).$$

**Теорема 3.6.** Пусть векторы  $q$  и  $p$  и векторные функции  $Q(q, p)$  и  $P(q, p)$  одинаковых размерностей удовлетворяют уравнениям:

$$\begin{aligned} \dot{q} &= Q(q, p), \quad \dot{p} = P(q, p) - 2\varepsilon(H)\alpha(q)\frac{\partial H}{\partial p} + b(q)V, \\ q(t_0) &= q_0, \quad p(t_0) = p_0, \quad (15) \end{aligned}$$

$$\frac{\partial^T}{\partial q} [\mu(q)Q(q, p)] + \mu(q)\frac{\partial^T}{\partial p}P(q, p) = 0.$$

Тогда одномерная плотность определяется формулой:

$$f_1(q, p) = c\mu(q) \exp[-\beta\Psi(H)], \quad (16)$$

где

$$\Psi(H) = \int_0^H \varepsilon(\eta) d\eta; \quad \beta = \frac{4}{\nu}.$$

Здесь  $b = b(q)$  — произвольная прямоугольная матрица;  $\alpha = \alpha(q)$  — произвольная квадратная матрица, удовлетворяющая условию  $\alpha + \alpha^T = 2bb^T$ ;

$H = H(q, p)$  — первый интеграл (15) при  $\alpha(q) = 0$  и  $b(q) = 0$ . В случае  $\varepsilon = \varepsilon_0$  из (16) следует обобщенная формула Гиббса [21–23]:

$$f_1(q, p) = c\mu(q) \exp[-\beta H(q, p)]; \quad \beta = \frac{4}{\nu}. \quad (17)$$

При  $\mu(q) = 1$  формула (17) переходит в известную формулу Гиббса.

**Замечание 3.1.** В общем случае распределения с инвариантной мерой, в отличие от стационарных распределений, когда  $\partial f_1/\partial t = 0$ , могут оказаться нестационарными  $\partial f_1/\partial t \neq 0$  (например, автомодельными) или приводимыми к стационарным за счет нестационарности (13).

**3.3.** Сопоставим методы аналитического моделирования СтП в ВСтС. Во всех этих методах одномерные и переходные плотности совпадают с плотностями интегральных инвариантов невозмущенных уравнений вида (13). Однако методы, базирующиеся на теоремах 3.2 и 3.4, удобно использовать там, где у невозмущенной системы заранее не известны первые интегралы, а известна плотность интегрального инварианта (необязательно конечного). В тех случаях, когда у невозмущенных уравнений известна плотность интегральных инвариантов и некоторые (или все) ее первые интегралы, удобнее использовать теоремы 3.3 и 3.5.

**3.4.** Как известно [21, 22], для так называемых градиентных систем вида

$$\dot{Y} = \alpha\psi'_Y(Y) + \beta V, \quad \psi'_Y = \frac{\partial}{\partial Y}\psi, \quad Y(t_0) = Y_0 \quad (18)$$

при условиях:

- функция  $\exp[2\nu^{-1}\psi(y)]$  интегрируема;
- $\alpha$  — постоянная матрица, удовлетворяющая условию  $\alpha + \alpha^T = 2\beta\beta^T$ , а  $\beta$  — постоянная прямоугольная матрица;
- $V$  — стационарный гауссовский белый шум с независимыми компонентами одной и той же интенсивности  $\nu$ ,

одномерная плотность (в узком смысле) стационарного режима определяется следующей формулой:

$$f_1^*(y) = c \exp[2\nu^{-1}\psi(y)], \quad c^{-1} = \int_{-\infty}^{\infty} \exp[-2\nu^{-1}\psi(\eta)] d\eta. \quad (19)$$

В [19] показано, что система (9) при отсутствии стохастических возмущений приводится к градиентному виду:

$$\dot{X}_i = \sum_{j=1}^N p_{ij} \frac{\partial \mathcal{H}}{\partial X_j}, \quad \mathcal{H} = \sum_{i=1}^N Y^* [X_i - \exp(X_i)] \quad (i = \overline{1, N}),$$

если ввести переменные Вольтерра

$$X_i = \ln \frac{Y_i}{Y_i^*},$$

где  $Y_i^*$  — нетривиальное решение уравнений

$$\varepsilon_{0i} - \sum_{j=1}^N p_{0ij} Y_j^* = 0 \quad (i = \overline{1, N}).$$

Таким образом, в ВСтС (9) при наличии только аддитивных возмущений ( $V^1 \neq 0, V^2 = V^3 = 0$ ) одномерное стационарное распределение имеет вид (19), если исходную ВСтС (9) привести к виду (18). Это распределение является стационарным распределением с инвариантной мерой.

**Замечание 3.2.** Аналогично рассматриваются ВСтС (10) и (11) при аддитивных возмущениях.

**Замечание 3.3.** Нетрудно построить вольтерровские колебательные и гироскопические аналогии систем, рассмотренных в [1–18].

**3.5.** Согласно [24], влияние параметрических возмущений  $U = [U^{1T} U^{2T} U^{3T}]^T$  в виде профильтрованных белых шумов  $V = [V^{1T} V^{2T} V^{3T}]^T$ :

$$\dot{U}^l + \lambda_l U^l = V^l, \quad l = \overline{1, 3}, \quad (20)$$

изучаются на основе рассмотрения совокупности уравнений (9) с заменой возмущений  $V$  на  $U$  и уравнений (20).

## 4 Приближенные методы аналитического моделирования распределений с инвариантной мерой

**4.1.** Следуя [24], представим уравнения МНА для аналитического моделирования одномерного распределения  $Y = Y(t)$  в следующем виде:

$$f_1(y; t) = [(2\pi)^N |K|]^{-1/2} \exp \left[ -\frac{1}{2} (y - m)^T K^{-1} (y - m) \right]; \quad (21)$$

$$\dot{m} = A^m = M_N[a(Y, t)], \quad m(t_0) = m_0; \quad (22)$$

$$\begin{aligned} \dot{K} = A^K = M_N & \left[ a(Y, t)(Y - m)^T \right] + M_N \left[ a(Y, t)(Y - m)^T \right]^T + \\ & + M_N \left[ B(Y, t)\nu(t)B(Y, t)^T \right], \quad K(t_0) = K_0. \end{aligned} \quad (23)$$

Здесь  $a(Y, t)$  и  $B(Y, t)$  определены в (4), а  $M_N$  — оператор гауссовского (нормального) математического ожидания:

$$M_N = \frac{1}{(2\pi)^N} \int_{-\infty}^{\infty} (\bullet) \exp \left[ -\frac{1}{2} (y - m)^T K^{-1} (y - m) \right] dy.$$

Полагая в (21) и (22)  $\dot{m} = 0$  и  $\dot{K} = 0$ , получим конечные уравнения для определения стационарных значений  $m^*$  и  $K^*$ :

$$A^m(m^*, K^*) = 0; \quad A^K(m^*, K^*) = 0.$$

Устойчивость  $m^*$  при известном  $K^*$  проверяется путем рассмотрения уравнений в вариациях для (22), а устойчивость по совокупности  $m^*$  и  $K^*$  — согласно (22) и (23).

Аналогично записываются уравнения МНА для ВСтС (8), (9) и (10), (11).

**Замечание 4.1.** В [24] описан второй приближенный метод для (4), основанный на статистической линеаризации функций  $a(Y, t)$  и сведении исходных уравнений к дифференциальным уравнениям с параметрическими шумами. Этот метод уступает по точности МНА.

**4.2.** При известных в момент времени  $t$  вероятностных моментах второго порядка (например, дисперсиях  $D_i$  и ковариациях  $K_{ij}$ ) необходимое условие сохранения интегрального инварианта сводится к условию консерватизма невозмущенной системы (13) для уравнения (22):

$$\text{tr } A^m = 0.$$

При этом в общем случае возмущения могут быть негауссовскими.

**Замечание 4.2.** При неизвестных вероятностных моментах используется общее условие (14) после статистической линеаризации исходных уравнений.

**4.3.** В тех случаях, когда приближение МНА неприемлемо для задач аналитического моделирования, следует воспользоваться методами параметризации распределений (методы моментов, семиинвариантов, ортогональных разложений, эллипсоидальной аппроксимации [25–27]). При этом проверка условия инвариантности меры осуществляется согласно условию (14).

## 5 Распределение с инвариантной мерой в двумерной вольтерровской стохастической системе

**5.1.** Следуя [24], предположим, что дифференциальная ВСтС описывается следующей системой нелинейных дифференциальных стохастических уравнений, понимаемых в смысле Ито:

$$\begin{aligned}\dot{Y}_1 &= [\varepsilon_{01} + \sigma_{01}^\varepsilon V_3 - (\gamma_{01} + \sigma_{01}^\gamma V_4) F_1(Y_1, Y_2, t)] Y_1 + \alpha_{01} + \sigma_{01}^\alpha V_1, \\ &\quad Y_1(t_0) = Y_{10}; \\ \dot{Y}_2 &= [\varepsilon_{02} + \sigma_{02}^\varepsilon V_3 - (\gamma_{02} + \sigma_{02}^\gamma V_4) F_2(Y_1, Y_2, t)] Y_2 + \alpha_{02} + \sigma_{02}^\alpha V_2, \\ &\quad Y_2(t_0) = Y_{20},\end{aligned}$$

или в векторном виде

$$\dot{Z} = a + BV, \quad Z(t_0) = Z_0. \quad (24)$$

Здесь  $Z = [Y_1 Y_2]^T$ ;  $V = [V_1 V_2 V_3 V_4]^T$  — вектор независимых белых шумов с интенсивностями  $\nu = \text{diag}(\nu_1, \nu_2, \nu_3, \nu_4)$ ;

$$\begin{aligned}a &= \begin{bmatrix} (\varepsilon_{01} - \gamma_{01} F_1) Y_1 \\ (\varepsilon_{02} - \gamma_{02} F_2) Y_2 \end{bmatrix}, \quad F_i = F_i(Y_1, Y_2, t) \quad (i = 1, 2); \\ B &= \begin{bmatrix} \sigma_{01}^\alpha & 0 & \sigma_{01}^\varepsilon Y_1 - \sigma_{01}^\gamma F_1 Y_1 \\ 0 & \sigma_{02}^\alpha & \sigma_{02}^\varepsilon Y_2 - \sigma_{02}^\gamma F_2 Y_2 \end{bmatrix}.\end{aligned} \quad (25)$$

В частном случае, когда

$$F_1(Y_1, Y_2, t) = Y_2; \quad F_2(Y_1, Y_2, t) = Y_1, \quad (26)$$

с точностью до вероятностных моментов второго порядка уравнения МНА (22) и (23) имеют вид:

$$\begin{aligned}\dot{m}_1 &= \tilde{A}_1^m(m_1, m_2, K_{12}) = \varepsilon_{01} m_1 - \gamma_{01} (m_1 m_2 + K_{12}) + \alpha_{01}, \\ &\quad m_1(t_0) = m_{10}; \quad (27)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\dot{m}_2 &= \tilde{A}_2^m(m_1, m_2, K_{12}) = \varepsilon_{02} m_2 - \gamma_{02} (m_1 m_2 + K_{12}) + \alpha_{02}, \\ &\quad m_2(t_0) = m_{20}; \quad (28)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\dot{D}_1 &= \tilde{A}_1^D(m_1, m_2, D_1, K_{12}) = \\ &= 2[(\varepsilon_{01} - \gamma_{01} m_2) D_1 - \gamma_{01} m_1 K_{12}] + \nu_1 \alpha_{01}^{\alpha 2} + \nu_3 \sigma_{01}^{\varepsilon 2} (m_1^2 + D_1)^2 + \\ &+ \nu_4 \sigma_{01}^{\gamma 2} [m_1^2 m_2^2 + (m_1^2 D_2 + m_2^2 D_1) + 2m_1 m_2 K_{12}], \quad D_1(t_0) = D_{10}; \quad (29)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\dot{D}_2 &= \tilde{A}_2^D(m_1, m_2, D_2, K_{12}) = \\ &= -2\gamma_{02} m_1 K_{12} + 2(\varepsilon_{02} - \gamma_{02} m_1) D_2 + \nu_2 \sigma_{02}^{\alpha 2} + \nu_3 \sigma_{01}^{\varepsilon 2} (m_2^2 + D_2)^2 + \\ &+ \nu_4 \sigma_{02}^{\gamma 2} [m_1^2 m_2^2 + (m_1^2 D_2 + m_2^2 D_1) + 2m_1 m_2 K_{12}], \quad D_2(t_0) = D_{20}; \quad (30)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\dot{K}_{12} &= \tilde{A}_1^K(m_1, m_2, D_1, D_2, K_{12}) = \\ &= (\varepsilon_{01} + \varepsilon_{02} - \gamma_{01} m_2 - \gamma_{02} m_1) K_{12} - \gamma_{01} m_1 D_2 - \gamma_{02} m_2 D_1 +\end{aligned}$$

$$+\nu_3\sigma_{01}^\varepsilon\sigma_{02}^\varepsilon(m_1m_2+K_{12})+\nu_4\sigma_{01}^\gamma\sigma_{02}^\gamma[m_1^2m_2^2+(m_1^2D_2+m_2^2D_1)+2m_1m_2K_{12}], \\ K_{12}(t_0)=K_{120}. \quad (31)$$

Уравнения для стационарных СтП

$$\tilde{A}_i^m(m_1^*, m_2^*, K_{12}^*) = 0 \quad (i = 1, 2); \quad (32)$$

$$\left. \begin{array}{l} \tilde{A}_1^D(m_1^*, m_2^*, D_1, K_{12}^*) = 0; \\ \tilde{A}_2^D(m_1^*, m_2^*, D_2, K_{12}^*) = 0; \\ \tilde{A}^K(m_1^*, m_2^*, D_1^*, D_2^*, K_{12}^*) = 0 \end{array} \right\} \quad (33)$$

представляют собой связанную систему алгебраических уравнений, а их устойчивость изучается на основе уравнений в вариациях для (27)–(31).

**5.2.** Уравнения (32) при известных  $\alpha_{01}, \alpha_{02}$  и  $K_{12}$ , когда

$$\Delta\tilde{A}_i^m \equiv \alpha_{0i} - \gamma_{0i}K_{12} = 0 \quad (i = 1, 2), \quad (34)$$

определяют устойчивый тривиальный регулярный СтП  $m_1^* = m_2^* = 0$  при условиях

$$\varepsilon_{01} + \varepsilon_{02} < 0; \quad \varepsilon_{01}\varepsilon_{02} > 0.$$

При этом уравнения (33) для дисперсий и ковариации принимают следующий вид:

$$(2\varepsilon_{01} + \nu_3\sigma_{01}^{\varepsilon 2})D_1^* + \nu_1\sigma_{01}^\alpha = 0; \quad (2\varepsilon_{02} + \nu_3\sigma_{02}^{\varepsilon 2})D_2^* + \nu_2\sigma_{02}^\alpha = 0; \quad K_{12}^* = 0. \quad (35)$$

Отсюда находим  $D_1^*$ ,  $D_2^*$  и  $K_{12}^*$  для соответствующего стохастического СтП:

$$D_1^* = -\frac{\nu_1\sigma_{01}^\alpha}{2\varepsilon_{01} + \nu_3\sigma_{01}^{\varepsilon 2}}; \quad D_2^* = -\frac{\nu_2\sigma_{02}^\alpha}{2\varepsilon_{02} + \nu_3\sigma_{02}^{\varepsilon 2}}; \quad K_{12}^* = 0$$

при условиях

$$2\varepsilon_{01} + \nu_3\sigma_{01}^{\varepsilon 2} < 0; \quad 2\varepsilon_{02} + \nu_3\sigma_{02}^{\varepsilon 2} < 0.$$

**Замечание 5.1.** Из уравнений (35) следует важный вывод о том, что параметрические возмущения  $\sigma_{01}^\gamma V_4$  и  $\sigma_{02}^\gamma V_4$  с точностью до вероятностных моментов третьего порядка не влияют на СтП.

Аналогично для второго регулярного стационарного режима в (32) при условиях  $\Delta\tilde{A}_1^m = \Delta\tilde{A}_2^m = 0$  находим следующие выражения для  $m_1^*$ ,  $m_2^*$ ,  $D_1^*$ ,  $D_2^*$  и  $K_{12}^*$ :

$$m_1^* = \frac{\varepsilon_{02}}{\gamma_{02}}; \quad m_2^* = \frac{\varepsilon_{01}}{\gamma_{01}};$$

$$c_{11}D_1^* + c_{12}D_2^* + c_{13}K_{12}^* + c_{10} = 0; \quad c_{21}D_1^* + c_{22}D_2^* + c_{23}K_{12}^* + c_{20} = 0.$$

Здесь введены обозначения:

$$\begin{aligned} c_{11} &= \nu_3\sigma_{01}^{\varepsilon 2} + \nu_4\sigma_{01}^{\gamma 2}m_2^{*2}; \quad c_{12} = \nu_4\sigma_{01}^{\gamma 2}m_1^{*2}; \\ c_{13} &= -2\gamma_{01}m_1^* + 2\nu_4\sigma_{01}^{\gamma 2}m_1^*m_2^*; \quad c_{10} = \nu_1\sigma_{01}^{\alpha 2} + \nu_3\sigma_{01}^{\varepsilon 2}m_1^{*2} + \nu_4\sigma_{01}^{\gamma 2}(m_1^*m_2^*)^2; \\ c_{20} &= \nu_2\sigma_{02}^{\alpha 2} + \nu_3\sigma_{02}^{\varepsilon 2}m_2^{*2} + \nu_4\sigma_{02}^{\gamma 2}(m_1^*m_2^*)^2; \\ c_{21} &= \nu_4\sigma_{02}^{\gamma 2}m_2^{*2}; \quad c_{22} = \nu_3\sigma_{02}^{\varepsilon 2} + \nu_4\sigma_{02}^{\gamma 2}m_1^{*2}; \\ c_{23} &= -2\gamma_{02}m_2^* + 2\nu_4\sigma_{02}^{\gamma 2}m_1^*m_2^*; \\ c_{30} &= \nu_3\sigma_{01}^{\varepsilon} \sigma_{02}^{\gamma} + \nu_4\sigma_{01}^{\gamma} \sigma_{02}^{\gamma} (m_1^*m_2^*)^2; \\ c_{31} &= -\gamma_{02}m_2^* + \nu_4\sigma_{01}^{\gamma} \sigma_{02}^{\gamma} m_2^{*2}; \quad c_{32} = -\gamma_{01}m_1^* + \nu_4\sigma_{01}^{\gamma} \sigma_{02}^{\gamma} m_1^{*2}; \\ c_{33} &= \nu_3\sigma_{01}^{\varepsilon} \sigma_{02}^{\varepsilon} + 2\nu_4\sigma_{01}^{\gamma} \sigma_{02}^{\gamma} m_1^*m_2^*. \end{aligned}$$

**5.3.** В случае, когда  $\Delta\tilde{A}_i^m \neq 0$  в (34), условия устойчивости регулярных режимов в (32) при известных  $D_1$ ,  $D_2$  и  $K_{12}$  получаются из условий асимптотической устойчивости уравнений в вариациях для (27) и (28) и имеют вид:

$$\varepsilon'_{01} + \varepsilon'_{02} < 0; \quad \varepsilon'_{01}\varepsilon'_{02} - \gamma_{01}\gamma_{02}m_1^*m_2^* > 0, \quad (36)$$

где

$$\varepsilon'_{01} = \varepsilon_{01} - \gamma_{01}m_2^*; \quad \varepsilon'_{02} = (\varepsilon_{02} - \gamma_{02}m_1^*).$$

При параметрических возмущениях  $V_3$  и  $V_4$  условия устойчивости по совокупности первых и вторых вероятностных моментов  $m$  и  $K$  имеют громоздкий вид.

**5.4.** При условии (26) полученные в параграфах 5.1–5.3 уравнения справедливы как для больших возмущений, когда отношение сигнал/шум  $\zeta_i = m_i/\sqrt{D_i} \ll 1$  ( $i = 1, 2$ ), так и малых  $\zeta_i$ . В последнем случае соотношения (29)–(31) для отклонений  $\delta Y_1 = Y_1 - m_1^*$  и  $\delta Y_2 = Y_2 - m_2^*$  принимают вид:

$$\begin{aligned} \delta \dot{Y}_1 &= \varepsilon_{01}\delta Y_1 - \gamma_{01}(m_2^*\delta Y_1 + m_1^*\delta Y_2) + \sigma_{01}^\alpha V_1; \\ \delta \dot{Y}_2 &= \varepsilon_{02}\delta Y_2 - \gamma_{02}(m_2^*\delta Y_1 + m_1^*\delta Y_2) + \sigma_{02}^\alpha V_2, \end{aligned}$$

или в векторно-матричном виде:

$$\delta \dot{Y} = A\delta Y + BV \quad (37)$$

где

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{01} - \gamma_{01}m_2^* & -\gamma_{01}m_1^* \\ \varepsilon_{02}m_2^* & \varepsilon_{02} - \gamma_{02}m_2^* \end{bmatrix}; \quad B = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

При этом уравнения для дисперсий и ковариации имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} \dot{D}_1 &= \tilde{A}_1^D(D_1, D_2, K_{12}) = 2(\varepsilon_{01} - \gamma_{01}m_2^*)D_1 - \gamma_{01}m_1^*K_{12} + \nu_1\sigma_{01}^{\alpha 2}; \\ \dot{D}_2 &= \tilde{A}_2^D(D_1, D_2, K_{12}) = 2(\varepsilon_{02} - \gamma_{02}m_1^*)D_2 - 2\gamma_{02}m_1^*K_{12} + \nu_2\sigma_{01}^{\alpha 2}; \\ \dot{K}_{12} &= \tilde{A}^K(D_1, D_2, K_{12}) = (\varepsilon_{01} + \varepsilon_{02} - \gamma_{01}m_2^* - \gamma_{02}m_1^*)K_{12} - \gamma_{01}m_1^*D_2 - \gamma_{02}m_2^*D_1. \end{aligned} \right\} \quad (38)$$

Для стационарных дисперсий  $D_1^*$  и  $D_2^*$  и ковариации  $K_{12}^*$  в силу (33) имеем систему конечных линейных неоднородных уравнений:

$$\tilde{A}_i^D(D_1^*, D_2^*, K_{12}^*) = 0; \quad \tilde{A}^K(D_1^*, D_2^*, K_{12}^*) = 0 \quad (i = 1, 2).$$

В силу линейности уравнений (38) условия устойчивости по вторым моментам совпадают с условиями устойчивости по первым моментам и имеют вид (36).

**5.5.** В линейной системе (37), как известно [29], условием сохранения площади, т. е. интегрального инварианта, является следующее:

$$a_{11} + a_{22} = \varepsilon_{01} - \gamma_{01}m_2^* + \varepsilon_{02} - \gamma_{02}m_1^* = 0.$$

При этом если дискриминант

$$\Delta = a_{12}a_{21} - a_{11}a_{22} = \gamma_{01}\varepsilon_{02}m_1^*m_2^* - (\varepsilon_{01} - \gamma_{01}m_2^*)(\varepsilon_{02} - \gamma_{02}m_1^*)$$

отрицателен ( $\Delta < 0$ ), то корни уравнения

$$\rho^2 - (a_{11} + a_{22})\rho + a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21} = 0$$

будут мнимыми, а особой точкой — центр. При  $\rho_2 = -\rho_1$  особой точкой будет седловина.

**5.6.** Для системы (24) при известных вероятностных моментах второго порядка после статистической линеаризации нелинейной вектор-функции  $a$  (25) приходим к следующему условию сохранения интегрального инварианта:

$$\psi_{11} + \psi_{22} = 0; \quad \psi_{12}\psi_{21} - \psi_{11}\psi_{22} < 0.$$

Здесь введены обозначения:

$$\begin{aligned} \varphi_{ij}(m_1, m_2, D_1, D_2, K_{12}) &= M_N[F_i(Y_1, Y_2)Y_j] = F_{i0}(m_1, m_2, D_1, D_2, K_{12}) + \\ &+ F_{i1}(m_1, m_2, D_1, D_2, K_{12})(Y_1 - m_1) + F_{i2}(m_1, m_2, D_1, D_2, K_{12})(Y_2 - m_2), \end{aligned}$$

где  $F_{ij}$  — коэффициенты статистической линеаризации функций  $F_i Y_j$  ( $i, j = 1, 2$ ), причем функции  $\psi_{ij}$  определяются следующими соотношениями:

$$\begin{aligned}\psi_{11} &= \varepsilon_{01} - \gamma_{01}\varphi_{11}(m_1, m_2, D_1, D_2, K_{12}); \\ \psi_{22} &= \varepsilon_{02} - \gamma_{02}\varphi_{22}(m_1, m_2, D_1, D_2, K_{12}); \\ \psi_{12} &= -\gamma_{01}\varphi_{12}(m_1, m_2, D_1, D_2, K_{12}); \\ \psi_{21} &= -\gamma_{02}\varphi_{21}(m_1, m_2, D_1, D_2, K_{12}).\end{aligned}$$

**5.7.** Таким образом, получены уравнения аналитического моделирования регулярных и нерегулярных приближенно нормальных (гауссовских) режимов по МНА в условиях больших и малых отношений сигнал/шум и аналитические оценки устойчивости по первым двум вероятностным моментам. При аддитивных возмущениях приближенные выражения совпадают с точными выражениями (см. параграф 3.4.). Для параметрических возмущений впервые получены приближенные по МНА выражения для моментов первого и второго порядка, определяющих стационарные и нестационарные эквивалентные гауссовые одномерные распределения с инвариантной мерой.

## 6 Заключение

Разработаны точные и приближенные методы аналитического моделирования процессов в нелинейных ВСтС в условиях аддитивных и параметрических белых шумов (в общем случае негауссовых). Получены точные выражения для одномерных и многомерных стационарных ВСтС, приводимых к градиентным. Обнаружены аналогии в стохастических механических и вольтерровских системах. Изучена устойчивость стационарных регулярных и нерегулярных режимов в СтС по первым двум вероятностным моментам.

Подробно рассмотрены вопросы аналитического моделирования одномерных распределений с инвариантной мерой в двумерной дифференциальной ВСтС.

Результаты допускают обобщения на случаи автокоррелированных шумов, функций взаимодействия, допускающих интегральное (интегродифференциальное) представление, а также дискретных и непрерывно-дискретных ВСтС.

## Литература

1. Moshchuk N. K., Sinitsyn I. N. On stationary distributions in nonlinear stochastic differential systems. — Coventry, U.K.: Mathematics Institute, University of Warwick, 1989. Preprint. 15 p.
2. Moshchuk N. K., Sinitsyn I. N. On stochastic nonholonomic systems. — Coventry, U.K.: Mathematics Institute, University of Warwick, 1989. Preprint. 32 p.
3. Мощук Н. К., Синицын И. Н. О стохастических неголономных системах // Прикладная механика и математика, 1990. Т. 54. Вып. 2. С. 213–223.

4. *Moshchuk N. K., Sinitsyn I. N.* On stationary distributions in nonlinear stochastic differential systems // Q. J. Mech. Appl. Math., 1991. Vol. 44. Pt. 4. P. 571–579.
5. *Мощук Н. К., Синицын И. Н.* О стационарных и приводимых к стационарным режимам в нормальных стохастических системах // Прикладная механика и математика, 1991. Т. 55. Вып. 6. С. 895–903.
6. *Мощук Н. К., Синицын И. Н.* Стационарные флуктуации тяжелого твердого тела с неподвижной точкой в случайной среде // Докл. АН СССР, 1991. Т. 320. № 6. С. 1337–1339.
7. *Мощук Н. К., Синицын И. Н.* Распределение с инвариантной мерой в механических стохастических нормальных системах // Докл. АН СССР, 1992. Т. 322. № 4. С. 662–667.
8. *Синицын И. Н.* Конечномерные распределения с инвариантной мерой в стохастических механических системах // Докл. РАН, 1993. Т. 328. № 3. С. 308–310.
9. *Мощук Н. К., Синицын И. Н.* О флуктуациях в случайной среде тела с неподвижной точкой // Механика твердого тела, 1993. № 1. С. 47–52.
10. *Синицын И. Н., Матюхин С. А.* О стационарных флуктуациях уравновешенных гиростатов // Докл. РАН, 1997. Т. 354. № 2. С. 1–4.
11. *Синицын И. Н., Матюхин С. А.* Стационарные флуктуации системы твердых тел, соединенных неголономными связями // Механика твердого тела, 1996. № 5. С. 5–12.
12. *Синицын И. Н.* Конечномерные распределения с инвариантной мерой в стохастических нелинейных дифференциальных системах. — М.: Диалог-МГУ, 1997. С. 129–140.
13. *Синицын И. Н., Корепанов Э. Р., Белоусов В. В.* Точные методы расчета стационарных режимов с инвариантной мерой в стохастических системах управления // Кибернетика и технологии XXI века: Тр. II Междунар. научн.-технич. конф. — Воронеж: Саквое, 2002. С. 124–131.
14. *Синицын И. Н., Корепанов Э. Р., Белоусов В. В.* Точные аналитические методы в статистической динамике нелинейных информационно-управляющих систем // Системы и средства информатики. Спец. вып.: Математическое и алгоритмическое обеспечение информационно-телекоммуникационных систем. — М.: Наука, 2002. С. 112–121.
15. *Синицын И. Н.* Развитие методов аналитического моделирования распределений с инвариантной мерой в стохастических системах // Современные проблемы прикладной математики, информатики и автоматизации: Тр. междунар. научн.-технич. семинара. — Севастополь: СевИТУ, 2012. С. 24–35.
16. *Синицын И. Н.* Аналитическое моделирование распределений с инвариантной мерой в стохастических системах с автокоррелированными шумами // Информатика и её применения, 2012. Т. 6. Вып. 4. С. 4–8.
17. *Синицын И. Н.* Аналитическое моделирование распределений с инвариантной мерой в стохастических системах с разрывными характеристиками // Информатика и её применения, 2013. Т. 7. Вып. 1. С. 3–12.
18. *Синицын И. Н.* Аналитическое моделирование распределений с инвариантной мерой в негауссовых дифференциальных и приводимых к ним эредитарных стохастических системах // Информатика и её применения, 2014. Т. 8. Вып. 2. С. 2–14.
19. *Вольтерра В.* Математическая теория борьбы за существование. — М.: Наука, 1976. 286 с.

20. Свирижев Ю. М. Нелинейные волны, диссипативные структуры и катастрофы в экологии. — М.: Наука, 1987. 368 с.
21. Пугачёв В. С., Синицын И. Н. Стохастические дифференциальные системы. Анализ и фильтрация. — 2-е изд. — М.: Наука, 1990. 632 с.
22. Пугачёв В. С., Синицын И. Н. Теория стохастических систем. — М.: Логос, 2000; 2004. 1000 с.
23. Синицын И. Н., Синицын В. И. Лекции по нормальной и эллипсоидальной аппроксимации в стохастических системах. — М.: ТОРУС ПРЕСС, 2013. 488 с.
24. Синицын И. Н., Синицын В. И. Аналитическое моделирование нормальных процессов в вольтерровских стохастических системах // Системы и средства информатики, 2018. Т. 28. № 2. С. 4–19.
25. Синицын И. Н. Параметрическое статистическое и аналитическое моделирование распределений в нелинейных стохастических системах на многообразиях // Информатика и её применения, 2013. Т. 7. Вып. 2. С. 4–16.
26. Синицын И. Н. Аналитическое моделирование распределений методом ортогональных разложений в нелинейных стохастических системах на многообразиях // Информатика и её применения, 2015. Т. 9. Вып. 3. С. 17–24.
27. Синицын И. Н. Применение ортогональных разложений для аналитического моделирования многомерных распределений в нелинейных стохастических системах // Системы и средства информатики, 2015. Т. 25. № 3. С. 3–22.
28. Синицын И. Н. Канонические представления случайных функций и их применение в задачах компьютерной поддержки научных исследований. — М.: ТОРУС ПРЕСС, 2009. 768 с.
29. Немышкий В. В., Степанов В. В. Качественная теория дифференциальных уравнений. — М.-Л.: Гостехиздат, 1949. 448 с.

Поступила в редакцию 03.04.18

---

## ANALYTICAL MODELING OF DISTRIBUTIONS WITH INVARIANT MEASURE IN VOLTERRA STOCHASTIC SYSTEMS

I. N. Sinitsyn and V. I. Sinitsyn

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

**Abstract:** For nonlinear Volterra stochastic systems (VStS) with additive and parametric white noises (not obligatory Gaussian), exact and approximate methods for analytical modeling are considered. Analogies between mechanical and biological stochastic systems are discussed. Stability of stationary regular and irregular regimes in probabilistic first and second moments is studied. Special attention is paid to analytical modeling and stability analysis of stochastic processes in two-dimensional differential VStS. Some generalizations are considered.

**Keywords:** analytical modeling; Fokker–Plank–Kolmogorov equation; method of normal approximation (MNA); method of statistical linearization (MSL); normal (Gaussian) stochastic process; population dynamics; Pugachev equation; stochastic system (StS); Volterra stochastic systems (VStS)

**DOI:** 10.14357/08696527180301

## Acknowledgments

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

## References

1. Moshchuk, N. K., and I. N. Sinitsyn. 1989. On stationary distributions in nonlinear stochastic differential systems. Coventry, U.K.: Mathematics Institute, University of Warwick. Preprint. 15 p.
2. Moshchuk, N. K., and I. N. Sinitsyn. 1989. On stochastic nonholonomic systems. Coventry, U.K.: Mathematics Institute, University of Warwick. Preprint. 32 p.
3. Moshchuk, N. K., and I. N. Sinitsyn. 1990. O stokhasticheskikh negolonomnykh sistemakh [About stochastic nonholonomic systems]. *J. Appl. Math. Mech. USS* 54(2):213–223.
4. Moshchuk, N. K., and I. N. Sinitsyn. 1991. On stationary distributions in nonlinear stochastic differential systems. *Q. J. Mech. Appl. Math.* 44(4):571–579.
5. Moshchuk, N. K., and I. N. Sinitsyn. 1991. Stationary and stationarizable regimes in normal stochastic differential systems. *J. Appl. Math. Mech. USS* 55(6):771–780.
6. Moshchuk, N. K., and I. N. Sinitsyn. 1991. Statsionarnye fluktuatsii tyazhelogo tverdogo tela s nepodvizhnou tochkoj v sluchaynoj srede [Stationary fluctuations of rigid body with fixed point in stochastic media]. *Dokl. Akad. Nauk SSSR* 320(6):1337–1339.
7. Moshchuk, N. K., and I. N. Sinitsyn. 1992. Raspredelenie s invariantnoy meroy v mekhanicheskikh stokhasticheskikh normal'nykh sistemakh [Distributions with invariant measure in normal stochastic systems]. *Dokl. Akad. Nauk SSSR* 322(4):662–667.
8. Sinitsyn, I. N. 1993. Konechnomernye raspredeleniya s invariantnoy meroy v stokhasticheskikh mekhanicheskikh sistemakh [Finite dimensional distributions with invariant measure in mechanical stochastic systems]. *Dokl. Akad. Nauk* 328(3):308–310.
9. Moshchuk, N. K., and I. N. Sinitsyn. 1993. O fluktuatsiyakh v sluchaynoj srede tela s nepodvizhnou tochkoj [About stationary fluctuations of rigid body with fixed point in stochastic media]. *Mekhanika tverdogo tela* 1:47–52.
10. Sinitsyn, I. N., and S. A. Matyukhin. 1997. O statsionarnykh fluktuatsiyakh uravnoveniennykh girostatov [About fluctuations gyrostats]. *Dokl. Akad. Nauk* 354(2):1–4.
11. Sinitsyn, I. N., and S. A. Matyukhin. 1996. Statsionarnye fluktuatsii sistemy tverdykh tel, soedinenykh negolonomnymi svyazyami [Stationary fluctuations of systems of rigid bodies with nonholonomic links]. *Mech. Sol.* 5:5–12.

12. Sinitsyn, I. N. 1997. *Konechnomernye raspredeleniya s invariantnoy meroy v stokhasticheskikh nelineynykh differentials'nykh sistemakh* [Finite dimensional distributions with invariant measure in nonlinear differential stochastic systems]. Moscow: Dialog MGU. 29–140.
13. Sinitsyn, I. N., E. R. Korepanov, and V. V. Belousov. 2002. Tochnye metody rascheta statcionarnykh rezhimov s invariantnoy meroy v stokhasticheskikh sistemakh upravleniya [Exact methods for estimation of stationary regimes in control stochastic systems]. *2nd Conference (International) on Cybernetics and Technologies of the 21st Century Proceedings*. Voronezh: NPF “Sakvoe.” 124–131.
14. Sinitsyn, I. N., E. R. Korepanov, and V. V. Belousov. 2002. Tochnye analiticheskie metody v statisticheskoy dinamike nelineynykh informatsionno-upravlyayushchikh sistem [Exact analytical methods in statistical dynamics of nonlinear informational and control]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics*. Spets. vyp. [Special Issue]. Moscow: Nauka. 112–121.
15. Sinitsyn, I. N. 2012. Razvitiye metodov analiticheskogo modelirovaniya raspredeleniy s invariantnoy meroy v stokhasticheskikh sistemakh [Development of analytical modeling methods of distributions with invariant measure]. *Scientific Workshop (International) “Modern Problems of Applied Mathematics, Informatics, and Automation” Proceedings*. Sevastopol’. 24–35.
16. Sinitsyn, I. N. 2012. Analiticheskoe modelirovanie raspredeleniy s invariantnoy meroy v stokhasticheskikh sistemakh s avtokorrelirovannymi shumami [Analytical modeling of distributions with invariant measures in stochastic systems with autocorrelated noises]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 6(4):4–8.
17. Sinitsyn, I. N. 2013. Analiticheskoe modelirovanie raspredeleniy s invariantnoy meroy v stokhasticheskikh sistemakh s razryvnymi kharakteristikami [Analytical modeling of distributions with invariant measure with discontinuous characteristics]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 7(1):3–12.
18. Sinitsyn, I. N. 2014. Analiticheskoe modelirovanie raspredeleniy s invariantnoy meroy v negaussovskikh differentials'nykh i privodimykh k nim ereditarnykh stokhasticheskikh sistemakh [Analytical modeling of distributions with invariant measure in nongaussian differential and reducible to differential hereditary stochastic systems]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 8(2):2–14.
19. Volterra, V. 1976. *Matematicheskaya teoriya bor'by za sushchestvovanie* [Mathematical theory of survival]. Moscow: Nauka. 286 p.
20. Svirezhev, Yu. M. 1987. *Nelineynye volny, dissipativnye struktury i katastrofy v ekologii* [Nonlinear waves, dissipative structures and catastrophes]. Moscow: Nauka. 368 p.
21. Pugachev, V. S., and I. N. Sinitsyn. 1987. *Stochastic differential systems. Analysis and filtering*. Chichester, New York, NY: John Wiley. 549 p.
22. Pugachev, V. S., and I. N. Sinitsyn. 2001. *Stochastic systems. Theory and applications*. Singapore: World Scientific. 908 p.
23. Sinitsyn, I. N., and V. I. Sinitsyn. 2013. *Lektsii po normal'noy i ellipsoidal'noy approksimatsii v stokhasticheskikh sistemakh* [Lectures on normal and ellipsoidal approximation of distributions in stochastic systems]. Moscow: TORUS PRESS. 488 p.
24. Sinitsyn, I. N., and V. I. Sinitsyn. 2018. Analiticheskoe modelirovanie normal'nykh protsessov v vol'terovskikh stokhasticheskikh sistemakh [Analytical modeling of normal

- processes in Volterra stochastic systems]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 28(2):4–19.
- 25. Sinitsyn, I. N. 2013. Parametricheskoe statisticheskoe i analiticheskoe modelirovaniye raspredeleniy v nelineynykh stokhasticheskikh sistemakh na mnogoobraziyakh [Parametric statistical and analytical modeling of distributions in nonlinear stochastic systems on manifolds]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 7(2):4–16.
  - 26. Sinitsyn, I. N. 2015. Analiticheskoe modelirovaniye raspredeleniy metodom ortogonal'nykh razlozheniy v nelineynykh stokhasticheskikh sistemakh na mnogoobraziyakh [Analytical modeling of distributions by orthogonal expansions in nonlinear stochastic systems on manifolds]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 9(3):17–24.
  - 27. Sinitsyn, I. N. 2015. Primenenie ortogonal'nykh razlozheniy dlya analiticheskogo modelirovaniya mnogomernykh raspredeleniy v nelineynykh stokhasticheskikh sistemakh [Applications of orthogonal expansions for analytical modeling of multidimensional distributions in nonlinear stochastic systems]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 25(3):3–22.
  - 28. Sinitsyn, I. N. 2009. *Kanonicheskie predstavleniya sluchaynykh funktsiy i ikh prime-nenie v zadachakh komp'yuternoy podderzhki nauchnykh issledovaniy* [Canonical expansions of random functions and their applications in computer aided support]. Moscow: TORUS PRESS. 768 p.
  - 29. Nemytskiy, V. V., and V. V. Stepanov. 1949. *Kachestvennaya teoriya differentsial'nykh uravnenii* [Qualitative theory of differential equations]. Moscow–Leningrad: Gostekhizdat. 448 p.

Received April 3, 2018

## Contributors

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

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

## ВЫБОР СЕРВЕРНОГО РЕШЕНИЯ ДЛЯ ЦИФРОВОЙ ПЛАТФОРМЫ ПОИСКА И АНАЛИЗА ТЕКСТОВ\*

*В. В. Ядринцев<sup>1</sup>, К. В. Клюбина<sup>2</sup>, И. А. Тихомиров<sup>3</sup>, А. Ф. Гершельман<sup>4</sup>*

**Аннотация:** Предложен способ выбора аппаратного обеспечения для цифровой платформы поиска и анализа текстов на основе расчета стоимости жизненного цикла (TCO — Total Cost of Ownership) серверного решения. Способ учитывает такие параметры, как тип задач, решаемых цифровой платформой, необходимая производительность, качество обслуживания и др. Предложенный способ апробирован на двух современных серверных решениях в условиях различных требований и ограничений. Описаны конфигурации аппаратного обеспечения, особенности решаемых задач и параметры, которые использовались при расчете ТСО. Представленный способ расчета может найти широкое применение при решении практических задач выбора аппаратного обеспечения для цифровых платформ и вычислительных центров, для которых известен перечень требований и ограничений.

**Ключевые слова:** цифровая экономика; цифровые платформы; выбор серверного решения; стоимость жизненного цикла, ТСО; расчет ТСО; анализ текстов; IBM Power8; Intel Xeon

**DOI:** 10.14357/08696527180302

### 1 Введение

Экономическая эффективность и целесообразность выступают основополагающими факторами при выборе серверных решений для цифровых платформ и вычислительных центров, работающих с большими данными. Здесь и далее под цифровой платформой будем понимать некую строительную основу, на базе которой другие компании, свободно организованные в инновационной экосистеме, могут создавать их собственные продукты, технологии и сервисы [1]. Неверный выбор аппаратного обеспечения может повлечь за собой серьезные проблемы при эксплуатации цифровой платформы или сделать ее попросту неэффективной и ненужной.

Как правило, задача выбора серверного решения сводится к оценке множества критериев, среди которых функциональная и эксплуатационная эффективность,

\*Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (проект 17-29-07016).

<sup>1</sup>Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук; Российский университет дружбы народов, vvyadrincev@gmail.com

<sup>2</sup>IBM East Europe/Asia, KKlyubina@ru.ibm.com

<sup>3</sup>Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук, tih@isa.ru

<sup>4</sup>IBM East Europe/Asia, Andrey\_Gershelmann@ru.ibm.com

стоимость владения, отказоустойчивость и др. [2, 3]. Также существует подход на основе агрегированных критериев, таких как стоимость, производительность, возможность модернизации, сложность эксплуатации [4]. Важно заметить, что актуален вопрос выбора серверного решения также и на основании оценки стоимости жизненного цикла (TCO).

В настоящей работе рассматривается задача выбора серверного решения, которое удовлетворяет определенным требованиям и ограничениям. Задача в такой постановке подразумевает, что требования к цифровой платформе известны и определяются ее спецификой. Таким образом, задача выбора серверного решения сводится к оценке стоимости жизненного цикла с учетом требований к производительности, качеству обслуживания и других параметров. Расчет ТСО основывается на актуальных данных рынка и учитывает следующие параметры: закупочная стоимость серверов, стоимость обслуживания, энергопотребление, стоимость гарантии. Также учитывается продолжительность жизненного цикла, так как она напрямую влияет на ТСО.

Важной особенностью предлагаемого в статье способа расчета ТСО является то, что он учитывает данные о производительности: среднее время выполнения запроса, число пользователей и ряд других. В качестве демонстрационной программной системы, представляющей собой цифровую платформу поиска и анализа текстов, использован продукт TextAppliance [5]. Предложенный способ расчета продемонстрирован на двух современных серверных решениях на базе процессоров Intel Xeon и IBM Power8. Выбор Intel Xeon обусловлен его распространностью и наличием промышленных серверных решений [6], в то время как Power8, по мнению ряда экспертов, выступает в качестве серьезной альтернативы архитектуре x86 [7–9].

## 2 Исходные данные

### 2.1 Данные о производительности серверных решений

В качестве данных о производительности серверных решений для проведения расчета ТСО использованы результаты экспериментов, выполненных авторами в работе [10], в которой предложена методика сравнения производительности и проведено сравнение серверов на базе IBM Power8 и Intel Xeon. Особенность методики сравнения заключается в использовании высокоуровневых тестовых задач, отсутствии специальных настроек и оптимизаций программного кода под определенную архитектуру. Эксперименты проведены на сравнимом оборудовании в части оперативной памяти, дисковых массивов, операционной системы и тестируемой цифровой платформы; существенным различием серверных решений являются только процессоры из серий Intel Xeon и IBM Power8.

Эксперименты проведены для задач поиска по запросу и поиска текстовых заимствований на больших коллекциях текстовых документов (суммарно более 9 млн) для русского и английского языка. Поиск по запросу представляет

**Таблица 1** Данные о производительности серверных решений

Users	Среднее время поиска по запросу, с				Среднее время поиска заимствований, с			
	power8_ru	power8_en	x86_ru	x86_en	power8_ru	power8_en	x86_ru	x86_en
1	0,3	0,3	0,43	0,39	2,06	3,73	4,3	5,43
10	0,34	0,38	0,44	0,43	2,8	3,08	7,46	8,14
20	0,45	0,51	0,57	0,59	2,91	4,04	<b>12,32</b>	<b>13,77</b>
30	0,58	0,62	<b>0,81</b>	<b>0,84</b>	3,44	5,16	<b>18,7</b>	<b>20,4</b>
40	0,71	0,78	<b>1,08</b>	<b>1,12</b>	4,66	6,94	25,42	27,3
50	<b>0,8</b>	<b>0,88</b>	1,37	1,4	4,92	8	31,35	29,75
60	<b>1,01</b>	<b>1,08</b>	1,65	1,66	6,29	10,09	37,35	36,74
70	1,2	1,28	1,91	1,94	7,57	10,85	39,5	39,09
80	1,19	1,31	2,2	2,23	9,21	12,89	49,51	51,29
90	1,25	1,43	2,47	2,47	<b>9,88</b>	<b>14,68</b>	53,13	54,85
100	1,36	1,48	2,73	2,74	<b>11,14</b>	<b>16,51</b>	58,46	58,04

собой полнотекстовый поиск документов по ключевым словам или предложениям, сформулированным на естественном языке с возможностью задания ограничений на поля метаданных документа (автор, заглавие, дата публикации и др.) [5]. Поиск работает на основе многокритериальной оценки сходства предложений. Учитываются статистические, синтаксические и семантические критерии.

Поиск текстовых заимствований основан на поиске тематически похожих документов [11]. Для предложений из множества тематически похожих документов осуществляется их многокритериальное сопоставление с наиболее значимыми предложениями проверяемого документа [12].

В табл. 1 представлены данные о производительности серверных решений при выполнении задач поиска и анализа текстов [10], а именно о среднем времени выполнения запросов. Для выполнения расчетов были использованы ресурсы ЦОД ФИЦ ИУ РАН [13].

Опишем используемые в табл. 1 обозначения: Users — число одновременных пользователей; power8\_ru и power8\_en — данные о производительности Power8 на русскоязычной и английской коллекции соответственно; x86\_ru и x86\_en — данные о производительности x86 на русскоязычной и английской коллекции соответственно.

## 2.2 Конфигурации серверных решений

На производительность и стоимость серверных решений влияют практически все параметры оборудования: центральный процессор, оперативная память, дисковая подсистема и др. В рамках настоящей работы для сравнения используются серверные решения на базе IBM Power8 и Intel Xeon, их подробные технические характеристики приведены в работе [10], а основные, влияющие на проводимые экономические расчеты, приведены в табл. 2.

**Таблица 2** Основные характеристики используемых серверных решений

Семейство процессора	Архитектура	Число процессоров	Число ядер на процессор	Общее число виртуальных процессоров (потоков)	Базовая тактовая частота, ГГц	Потребляемая мощность, Вт
Intel Xeon	x86_64	2	8	32	2,1	317
IBM Power8	POWER8	2	10	160	2,86	742

### 2.3 Данные для расчета стоимости жизненного цикла

В качестве экономических данных используется информация о ценах поставщиков, работающих на российском рынке. Общая стоимость решения включает в себя следующие составляющие:

- стоимость потребления энергии за 5 лет;
- стоимость серверов при закупке;
- стоимость дополнительной гарантии с 4-го года владения.

В табл. 3 указаны статьи расходов владельца серверного решения, которые используются для расчета ТСО в настоящей работе.

**Таблица 3** Экономические параметры для расчета ТСО

Сервер	Стоимость 1 сервера при покупке (включая 3 года гарантии), долл. США	Стоимость электроэнергии, потребляемой 1 сервером в течение 5 лет, долл. США	Стоимость постгарантийного обслуживания 1 сервера с 4-го года владения (в год), долл. США
На базе Intel Xeon	8950	2250	895
На базе IBM Power8	11200	5265	3714

### 3 Способ расчета стоимости жизненного цикла

Общий подход к оценке стоимости серверного решения заключается в анализе требований заказчика к разворачиваемой цифровой платформе и расчете ТСО в зависимости от этих требований. Такой подход позволяет оценить, какое решение является более выгодным с учетом требований заказчика. В основе экономических расчетов лежат следующие шаги:

- выбор набора параметров: требования к производительности, отказоустойчивости и др., продолжительность жизненного цикла (как правило, 5–7 лет [4]) и др.;

- определение необходимого числа серверов ( $N$ ) для выполнения требований заказчика;
- расчет стоимости жизненного цикла для  $N$  серверов.

Далее под «гарантированным выполнением запроса» будет подразумеваться гарантированное успешное выполнение запроса. Назовем запросы по поиску текстовых заимствований, вне зависимости от языка, «тяжелыми» (ресурсозатратными) запросами, а поисковые запросы — «легкими».

Путем перебора различных распределений по процентному соотношению запросов были выявлены ключевые из них, а именно: когда решение на базе платформы Power экономически более выгодно, когда выгоднее x86 и случай, когда решения экономически равнозначны.

В рамках настоящей работы рассматриваются три типа требований:

- (1) обработка потока «тяжелых» запросов при гарантированном среднем времени исполнения запросов;
- (2) обработка потока «легких» запросов при гарантированном среднем времени исполнения запросов;
- (3) гарантированное выполнение запросов всех типов за заданное время.

Для каждого из трех типов требований рассчитываются необходимый объем ресурсов (число серверов) и ТСО для серверных решений на базе Power8 и x86.

При расчете ТСО учитываются следующие параметры:

- (1) число одновременно обслуживаемых пользователей (активных);
- (2) процентное соотношение различных типов нагрузки;
- (3) среднее время гарантированного выполнения запроса (установлено во время проведения экспериментов в [10]).

В рамках данной работы ограничимся единственным параметром производительности — средним временем выполнения (см. табл. 1). Отметим, что предлагаемый способ расчета ТСО может учитывать любой параметр / набор параметров производительности.

Требования к серверному решению формируются на основе проведенных экспериментов в работе [10] для четырех типов запросов при условии, что число пользователей на один сервер не больше 100. Отметим, что ограничение по числу пользователей связано с появлением отказов в обслуживании (deny out of service) при решении рассматриваемых задач для обоих серверных решений, когда число пользователей превышает 100. Отказы связаны с тем, что при «тяжелых» запросах сервер оказывается перегружен. Как правило, эта проблема решается путем организации очереди запросов, однако в рассматриваемой постановке интерес представляет как раз «чистое» время выполнения запросов без учета времени нахождения в очереди. Исследование характера отказов и учет отказов — это перспективная тема для дальнейших исследований.

Таким образом, представленные далее расчеты ТСО подразумевают следующее:

- число одновременных пользователей не более 100 на физический сервер;
- гарантированное выполнение 100% запросов.

Для упрощения расчетов зададим число пользователей не больше 100 ко всему решению, а не к физическому серверу, так как при увеличении числа активных пользователей все расчеты и параметры стоимости могут быть определены путем умножения на кратный коэффициент.

## 4 Экономический расчет стоимости серверных решений

Далее представлены расчеты ТСО для трех случаев (наборов требований):

- (1) выполнение ресурсозатратных («тяжелых») запросов;
- (2) выполнение «легких» запросов;
- (3) выполнение запросов всех типов с минимальным средним временем выполнения (желаемое время или время выполнения — ключевой фактор).

Отметим, что для всех случаев существуют требования по умолчанию (далее они не дублируются):

- число одновременных пользователей — 100;
- гарантированное выполнение всех запросов;
- продолжительность жизненного цикла — 5 лет.

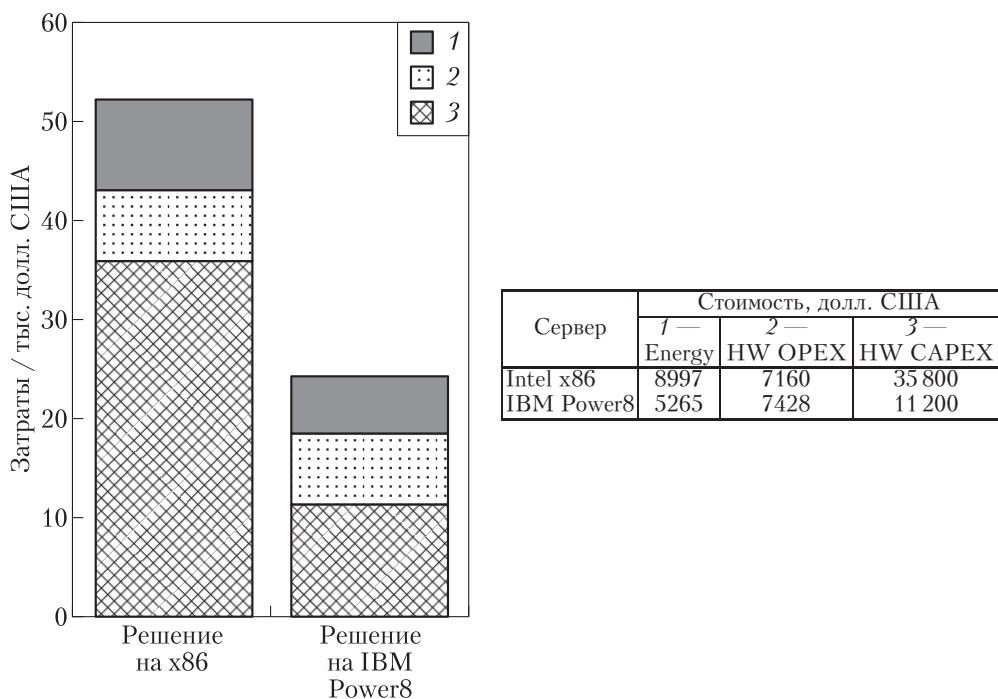
Далее на графиках для указания статей расходов используются следующие обозначения (ввиду очевидности, формулы для расчета не приводятся):

- стоимость потребляемой энергии решением в течение 5 лет (Energy);
- стоимость постгарантийного обслуживания решения начиная с 4-го года (HW OPEX);
- первоначальная стоимость решения, включая гарантию на 3 года (HW CAPEX).

В первом и втором случаях отражено изменение процентного соотношения каждого типа нагрузки с определенными требованиями к среднему времени выполнения в зависимости от типа запросов.

Рассмотрим первый случай со следующими требованиями:

- «тяжелые» запросы занимают все время;
- «легкие» запросы отсутствуют;
- среднее время выполнения запросов — менее 21 с (см. табл. 1: один сервер на базе x86 справляется с этим требованием лишь при 30 одновременных пользователях, а один Power8 — при 100).



**Рис. 1** Стоимость жизненного цикла при выполнении ресурсозатратных запросов

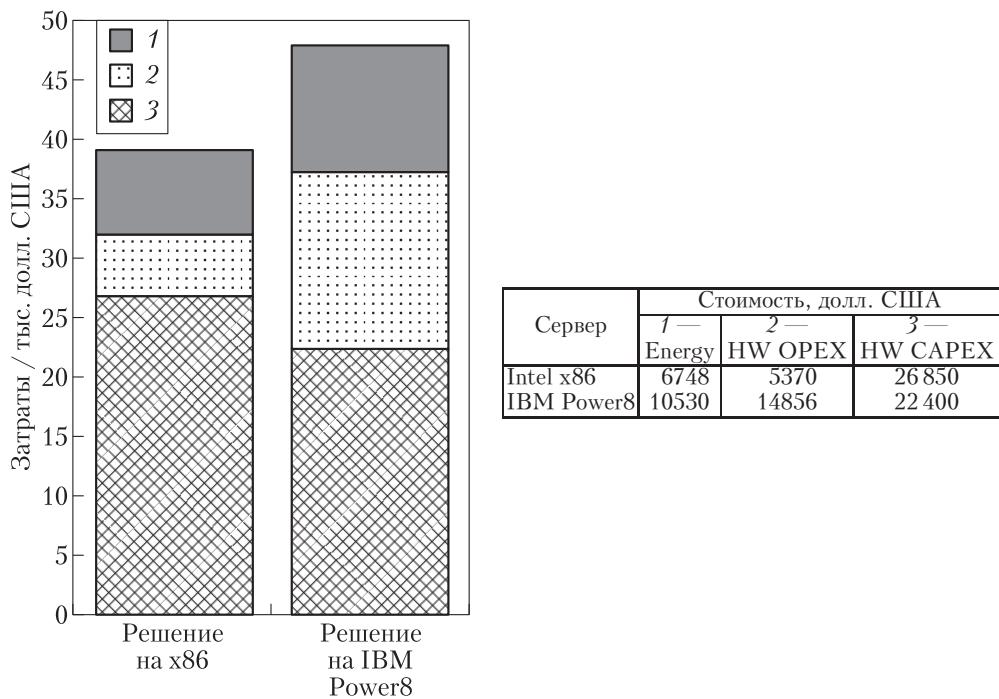
Масштабируя решение на базе x86 путем увеличения числа серверов, получаем, что даже два сервера x86 не справляются с вышеуказанными требованиями (справляются при 60 одновременных пользователях, но не при 100), три сервера — при 90 пользователях, но не при 100. Следовательно, решение на базе x86 справляется с нагрузкой при 100 пользователях только в случае использования четырех серверов. Таким образом, для выполнения вышеперечисленных требований необходимо приобрести или четыре сервера на базе x86, или один сервер на базе Power8 (рис. 1).

Используя значения из табл. 3, получаем следующие результаты расчета ТСО для четырех серверов на базе x86 и для одного сервера на базе Power8 (см. рис. 1).

При большом числе ресурсозатратных запросов (см. рис. 1) расчет ТСО на срок до 5 лет с учетом вышеуказанных характеристик показал, что решение на базе Power8 экономически более выгодно, чем на базе x86.

Далее рассмотрим второй случай:

- «тяжелые» запросы отсутствуют;
- «легкие» запросы занимают все время;



**Рис. 2** Стоимость жизненного цикла при выполнении «легких» запросов

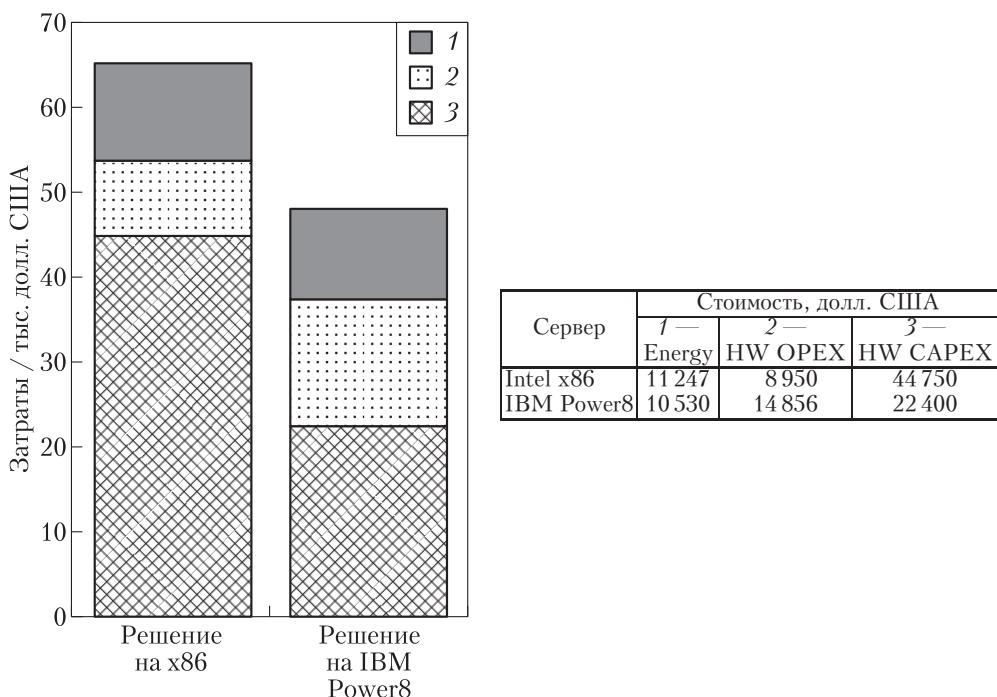
- среднее время выполнения запросов — менее 1,2 с (см. табл. 1: один сервер на базе x86 справляется с этим требованием лишь при 40 одновременных пользователях, а один Power8 — при 60).

Масштабируя решения путем увеличения числа серверов, получаем, что для выполнения вышеперечисленных требований необходимо приобрести либо 3 сервера на базе x86, либо 2 сервера на базе Power8 (рис. 2).

Очевидно, что в данном случае (см. рис. 2) решение на базе x86 экономически более выгодно; и это наблюдается до тех пор, пока ресурсозатратных запросов не станет больше примерно 30% от общего числа. Когда число ресурсозатратных запросов превышает 30%, соотношение ТСО меняется в пользу решения на Power8. Крайний случай, когда 100% запросов — «тяжелые», представлен на рис. 1, на котором видно экономическое преимущество решения на Power8.

Далее рассмотрим случай с одинаковым числом запросов разных типов за минимальное время (3-й случай, рис. 3) со следующими требованиями:

- «тяжелые» запросы занимают половину времени;
- «легкие» запросы занимают половину времени;



**Рис. 3** Стоимость жизненного цикла при выполнении запросов всех типов за минимальное время

- среднее время выполнения «тяжелых» запросов — менее 15 с;
- среднее время выполнения «легких» запросов — менее 1 с.

Рассуждая аналогично предыдущим случаям, получаем, что для выполнения требований необходимо приобрести либо 5 серверов на базе x86, либо 2 сервера на базе Power8 (см. рис. 3).

Представленный на рис. 3 расчет ТСО является индикатором того, что для достижения желаемого времени выполнения запросов на платформе x86 требуется большее число серверов, чем на основе Power8.

## 5 Заключение

В настоящем исследовании предложен способ выбора серверного решения для цифровой платформы на основе расчета ТСО с учетом требований и ограничений. Предложенный способ основывается на данных о стоимости и производительности серверов при решении известной задачи. Предложенный способ апробирован путем сравнения стоимости серверных решений с процессорами IBM Power8 и Intel Xeon для задач поиска и анализа текстов.

Проведенное исследование показало, что, учитывая основное требование — гарантированное выполнение всех запросов, решения на обеих серверных платформах способны на успешное выполнение поставленной задачи при условии разного числа серверов и, как следствие, стоимости решения. При увеличении числа пользователей, числа запросов и уменьшении времени выполнения запросов серверное решение на базе Power8 имеет экономическое преимущество. Однако в случае выполнения задач, не требующих значительного потребления ресурсов, преимущество остается за x86.

Отметим, что предложенный способ расчета ТСО применим для любых серверных решений и цифровых платформ, данные о производительности и стоимостных характеристиках которых известны. В классическом случае в зависимости от типов запросов, необходимых для выполнения на той или иной цифровой платформе, первостепенная задача — определить требования, которые являются наиболее значимыми для решения в целом. Отметим, что предложенный способ расчета ТСО также позволяет оценить эффективность серверных решений в целом, а также сравнить модели серверов между собой, что может быть полезно в практических задачах выбора аппаратного обеспечения для цифровых платформ и вычислительных центров.

## Литература

1. *Gawer A.* Platforms, markets and innovation: An introduction // Platforms, markets and innovation. — Cheltenham, Northampton: Edward Elgar, 2009. Ch. 1. P. 1–16.
2. Климанов В. П., Сутягин М. В., Быстrikova В. А. Задачи катастрофоустойчивости кластерных вычислительных систем // Новости искусственного интеллекта, 2002. № 3(51). С. 22–30.
3. Иванилов Е. И. Некоторые аспекты выбора серверов // Корпоративные системы, 2003. № 18(83). С. 34–36.
4. Ройзензон Г. В. Многокритериальный выбор вычислительных кластеров // Труды ИСА РАН, 2005. Т. 12. С. 68–94.
5. Ананьева М. И., Девяткин Д. А., Зубарев Д. В., Осипов Г. С., Смирнов И. В., Соченков И. В., Тихомиров И. А., Швец А. В., Шелманов А. О. TextAppliance: поиск и анализ больших массивов текстов // Тр. 15-й национальной конф. по искусственному интеллекту с международным участием. — Смоленск: Универсум, 2016. С. 220–228.
6. Top 500. Highlights — November 2017. <https://www.top500.org/lists/2017/11/highlights>.
7. POWER8 hits the merchant market. <https://www-03.ibm.com/systems/power/advantages/smartpaper/memory-bandwidth.html>.
8. Adinetz A. V., Baumeister P. F., Böttiger H., Hater T., Maurer T., Pleiter D., Schenck W., Schifano S. F. Performance evaluation of scientific applications on POWER8 // High performance computing systems. Performance modeling, benchmarking, and simulation / Eds. S. A. Jarvis, S. A. Wright, S. D. Hammond. — Lecture notes in computer science ser. — Springer, 2015. Vol. 8966. P. 24–45.

9. Reguly I. Z., Keita A.-K., Giles M. B. Benchmarking the IBM Power8 processor // 25th Annual Conference (International) on Computer Science and Software Engineering Proceedings. — Toronto, Canada: IBM/ACM, 2015. P. 61–69.
10. Ядринцев В. В., Зубарев Д. В., Мальковский С. И., Тихомиров И. А. Сравнение производительности серверных платформ в задачах поиска и анализа текстов // Информационные технологии и вычислительные системы, 2018. № 1. С. 37–45.
11. Соценков И. В., Зубарев Д. В., Тихомиров И. А. Эксплоративный патентный поиск // Информатика и её применения, 2018. Т. 12. Вып. 1. С. 89–94.
12. Zubarev D., Sochenkov I. Using sentence similarity measure for plagiarism source retrieval // CEUR Workshop Proceedings, 2014. Vol. 1180. P. 1027–1034.
13. Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук. <http://frccsc.ru>.

Поступила в редакцию 19.03.18

---

## CHOOSING SERVER SOLUTION FOR DIGITAL PLATFORM OF TEXT SEARCH AND ANALYSIS

V. Yadrinsev<sup>1,2</sup>, K. Klyubina<sup>3</sup>, I. Tikhomirov<sup>1</sup>, and A. Gershel'man<sup>3</sup>

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

<sup>2</sup>Peoples’ Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklaya Str., Moscow 117198, Russian Federation

<sup>3</sup>IBM East Europe/Asia, 10 Presnenskaya Nab., Moscow 123112, Russian Federation

**Abstract:** The method of choosing a server solution for a digital platform of text search and analysis based on calculation of the total cost of ownership (TCO) is proposed. The method takes into account such parameters as the type of tasks solved by the digital platform, the required performance, the quality of service, etc. The proposed method is tried out on two modern server solutions in the face of various requirements and restrictions. The paper describes the hardware configurations, the features of the tasks to be solved and the parameters that were used in the calculation of TCO. The presented method of calculation can be widely applicable in solving practical problems of choosing hardware for digital platforms and data centers with known requirements and restrictions.

**Keywords:** digital economy; digital platforms; choosing of server solution; total cost of ownership, TCO; TCO calculation; text analysis; IBM Power8; Intel Xeon

**DOI:** 10.14357/08696527180302

## Acknowledgments

The work was partly supported by the Russian Foundation for Basic Research (project 17-29-07016).

## References

1. Gawer, A. 2009. Platforms, markets and innovation: An introduction. *Platforms, markets and innovation*. Cheltenham, Northampton: Edward Elgar. 1–16.
2. Klimanov, V. P., M. V. Sutyagin, and V. A. Bystrikova. 2002. Zadachi katastrofoustoychivosti klasternykh vychislitel'nykh sistem [Problems of catastrophic stability of cluster computing systems]. *Novosti iskusstvennogo intellekta* [News of Artificial Intelligence] 3(51):22–30.
3. Ivanilov, E. I. 2003. Nekotorye aspekty vybora serverov [Several aspects of server choosing]. *Intelligent Enterprise* 18(83):34–36.
4. Royzenzon, G. V. 2005. Mnogokriterial'nyy vybor vychislitel'nykh klasterov [Multi-criteria choice of computing clusters]. *Trudy ISA RAN* [Works of ISA RAS] 12:68–94.
5. Anan'eva, M. I., D. A. Devyatkin, D. V. Zubarev, G. S. Osipov, I. V. Smirnov, I. V. Sochenkov, I. A. Tikhomirov, A. V. Shvets, and A. O. Shelmanov. 2016. TextAppliance: poisk i analiz bol'shikh massivov tekstov [TextAppliance: Search and analysis of large arrays of texts]. *Tr. 15-y natsional'noy konf. po iskusstvennomu intellektu s mezhdunarodnym uchastiem* [15th National Conference on Artificial Intelligence with International Participation Proceedings]. Smolensk: Universum. 220–228.
6. Top 500. Highlights — November 2017. Available at: <https://www.top500.org/lists/2017/11/highlights/> (accessed December 18, 2017).
7. POWER8 hits the merchant market. Available at: <https://www-03.ibm.com/systems/power/advantages/smartpaper/memory-bandwidth.html> (accessed January 22, 2018).
8. Adinetz, A. V., P. F. Baumeister, H. Böttiger, T. Hater, T. Maurer, D. Pleiter, W. Schenck, and S. F. Schifano. 2015. Performance evaluation of scientific applications on POWER8. *High performance computing systems. performance modeling, benchmarking, and simulation*. Eds. S. A. Jarvis, S. A. Wright, and S. D. Hammond. Lecture notes in computer science ser. Springer. 8966:24–45.
9. Reguly, I. Z., A.-K. Keita, and M. B. Giles. 2015. Benchmarking the IBM Power8 processor. *25th Annual Conference (International) on Computer Science and Software Engineering Proceedings*. Toronto, Canada: IBM/ACM. 61–70.
10. Yadrintsev, V. V., D. V. Zubarev, S. I. Mal'kovskiy, and I. A. Tikhomirov. 2018. Sravnenie proizvoditel'nosti servernykh platform v zadachakh poiska i analiza tekstov [Performance comparison of server platforms in search and text analysis tasks]. *Informatsionnye tekhnologii i vychislitel'nye sistemy* [Information Technologies and Computing Systems] 1:37–45.
11. Sochenkov, I. V., D. V. Zubarev, and I. A. Tikhomirov. 2018. Eksplorativnyy patentnyy poisk [Exploratory patent search]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 12(1):89–94.

12. Zubarev, D., and I. Sochenkov. 2014. Using sentence similarity measure for plagiarism source retrieval. *CEUR Workshop Proceedings*. 1180:1027–1034.
13. Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences. Available at: <http://frccsc.ru> (accessed January 22, 2018).

*Received March 19, 2018*

## Contributors

**Yadrintsev Vasiliy V.** (b. 1993) — researcher, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation; PhD student, Peoples’ Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklaya Str., Moscow 117198, Russian Federation; vvyadrincev@gmail.com

**Klyubina Katerina V.** (b. 1994) — technical consultant, IBM East Europe/Asia, 10 Presnenskaya Nab., Moscow 123112, Russian Federation; KKlyubina@ru.ibm.com

**Tikhomirov Ilya A.** (b. 1980) — Candidate of Science (PhD) in technology, Head of Laboratory, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation; tih@isa.ru

**Gershelman Andrey F.** (b. 1959) — consultant in IT Strategy and IT Economics, IBM East Europe/Asia, 10 Presnenskaya Nab., Moscow 123112, Russian Federation; Andrey\_Gershelmann@ru.ibm.com

## АНАЛИЗ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКИХ СИСТЕМ: МЕТОДИКА РАСЧЕТА ВРЕМЕННЫХ ЗАТРАТ И ЧИСЛЕННОСТИ ПЕРСОНАЛА

*A. B. Борисов<sup>1</sup>, A. B. Босов<sup>2</sup>, A. B. Иванов<sup>3</sup>, A. И. Стефанович<sup>4</sup>*

**Аннотация:** Предложенный ранее подход к оценке характеристик функционирования программного обеспечения на основе имитационного моделирования и последующей статистической обработки результатов экспериментов развивается в связи с потребностями управления пользовательским персоналом информационно-аналитической системы (ИАС). Для расчета численности персонала деятельность пользователей типизирована в соответствии с комплексом предметных задач и функционалом привлекаемых программных средств. Представлены методические рекомендации по определению набора показателей временных затрат и сбору необходимой статистической информации, предложены конкретные измеряемые показатели, приведены алгоритмы вычисления параметров трудоемкости выполнения операций и производительности труда пользователей на основе собранных статистических данных. Разработанная методика оценки численности персонала ИАС проиллюстрирована простыми примерами.

**Ключевые слова:** информационно-аналитическая система; вероятностные характеристики; статистические методы; факторный анализ

**DOI:** 10.14357/08696527180303

### 1 Введение

В процессе создания и сопровождения информационно-телекоммуникационной системы решается много задач, связанных с определением характеристик ее функционирования. Если система создается с целью поддержки принятия оперативных/тактических/стратегических решений, то обязательными ее составляющими являются [1]:

<sup>1</sup>Институт проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук, ABorisov@ipiran.ru

<sup>2</sup>Институт проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук, AVBosov@ipiran.ru

<sup>3</sup>Институт проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук, AIvanov@ipiran.ru

<sup>4</sup>Институт проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук, AStefanovich@frccsc.ru

- локальные информационные массивы различной степени структурированности;
- интерфейсы, обеспечивающие доступ к внешним информационным ресурсам и сети Интернет;
- средства управления предметно-ориентированными базами данных (Data Warehouse);
- средства интерактивной обработки данных (OLAP);
- средства интеллектуального глубинного анализа данных (Data Mining);
- специальные программные средства решения аналитических задач целевого назначения системы.

Подобные информационно-телеинформационные системы называются информационно-аналитическими [1]. В связи с кардинальным усложнением задач, решаемых системами данного класса, проблема сопровождения ИАС значительно усложняется. Для ИАС в полной мере значимы вопросы расчета надежности аппаратуры и программного обеспечения, актуальны вопросы определения вероятностно-временных характеристик специального программного обеспечения (СПО).

Для решения этих задач в [2, 3] изложены подходы к соответствующим расчетам, апробированные на практике. Однако ключевую роль в функционировании ИАС играет не аппаратное или программное обеспечение, а персонал. В данном случае речь идет не о представителях службы технической поддержки и эксплуатации, а о пользователях ИАС, выполняющих целевые функции систем. В отличие от необходимого числа сотрудников службы технической поддержки определить потребности ИАС в пользовательском персонале как величину, пропорциональную числу обслуживаемых узлов/ресурсов системы, не представляется возможным. Имеет место скорее обратная ситуация, когда численность пользователей ИАС определяет количество необходимых для их работы автоматизированных рабочих мест (АРМ).

На эффективность и качество работы пользовательского персонала влияет значительное число факторов, среди которых можно выделить:

- квалификацию и уровень подготовки пользователей;
- заинтересованность и ответственность пользователей;
- степень однородности задач, решаемых каждым конкретным пользователем;
- интенсивность работы в ИАС (объем ежедневной нормы заданий);
- текущие индивидуальные психофизические характеристики каждого пользователя;
- необходимость совмещения пользователями выполнения функций в ИАС и других должностных обязанностей;

- потребительские качества инструментального пользовательского СПО в составе ИАС;
- характеристики и состояние АРМ.

Объективные же показатели, возможные к определению в рамках функционирования ИАС, — временные затраты на выполнение основных операций и основанные на них показатели численности персонала — обсуждаются в данной статье. Целью является разработка типовой методики определения численности пользовательского персонала, необходимого для обеспечения работы некоторой ИАС. Она состоит из следующих взаимосвязанных частей.

Первая часть содержит классификацию операций в ИАС, являющихся автоматизированными или ручными, т. е. нуждающимися в большем или меньшем вмешательстве пользователей ИАС. Предлагаемая классификация может быть развита или скорректирована для каждой конкретной существующей или перспективной ИАС при наличии детальной информации о целях ее функционирования, архитектуре, применением программно-алгоритмическом, аппаратном и коммуникационном обеспечении. Целевые функции ИАС достигаются путем выполнения того или иного набора представленных операций, а иногда предполагают их итеративную или «древовидную» комбинацию.

Вторая часть методики представляет простейшие математические модели для каждой предложенной операции ИАС. Она также содержит алгоритмы уточнения этих моделей на основе статистических данных функционирования ИАС с использованием аппарата факторного анализа [4].

Третья часть методики представляет формулы расчета численности пользовательского персонала в зависимости от интенсивности заявок на выполнение тех или иных целевых функций ИАС.

Статья организована следующим образом. Раздел 2 содержит классификацию операций в ИАС, требующих участия пользователя. В этом же разделе представлены:

- математические модели, описывающие трудоемкость этих операций;
- мероприятия, позволяющие собрать статистическую информацию об этих операциях в процессе различного рода испытаний, опытной и промышленной эксплуатации;
- формулы обработки полученной статистической информации, позволяющие уточнить значения факторов в математических моделях трудоемкости операций.

Раздел 3 содержит методику расчета пользовательского персонала и простейший пример ее использования. В разд. 4 представлены заключительные замечания и возможные направления дальнейших исследований.

## **2 Методика оценивания временных характеристик решения аналитических задач**

### **2.1 Общие принципы оценивания временных характеристик**

Настоящая методика базируется на следующих принципах.

1. Опыт создания самых разных ИАС позволяет обоснованно предполагать, что процесс решения любой целевой аналитической задачи представляет собой выполнение набора однотипных операций, которые могут быть классифицированы следующим образом:
  - автоматизированные операции:
    - ввод текстовых данных;
    - поиск/отбор результатов;
    - ввод и обработка мультимедийных данных;
    - анализ/интерпретация/принятие решений по результатам выполнения поисков и проведения расчетов;
  - автоматические операции:
    - передача данных между узлами ИАС;
    - логистические операции при выполнении аналитических запросов;
    - аналитические расчеты;
    - формирование отчетов.

В конкретной ИАС данный перечень может меняться или уточняться.

Автоматизированные операции проводятся с участием пользователей ИАС и связаны с действиями, требующими осмысленного вмешательства человека при вводе и обработке разнородной информации, а также принятия решений. Автоматические операции в полном объеме выполняются программным обеспечением ИАС без какого-либо участия пользователей и связаны с приемом, обработкой и хранением информации.

2. Процесс выполнения функций назначения ИАС представляет собой решение некоторого набора целевых задач, который складывается из последовательности применения перечисленных выше операций. При этом для каждой задачи возможно существование нескольких сценариев ее выполнения, подразумевающих привлечение различного набора операций и последовательности их применения. Более того, решение целевых задач часто представляет собой итеративный или древовидный процесс. Эти обстоятельства серьезно влияют на трудоемкость решения любой целевой задачи в каждом конкретном случае.
3. Временные затраты на выполнение автоматизированных операций зависят от следующих факторов, которые предлагается учитывать при расчете трудоемкости:

- индивидуального уровня подготовки пользователя ИАС: опыта работы со средствами вычислительной техники вообще, конкретным СПО ИАС и пр.;
- качества имеющейся в ИАС информации, т. е. ее содержательности, полноты и непротиворечивости, актуальности по отношению к решаемым целевым аналитическим задачам;
- качества входной информации, подлежащей вводу: исходная текстовая информация, подлежащая вводу, представлена в электронном или печатном, или рукописном виде, или ее нужно получить от какого-то иного лица и т. д.;
- объема и качества мультимедийной информации, которую пользователь должен обработать,
- объема выходных данных: результатов выполнения аналитических расчетов, требующих от оператора последующих анализа / интерпретации / принятия решений.

Временные затраты на выполнение автоматических операций зависят:

- от реальной пропускной способности используемых в ИАС каналов связи;
- реальных показателей производительности аппаратно-программной платформы по приему / передаче, чтению / записи и хранению информации;
- сложности аналитических расчетов, выполняемых в автоматическом режиме;
- объема и структуры отчетов, формируемых в автоматическом режиме;
- особенностей специализированных средств, применяемых в ИАС, например средств обеспечения информационной безопасности — программных средств аутентификации, средств шифрования сетевого трафика, антивирусных программ и пр.

4. Определение характеристик временных затрат на выполнение отдельных операций и решение целевых задач предлагается проводить в два этапа. На первом этапе рассчитывается теоретическое прогнозное значение соответствующей характеристики согласно предлагаемой факторной модели. На втором этапе в процессе проведения нагружочного тестирования на стенде или в рамках опытной эксплуатации создаваемой ИАС производится ряд специализированных метрологических экспериментов по выполнению операций / решению задач, по результатам которых выполняется статистическое уточнение факторов модели. При этом следует отметить, что прогнозируемые значения характеристик и их уточненные версии являются некоторыми опорными значениями, которые могут отличаться от их реальных аналогов

как в большую, так и в меньшую сторону. Поэтому в процессе промышленной эксплуатации также должна накапливаться статистическая информация для последующего уточнения этих характеристик.

5. Ряд статистических данных, соответствующих временным затратам на выполнение отдельных операций, может регистрироваться в системных журналах, формируемых элементами СПО ИАС. Остальные — регистрируются пользователями в таблицах, соответствующих каждому виду затрат. При этом операции должны выполняться именно теми пользователями, которые впоследствии будут постоянно эксплуатировать систему. Такой подход позволит учесть уровень квалификации и индивидуальные особенности обслуживающего персонала ИАС.
6. Методика оценки временных затрат базируется:
  - на требованиях к качеству и надежности программных средств, регламентированных в стандартах [5, 6],
  - методике расчета показателей надежности, предложенной в [2, 3],
  - сведениях из математической статистики [4, 7] для построения процедур уточнения характеристик трудоемкости по собранным статистическим данным.

## **2.2 Оценивание временных затрат на выполнение неавтоматических операций**

### **2.2.1 Операции ввода текстовых данных**

К этому виду относятся все операции по вводу/выбору из предопределенных списков текстовых данных в поля различных форм.

Формула вычисления трудоемкости подобной операции имеет вид:

$$T_1 = \tau_1 n_1, \quad (1)$$

где  $\tau_1$  — среднее время заполнения одного поля экранной формы;  $n_1$  — число заполняемых полей формы. Например, если принять  $\tau_1 = 15$  с, то время заполнения формы, содержащей 16 полей, составит 4 мин, 35 полей — 8 мин 45 с.

Далее временные затраты на ввод текстовых данных должны быть скорректированы на основании статистической информации. Для получения этой информации привлекаются пользователи, осуществляющие предметную деятельность в ИАС. Численность привлеченных сотрудников может составить порядка 10 человек, что является достаточным для обеспечения репрезентативности выборки. Для получения статистической информации должны быть подготовлены текстовые данные для ввода: например, по 10 вариантов полного набора данных для каждой из имеющихся экранных форм. Статистическая информация получается и обрабатывается путем проведения следующей последовательности операций:

- каждый испытуемый без перерыва заполняет полный набор данных ( $MN$ , где  $M$  — число форм;  $N$  — число подготовленных вариантов данных) по предоставленным ему печатным данным. Время заполнения каждого набора фиксируется. Затем происходит сверка набранных данных и исходной текстовой информации на предмет выявления ошибок. Число ошибок также фиксируется;
- испытуемые разбиваются на пары, и 1-й номер в паре заполняет полный набор данных по информации, которую ему диктует 2-й номер. Затем номера меняются местами и выполняют ту же проверку. Время заполнения каждого набора также фиксируется. После этого происходит сверка набранных данных и исходной текстовой информации на предмет выявления ошибок, и число обнаруженных ошибок также фиксируется;
- уточнение  $\hat{\tau}_1$  параметра  $\tau_1$  производится по следующей формуле:

$$\hat{\tau}_1 = \left( 1 + \frac{e_{\Sigma}}{2NK \sum_{m=1}^M F_m} \right) \frac{1}{2NK \sum_{m=1}^M F_m} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K (T'_{mnk} + T''_{mnk}),$$

где  $M$  — число экранных форм;  $F_m$  — число полей  $m$ -й формы;  $N$  — число подготовленных вариантов данных;  $K$  — число привлеченных пользователей;  $e_{\Sigma}$  — общее число ошибок ввода;  $T'_{mnk}$  — время заполнения  $n$ -го варианта  $m$ -й формы  $k$ -м сотрудником по машинописному образцу;  $T''_{mnk}$  — время заполнения  $n$ -го варианта  $m$ -й формы  $k$ -м пользователем под диктовку.

### 2.2.2 Операции поиска/отбора результатов

Будем считать, что процесс поиска представляет собой последовательность выполнения различного рода запросов к одной или нескольким таблицам баз данных ИАС. Основную часть составляют запросы типа

```
SELECT TOP [N] FROM [TABLE] WHERE [PAR1 = X1] AND ...
    ... AND [PARM = XM],
```

т. е. запросы на выборку  $N$  первых ответов, одновременно удовлетворяющих условиям  $PAR_i = X_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, M$ . Общие затраты на эту операцию складываются из затрат на поиск по таблицам баз данных, а также на формирование результата.

Формула для опорной оценки времени имеет вид:

$$T_2 = \tau_2 MQ + \tau_3 N,$$

где  $\tau_2$  — время сравнения одного поля условия с соответствующим полем в одной строке таблицы;  $M$  — число условий в запросе;  $Q$  — общее число строк

в таблицах, по которым производится поиск;  $\tau_3$  — время формирования одной строки ответа.

Опорную оценку рассчитать можно, например, из таких предположений:  $\tau_2 = 0,0001$  с (с учетом возможного выполнения операции чтения страниц базы данных с диска в оперативную память);  $M = 5$  (число условий в запросе);  $Q = 200\,000$  (верхняя оценка общего числа записей в базе данных);  $\tau_3 = 0,0001$  с (время формирования строки ответа сравнимо с длительностью операции чтения/записи);  $N = 100$  (максимальная длина ответа, приемлемая для дальнейшего анализа). При выборе таких параметров величина  $T_2 = 100,01$  с.

Показатели временных затрат на выполнение операций поиска могут быть значительно уточнены по результатам обработки статистики, накапливаемой в процессе опытной и промышленной эксплуатации. Уточнению подлежат показатели  $\tau_2$  и  $\tau_3$ . Статистическая информация получается и обрабатывается путем выполнения следующих операций:

- выполняются поисковые запросы, при этом производятся измерения временных затрат и фиксируются для каждого запроса вместе с соответствующими значениями  $M$ ,  $Q$ ,  $N$  и  $T$ . Суммарно должно быть выполнено (число  $K$ ) не менее 1000 запросов;
- уточнения  $\hat{\tau}_2$  и  $\hat{\tau}_3$  параметров  $\tau_2$  и  $\tau_3$  выполняются по формулам факторного анализа [4]:

$$\begin{aligned}\hat{\tau}_2 &= \frac{\overline{xz}\overline{y^2} - \overline{xy}\overline{yz}}{\overline{x^2}\overline{y^2} - (\overline{xy})^2}; \quad \hat{\tau}_3 = \frac{\overline{yz}\overline{x^2} - \overline{xy}\overline{xz}}{\overline{x^2}\overline{y^2} - (\overline{xy})^2}; \\ \overline{x^2} &= \sum_{k=1}^K x_k^2; \quad \overline{y^2} = \sum_{k=1}^K y_k^2; \\ \overline{xy} &= \sum_{k=1}^K x_k y_k; \quad \overline{xz} = \sum_{k=1}^K x_k z_k; \quad \overline{yz} = \sum_{k=1}^K y_k z_k; \\ x_k &= M_k Q_k; \quad y = N_k; \quad z_k = T_k.\end{aligned}$$

### **2.2.3 Операции обработки мультимедийных данных**

В качестве примеров операций по обработке мультимедиа можно привести выделение в видео- или фотоматериалах изображений отдельных объектов, например людей, животных, зданий и пр. Для простоты и иллюстрации методики будем говорить о понятной и распространенной процедуре выделения лиц людей из разных медийных источников: цифровых фотографий разного качества или видеопоследовательностей. В подавляющем большинстве случаев лица людей в мультимедиа могут быть выделены автоматически: на фото — практически мгновенно; на видео — в режиме реального времени. Основные временные

затраты связаны с последующим отбором интересующего изображения. Модели временных затрат на обработку фото- и видеинформации при этом различны и представлены ниже.

Если считать, что общее среднее время на получение одного изображения лица прямо пропорционально числу лиц на фото, то затраты на эту операцию описываются следующей формулой:

$$T_3 = \tau_4 + n_2 \tau_5, \quad (2)$$

где  $\tau_4$  — среднее время автоматического выделения отдельных лиц и сохранения выбранных фрагментов фото;  $n_2$  — среднее число лиц на фотографии;  $\tau_5$  — среднее время операции сравнения изображений (время принятия решения экспертом по одной фотографии «да–нет»). Например, при  $\tau_4 = 20$  с,  $n_2 = 10$  и  $\tau_5 = 5$  с оценка параметра  $T_3 = 70$  с.

При автоматической обработке видеопоследовательностей, как правило, результат выдается в виде треков — последовательностей изображений лиц, предположительно принадлежащих одному человеку. Пользователь-эксперт в этом случае дополнительно изучает и изображение, и предложенные треки, поэтому в случае видеопоследовательности соотношение (2) уточняется для учета продолжительности видео и характеристик треков:

$$T_4 = \tau_6 + S_1 + \tau_8 n_5, \quad S_1 = n_3 n_4 \tau_7, \quad (3)$$

где  $\tau_6$  — длительность видеопоследовательности;  $n_3$  — число кадров, содержащих изображения лиц;  $n_4$  — среднее число лиц, встречающихся в кадре видеопоследовательности;  $\tau_7$  — среднее время операции сравнения изображений;  $n_5$  — среднее число изображений лица в одном треке;  $\tau_8$  — среднее время операции сравнения фотографий трека. Например, при  $\tau_6 = 600$  с,  $n_3 = 600$ ,  $n_4 = 10$ ,  $\tau_7 = 20$  с,  $n_5 = 10$  и  $\tau_8 = 5$  с оценка параметра  $T_4 = 1850$  с.

Параметры, используемые в формулах (2) или (3), должны уточняться в процессе эксплуатации. Процедура уточнения заключается в выполнении следующей последовательности операций:

- не менее  $K = 100$  раз выполняется обработка фотографий и фиксируются замеры  $T_3^k$ ,  $\tau_4^k$  и  $n_2^k$  для каждого  $k$ -го фото;
- также не менее  $K = 100$  раз для видео разной продолжительности выполняется обработка последовательностей и фиксируются замеры  $T_4^k$ ,  $\tau_6^k$ ,  $n_3^k$ ,  $n_4^k$ ,  $n_5^k$  и  $S_1^k$  для каждого  $k$ -го видео;
- параметры  $n_2$ ,  $\tau_4$  и  $\tau_5$  формулы (2) уточняются величинами  $\hat{n}_2$ ,  $\hat{\tau}_4$  и  $\hat{\tau}_5$ , а параметры  $\tau_6$ ,  $\tau_7$  и  $\tau_8$  формулы (3) уточняются величинами  $\hat{\tau}_6$ ,  $\hat{\tau}_7$  и  $\hat{\tau}_8$  следующим образом:

$$\begin{aligned}\hat{n}_2 &= \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K n_2^k; & \hat{\tau}_4 &= \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \tau_4^k; & \hat{\tau}_5 &= \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \frac{T_3^k - \tau_4^k}{n_2^k}; \\ \hat{\tau}_6 &= \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \tau_6^k; & \hat{\tau}_7 &= \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \frac{S_1^k}{n_3^k n_4^k}; & \hat{\tau}_8 &= \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \frac{T_4^k - \tau_6^k - S_1^k}{n_5^k}.\end{aligned}$$

## 2.2.4 Операции анализа/интерпретации/принятия решений

Временные затраты на выполнение таких операций складываются из фиксированных затрат на принятие решений и переменных затрат на выполнение операций анализа и интерпретации данных. Переменный характер этих затрат связан с вариацией объема данных, которые должны быть проанализированы. Уместно считать, что общее время, затрачиваемое на выполнение таких операций, прямо пропорционально объему отобранных результатов, поэтому затраты предлагаются описывать следующей формулой:

$$T_5 = \tau_9 + n_6 \tau_{10}, \quad (4)$$

где  $\tau_9$  — среднее время, затрачиваемое на процедуру принятия решения;  $n_6$  — число отобранных результатов поиска;  $\tau_{10}$  — среднее время выполнения операции анализа и интерпретации одного результата в отобранным списке. Например, при  $\tau_9 = 2$  мин,  $n_6 = 10$  и  $\tau_{10} = 0,5$  мин оценка параметра  $T_5 = 7$  мин.

Как и в предыдущих случаях, параметры  $\tau_9$  и  $\tau_{10}$  в (4) должны уточняться величинами  $\hat{\tau}_9$  и  $\hat{\tau}_{10}$ : накапливается статистическая информация  $T_9^k$  и  $n_6^k$  в не менее чем  $K = 100$  экспериментах и факторы модели корректируются по следующим формулам:

$$\begin{aligned}\hat{\tau}_{10} &= \frac{\overline{n_6 T_5} - \overline{n_6} \overline{T_5}}{\overline{n_6^2} - \overline{n_6}^2}; & \hat{\tau}_9 &= \overline{T_5} - \hat{\tau}_{10} \overline{n_6}; & \overline{n_6 T_5} &= \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K n_6^k T_5^k; \\ \overline{n_6} &= \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K n_6^k; & \overline{T_5} &= \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K T_5^k; & \overline{n_6^2} &= \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K (n_6^k)^2.\end{aligned}$$

## 2.3 Оценивание временных затрат на выполнение автоматических операций

### 2.3.1 Передача данных по телекоммуникационной сети

Временные затраты на выполнение этой операции вычисляются по формуле:

$$T_6 = r_1 v_1,$$

где  $r_1$  — фактическая скорость передачи данных по телекоммуникационным каналам;  $v_1$  — объем передаваемых данных. Время, затрачиваемое на выполнение

этой операции, является незначительным по сравнению со временем, затрачиваемым на другие операции. Статистическое уточнение характеристик для этой операции, по-видимому, не требуется.

### 2.3.2 Логистические операции

К логистическим относятся такие операции, как загрузка/выгрузка данных в/из различных баз данных в составе ИАС, формирование файлов отчетов, импорт/экспорт данных внешних информационных источников и т. п. Содержательно таких операций может быть множество, но все они объединены общим технологическим смыслом, поэтому и оценка времени для них унифицирована:

$$T_7^i = \tau_{11}^i n_7^i + \tau_{12}^i, \quad (5)$$

где  $T_7^i$  — время на выполнение логистической операции  $i$ -го типа;  $\tau_{11}^i$  — время выполнения логистической операции  $i$ -го типа для одной записи;  $n_7^i$  — объем «пакета заданий»;  $\tau_{12}^i$  — базовые затраты на выполнение логистической операции  $i$ -го типа. Например, в предположении, что  $\tau_{11}^i = 0,5$  с,  $n_7^i = 100$  и  $\tau_{12}^i = 10$  с, оценка параметра  $T_7^i = 60$  с.

Далее параметры  $\tau_{11}^i$  и  $\tau_{12}^i$  из (5) должны уточняться величинами  $\hat{\tau}_{11}^i$  и  $\hat{\tau}_{12}^i$ . Накапливается статистическая информация  $n_7^{i,k}$  и  $T_7^{i,k}$  по выборке объема не менее, чем  $K_i = 100$  для операции каждого  $i$ -го типа, а затем факторы модели корректируются согласно следующим формулам:

$$\begin{aligned} \hat{\tau}_{11}^i &= \frac{\overline{n_7^i T_7^i} - \overline{n_7^i} \overline{T_7^i}}{\overline{(n_7^i)^2} - \overline{n_7^i}^2}; & \hat{\tau}_{12}^i &= \overline{T_7^i} - \hat{\tau}_{11}^i \overline{n_7^i}; \\ \overline{n_7^i T_7^i} &= \frac{1}{K_i} \sum_{k=1}^{K_i} n_7^{i,k} T_7^{i,k}; & \overline{n_7^i} &= \frac{1}{K_i} \sum_{k=1}^{K_i} n_7^{i,k}; \\ \overline{T_7^i} &= \frac{1}{K_i} \sum_{k=1}^{K_i} T_7^{i,k}; & \overline{(n_7^i)^2} &= \frac{1}{K_i} \sum_{k=1}^{K_i} (n_7^{i,k})^2. \end{aligned}$$

### 2.3.3 Аналитические расчеты и формирование отчетов

Оставшиеся два типа автоматических операций, по мнению авторов статьи, в каждой ИАС носят слишком специфический характер, чтобы давать по ним какие-либо универсальные рекомендации. Конкретные алгоритмы как при проведении аналитических расчетов, так и при формировании отчетов могут оказаться и довольно сложными вычислительными процессами, и простейшими процедурами сохранения результатов поиска в файл. Наиболее уместным в этом случае представляется не проводить каких-либо предварительных расчетов, а просто набрать достаточную статистику в процессе испытаний/эксплуатации и применить

усредненные оценки или вообще ограничиться экспертым мнением о данных параметрах.

### **3 Методика оценивания численности персонала**

#### **3.1 Общие принципы оценивания численности**

В предыдущем разделе были оценены временные характеристики выполнения отдельных операций и решения задач в типовой ИАС. Полученные результаты являются основой вычисления следующих характеристик численности обслуживающего персонала, необходимого для решения некоторого фиксированного объема задач.

*Производительность  $r$  [операций/ед. вр.] пользователя по выполнению одной операции одного определенного типа* вычисляется по формуле:

$$r = \frac{1}{\tau}, \quad (6)$$

где  $\tau$  [ед. вр.] — среднее время выполнения одной операции (например,  $T_1, \dots, T_5$  из предыдущего раздела).

*Время  $T_{\text{nec}}$ , необходимое для выполнения  $N$  операций одного определенного типа  $n$  операторами*, вычисляется по формуле:

$$T_{\text{nec}} = \left\lceil \frac{N}{n} \right\rceil \tau, \quad (7)$$

где  $\lceil \cdot \rceil$  — операция округления в большую сторону.

*Число операторов, необходимое для выполнения  $N$  операций за время  $T$ ,* определяется формулой:

$$n_{\text{nec}} = \begin{cases} \text{не определено,} & \text{если } T < \tau; \\ \left\lceil \frac{N\tau}{T} \right\rceil, & \text{если } T \geq \tau. \end{cases} \quad (8)$$

#### **3.2 Пример оценки численности персонала**

Для оценки численности пользовательского персонала конкретной ИАС необходимо формально определить перечень функций, которые будут выполняться персоналом. Этот перечень должен быть согласован с расчетами временных затрат, выполненных в предыдущей части работы, т. е. либо основываться на той же терминологии, либо на близком аналоге или комбинации рассмотренных понятий. Далее приведен простой пример одного вида деятельности, поясняющий предлагаемую методику. Для других видов деятельности расчеты могут быть выполнены аналогично.

**Таблица 1** Модельные расчеты времени  $T_{\text{нec}}$ 

$n$	$T_{\text{нec}}, \text{ч}$		
	$N = 10$	$N = 100$	$N = 1000$
1	0,8	8	80
2	0,4	4	40
5	0,16	1,6	16
10	0,08	0,8	8

**Таблица 2** Модельные расчеты числа операторов  $n_{\text{нec}}$ 

$T, \text{ч}$	$n_{\text{нec}}, \text{ч}$		
	$N = 10$	$N = 100$	$N = 1000$
1	1	8	80
8	1	1	10
24	1	1	2
40	1	1	1

для регистрации  $N$  пользователей  $n$  администраторами, вычисленные по формуле (7), и модельных расчетов числа операторов  $n_{\text{нec}}$ , необходимых для регистрации  $N$  пользователей за время  $T$ , вычисленные по формуле (8).

## 4 Заключение

В данной статье представлена методика предварительного расчета и статистического уточнения параметров трудоемкости решения целевых задач ИАС и численности пользовательского персонала. Ее ключевые преимущества — операционное описание решения целевых задач ИАС и простота используемых математических моделей, а также возможность их корректировки по данным эксплуатации конкретной ИАС.

Недостатки представленной методики являются в некотором смысле продолжением ее достоинств. Универсальность идеи декомпозиции подразумевает детальную схему «сборки» алгоритма решения конкретной целевой задачи из набора имеющихся операций. Поэтому повышение точности оценок характеристик временных затрат на выполнение функций назначения ИАС связано с уточнением описания этих целевых функций для конкретных ИАС. Одновременно с этим математические модели определения временных затрат на выполнение отдельных операций могут быть значительно уточнены за счет включения в них других факторов. Оба эти направления определяют возможные перспективы дальнейших исследований.

В процессе эксплуатации любой ИАС выполняются операции администрирования, одной из которых является регистрация нового пользователя системы. Она относится к типу операций ввода атрибутивной информации, и ее трудоемкость вычисляется по формуле (1). Число заполняемых полей в этой операции может варьироваться в зависимости от нюансов разграничения доступа в конкретной ИАС. Если принять  $\tau_1 = 15$  с и  $n_1 = 20$ , то время регистрации одного пользователя составит 5 мин, а начальная оценка (6) производительности  $r = 12$  операций/ч.

В табл. 1 и 2 приведены результаты выполненных модельных расчетов количества времени  $T_{\text{нec}}$ , необходимо-

## Литература

1. Chamoni P., Gluchowski P. Analytische Informationssysteme: Business Intelligence-Technologien und — Anwendungen. — Berlin: Springer, 2004. 470 p.
2. Борисов А. В., Босов А. В., Иванов А. В., Корепанов Э. Р. К вопросу расчета надежности информационно-телеинформационных систем: учет характеристик программного обеспечения // Системы и средства информатики, 2018. Т. 28. № 1. С. 20–34.
3. Борисов А. В., Босов А. В., Иванов А. В., Чавтараев Р. Б. Имитационное моделирование пользовательской активности для оценивания вероятностно-временных характеристик программного обеспечения // Системы и средства информатики, 2018. Т. 28. № 2. С. 20–33.
4. Афифи А., Эйзен С. Статистический анализ: Подход с использованием ЭВМ / Пер с англ. — М.: Мир, 1982. 488 с. (Afifi A. A., Azen S. P. Statistical analysis: A computer oriented approach. — 2nd ed. — New York, NY, USA: Academic Press, 1979. 442 р.)
5. ГОСТ 28806-90. Межгосударственный стандарт. Качество программных средств. — М.: Изд-во стандартов, 2001. 8 с.
6. ГОСТ Р ИСО / МЭК 9126-93. Информационная технология. Оценка программной продукции характеристики качества и руководства по их применению. — М.: Изд-во стандартов, 2004. 10 с.
7. Ширяев А. Н. Вероятность. — М.: Наука, 1979. 574 с.

Поступила в редакцию 19.01.18

---

## ANALYTICAL INFORMATION SYSTEMS PERFORMANCE ANALYSIS: METHODOLOGY FOR TIMETABLE AND STAFF QUANTITY EVALUATION

*A. V. Borisov, A. V. Bosov, A. V. Ivanov, and A. I. Stefanovich*

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

**Abstract:** The approach proposed earlier to evaluate the software performance based on simulation and statistical processing of experimental results is developed for the needs of staff management of an analytical information system (AIS). To this purpose, staff responsibilities are classified to decompose the major AIS tasks solved by the corresponding application software. The paper presents methodical recommendations how to choose a set of timetable characteristics and observable metrics and collect related statistical information during the AIS testing and operation. The paper also contains the algorithms for calculation of the parameters of operations timetable and their statistical refinement. The methodology for assessing the performance of staff and the required number of staff is illustrated by simple examples.

**Keywords:** analytical information system; probability characteristics; statistical methods; factor analysis

**DOI:** 10.14357/08696527180303

## References

1. Chamoni, P., and P. Gluchowski. 2004. *Analytische Informationssysteme: Business Intelligence-Technologien und — Anwendungen*. Berlin: Springer. 470 p.
2. Borisov, A. V., A. V. Bosov, A. V. Ivanov, and E. R. Korepanov. 2018. K voprosu rascheta nadezhnosti informatsionno-telekommunikatsionnykh sistem: uchet kharakteristik programmnogo obespecheniya [To the reliability of information-telecommunication system: An approach to recognition of reliable software characteristics]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 28(1):20–34.
3. Borisov, A. V., A. V. Bosov, A. V. Ivanov, and R. V. Chavtaraev. 2018. Imitatsionnoe modelirovaniye pol'zovatel'skoy aktivnosti dlya otsenivaniya veroyatnostno-vremennykh kharakteristik programmnogo obespecheniya [Monte Carlo based user activity simulation for software performance evaluation]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 28(2):20–33.
4. Afifi, A. A., and S. P. Azen. 1979. *Statistical analysis: A computer oriented approach*. 2nd ed. New York, NY: Academic Press. 442 p.
5. GOST 28806-90. 2001. Mezhgosudarstvennyy standart. Kachestvo programmnnykh sredstv [Software quality. Terms and definitions]. Moscow: Standards Publs. 8 p.
6. GOST R ISO/IEC 9126-93. 2004. Informatsionnaya tekhnologiya. Otsenka programmnoy produktsii kharakteristiki kachestva i rukovodstva po ikh primeneniyu [Information technology. Software product evaluation. Quality characteristics and guidelines for their use]. Moscow: Standards Publs. 10 p.
7. Shiryaev, A. N. 1984. *Probability*. New York, NY: Springer-Verlag. 578 p.

Received January 19, 2018

## Contributors

**Borisov Andrey V.** (b. 1965) — Doctor of Science in physics and mathematics, principal scientist, Institute of Informatics Problems, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation; ABorosov@ipiran.ru

**Bosov Alexey V.** (b. 1969) — Doctor of Science in technology, principal scientist, Institute of Informatics Problems, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation; AVBosov@ipiran.ru

**Ivanov Alexey V.** (b. 1976) — scientist, Institute of Informatics Problems, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation; AIvanov@ipiran.ru

**Stefanovich Alexey I.** (b. 1983) — junior scientist, Institute of Informatics Problems, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation; AStefanovich@frccsc.ru

## БЕТА-ПОЛИНОМИАЛЬНЫЕ АПРИОРНЫЕ ПЛОТНОСТИ В БАЙЕСОВСКИХ МОДЕЛЯХ НАДЕЖНОСТИ\*

*А. А. Кудрявцев<sup>1</sup>, С. И. Палионная<sup>2</sup>, С. Я. Шоргин<sup>3</sup>*

**Аннотация:** Рассматривается байесовский подход к построению моделей теории надежности. При таком подходе модель считается заданной в определенном смысле неточно — предполагается, что основные параметры системы являются случайными величинами с известными априорными распределениями. В некоторые моменты времени система подвергается модификациям с целью повышения надежности, однако каждая модификация способна как увеличить, так и уменьшить надежность системы. По этой причине надежностные характеристики системы зависят от отношения параметров «эффективности» к параметрам «дефективности» средств, производящих модификации. Такое отношение можно назвать «индексом баланса системы». Рассматривается случай, когда один из параметров системы имеет априорное бета-распределение, а плотность другого параметра имеет вид полинома. Для различных комбинаций заданных априорных распределений в работе приведены формулы для вычисления вероятностных характеристик индекса баланса.

**Ключевые слова:** байесовский подход; модифицируемые информационные системы; теория надежности; полиномиальные плотности; бета-распределение; индекс баланса

**DOI:** 10.14357/08696527180304

### 1 Введение

В современном мире разрабатывается и вводится в эксплуатацию большое число сложных информационных систем, таких как программные компьютерные системы, информационно-вычислительные сети или административно-информационные системы. Эти системы периодически подвергаются различного рода модификациям, целью которых является улучшение характеристик созданной системы. Одной из наиболее важных характеристик системы является ее надежность. Каждое изменение, вносимое в систему, может как увеличить, так

\*Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект 17-07-00577).

<sup>1</sup>Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, факультет вычислительной математики и кибернетики, nubigena@mail.ru

<sup>2</sup>Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, факультет вычислительной математики и кибернетики, sofiapalionnaya@gmail.com

<sup>3</sup>Институт проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук, sshorgin@ipiran.ru

и уменьшить ее надежность. Проверка изменения функциональности системы после каждой модификации на детерминированном наборе тестов является весьма трудозатратной процедурой, причем с учетом сложности систем такие проверки требуют много времени. Поэтому для создания алгоритмов оценивания и прогнозирования характеристик надежности системы имеет смысл применять вероятностно-статистический подход.

Предполагая, что надежность системы между модификациями остается постоянной, рассмотрим следующую рекуррентную модель роста надежности системы [1]:

$$\pi_{j+1} = \eta_{j+1}\pi_j + \theta_{j+1}(1 - \pi_j).$$

В этой модели  $\{(\theta_j, \eta_j)\}$ ,  $j \geq 1$ , — последовательность независимых одинаково распределенных двумерных случайных векторов таких, что  $0 < \eta_1 < 1$ ;  $0 < \theta_1 < 1$  почти наверное. Начальная надежность  $\pi_0$  считается заданной, случайные величины  $\eta_j$  и  $\theta_j$  (будем называть их параметрами «дефективности» и «эффективности» соответственно) описывают возможное уменьшение и повышение надежности.

Обозначим  $\lambda = 1 - E\theta_j$ ,  $\mu = E\eta_j$ . Назовем величину  $\rho = \lambda/\mu$  индексом баланса. В терминах индекса баланса можно представить различные характеристики исследуемой системы. Например, можно показать [1], что при условии  $\lambda + \mu \neq 1$  предельная надежность  $\pi$ , характеризующая асимптотическое значение надежности системы в рамках рекуррентной модели, задаваемой набором  $\{(\theta_j, \eta_j)\}$ , представима в виде:

$$\pi = \lim_{j \rightarrow \infty} E\pi_j = \frac{\mu}{\lambda + \mu} = \frac{1}{1 + \rho}.$$

В рамках байесовского подхода в постановке задач теории надежности [2, 3] основные параметры системы  $\lambda$  и  $\mu$  предполагаются случайными (с известными априорными распределениями), а наиболее естественной и удобной для изучения характеристикой является зависящее от распределения индекса баланса усредненное значение предельной надежности:

$$\pi_{\text{сред}} = E\pi = E\frac{1}{1 + \rho}.$$

Так как случайные величины  $\eta_1$  и  $\theta_1$  удовлетворяют ограничениям  $0 < \eta_1 < 1$ ,  $0 < \theta_1 < 1$ , средние значения  $\lambda$  и  $\mu$  величин  $1 - E\theta_j$  и  $E\eta_j$  соответственно также находятся на отрезке  $[0, 1]$ . Поэтому в качестве априорных распределений параметров  $\lambda$  и  $\mu$  следует выбирать только распределения, сосредоточенные на  $[0, 1]$ .

В работах [2, 4–6] рассматривались априорные равномерные, параболические и бета-распределения. Также было предложено [7, 8] исследовать в качестве априорных плотности, имеющие вид полинома. Данная работа обобщает и расширяет полученные ранее результаты.

## 2 Основные результаты

Рассмотрим случайную величину  $\xi$  с распределением, сосредоточенным на отрезке  $[a_\xi, b_\xi]$ , и плотностью, которую можно представить в виде полинома:

$$f_\xi(x) = \sum_{i=0}^{n_\xi} c_{\xi,i} x^i, \quad 0 < a_\xi < x < b_\xi. \quad (1)$$

К распределениям с полиномиальными плотностями относятся, например, равномерное распределение

$$n_\xi = 0, \quad c_{\xi,0} = (b_\xi - a_\xi)^{-1} \quad (2)$$

и параболическое распределение

$$n_\xi = 2, \quad c_{\xi,0} = -\frac{6a_\xi b_\xi}{(b_\xi - a_\xi)^3}, \quad c_{\xi,1} = \frac{6(a_\xi + b_\xi)}{(b_\xi - a_\xi)^3}, \quad c_{\xi,2} = -\frac{6}{(b_\xi - a_\xi)^3}. \quad (3)$$

Обозначим неполную бета-функцию через

$$B_x(p, q) = \int_0^x t^{p-1} (1-t)^{q-1} dt, \quad p > 0, \quad q > 0.$$

Для удобства записи будем обозначать бета-функцию через  $B_1(p, q)$ .

Рассмотрим случайную величину  $\eta$ , имеющую бета-распределение с параметрами  $\alpha > 0, \beta > 0$  и плотностью

$$f_\eta(x) = \frac{x^{\alpha-1} (1-x)^{\beta-1}}{B_1(\alpha, \beta)}, \quad x \in (0, 1). \quad (4)$$

Легко видеть, что справедливо следующее утверждение.

**Лемма 1.** Для случайных величины  $\xi$  и  $\eta$  с плотностями (1) и (4) для  $z \in \mathbb{R}$  выполняются соотношения:

$$\begin{aligned} \mathbb{E}\xi^z &= \sum_{i=0}^{n_\xi} c_{\xi,i} \left[ \mathbf{1}(i \neq -z-1) \frac{b_\xi^{i+z+1} - a_\xi^{i+z+1}}{i+z+1} + \mathbf{1}(i = -z-1) \ln \frac{b_\xi}{a_\xi} \right]; \\ \mathbb{E}\eta^z &= \frac{B_1(\alpha+z, \beta)}{B_1(\alpha, \beta)}, \quad z > -\alpha. \end{aligned}$$

**Теорема 1.** Пусть средний параметр «эффективности»  $\lambda$  имеет плотность полиномиального вида на отрезке  $[a_\lambda, b_\lambda]$ ,  $0 < a_\lambda < b_\lambda$ , а средний параметр

«дефективности»  $\mu$  имеет бета-распределение с параметрами  $k > 0$ ,  $l > 0$ , причем  $\lambda$  и  $\mu$  независимы. Тогда индекс баланса  $\rho = \lambda/\mu$  имеет плотность

$$f_\rho(x) = \sum_{i=0}^{n_\lambda} \frac{c_{\lambda,i} x^i}{B_1(k,l)} [B_{\min\{b_\lambda/x, 1\}}(k+i+1, l) - B_{a_\lambda/x}(k+i+1, l)] ,$$

$$x \geq a_\lambda , \quad (5)$$

и моменты порядка  $z < k$  вида

$$\mathbb{E}\rho^z = \frac{B_1(k-z, l)}{B_1(k, l)} \sum_{i=0}^{n_\xi} \frac{c_{\lambda,i} (b_\lambda^{z+i+1} - a_\lambda^{z+i+1})}{z+i+1} . \quad (6)$$

**Доказательство.** Поскольку

$$f_\rho(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} y f_\lambda(xy) f_\mu(y) dy ,$$

при  $a_\lambda \leq x \leq b_\lambda$

$$f_\rho(x) = \int_{a_\lambda/x}^1 \sum_{i=0}^{n_\lambda} \frac{c_{\lambda,i} x^i}{B_1(k,l)} y^{k+i} (1-y)^{l-1} dy =$$

$$= \sum_{i=0}^{n_\lambda} \frac{c_{\lambda,i} x^i}{B_1(k,l)} \left[ \int_0^1 y^{k+i} (1-y)^{l-1} dy - \int_0^{a_\lambda/x} y^{k+i} (1-y)^{l-1} dy \right] ,$$

а при  $x > b_\lambda$

$$f_\rho(x) = \sum_{i=0}^{n_\lambda} \frac{c_{\lambda,i} x^i}{B_1(k,l)} \int_{a_\lambda/x}^{b_\lambda/x} y^{k+i} (1-y)^{l-1} dy ,$$

откуда следует (5).

Для нахождения моментов  $\rho$  достаточно воспользоваться леммой 1 и независимостью  $\lambda$  и  $\mu$ . Теорема доказана.

Аналогично теореме 1 получаем утверждение для симметричного случая априорных распределений параметров «эффективности»/«дефективности».

**Теорема 2.** Пусть средний параметр «эффективности»  $\lambda$  имеет бета-распределение с параметрами  $t > 0$  и  $n > 0$ , а средний параметр «дефективности»  $\mu$  имеет плотность полиномиального вида на отрезке  $[a_\mu, b_\mu]$ ,  $0 < a_\mu < b_\mu$ , причем  $\lambda$  и  $\mu$  независимы. Тогда индекс баланса  $\rho = \lambda/\mu$  имеет плотность

$$f_\rho(x) = \sum_{i=0}^{n_\mu} \frac{c_{\mu,i} x^{-i-2}}{B_1(m,n)} [B_{\min\{b_\mu x, 1\}}(m+i+1, n) - B_{a_\mu x}(m+i+1, n)] ,$$

$$0 < x \leq \frac{1}{a_\mu} , \quad (7)$$

и моменты порядка  $z$  вида

$$\mathbb{E}\rho^z = \frac{B_1(m+z, n)}{B_1(m, n)} \sum_{i=0}^{n_\mu} c_{\mu,i} \left[ \mathbf{1}(i \neq z-1) \frac{b_\mu^{i-z+1} - a_\mu^{i-z+1}}{i-z+1} + \right.$$

$$\left. + \mathbf{1}(i = z-1) \ln \frac{b_\mu}{a_\mu} \right] . \quad (8)$$

**Следствие 1.** Пусть средний параметр «эффективности»  $\lambda$  имеет равномерное или параболическое распределение на отрезке  $[a_\lambda, b_\lambda]$ ,  $0 < a_\lambda < b_\lambda$ , а средний параметр «дефективности»  $\mu$  имеет бета-распределение с параметрами  $k > 0$  и  $l > 0$ , причем  $\lambda$  и  $\mu$  независимы. Тогда индекс баланса  $\rho$  имеет плотность (5) и моменты (6), где константы  $n_\lambda$  и  $c_{\lambda,i}$  определяются соответственно соотношением (2) или (3).

**Следствие 2.** Пусть средний параметр «эффективности»  $\lambda$  имеет бета-распределение с параметрами  $m > 0$  и  $n > 0$ , а средний параметр «дефективности»  $\mu$  имеет равномерное или параболическое распределение на отрезке  $[a_\mu, b_\mu]$ ,  $0 < a_\mu < b_\mu$ , причем  $\lambda$  и  $\mu$  независимы. Тогда индекс баланса  $\rho$  имеет плотность (7) и моменты (8), где константы  $n_\mu$  и  $c_{\mu,i}$  определяются соответственно соотношением (2) или (3).

**Замечание 1.** Результаты теорем 1 и 2 можно переформулировать в терминах гипергеометрической функции Гаусса

$$G(\alpha, \beta; \gamma; x) = \sum_{i=0}^{\infty} \frac{(\alpha)_i (\beta)_i}{(\gamma)_i} \frac{x^i}{i!},$$

где

$$(\alpha)_i = \alpha(\alpha+1)\cdots(\alpha+i-1), \quad (\alpha)_0 = 1,$$

используя соотношение

$$B_x(p, q) = \frac{x^p}{p} G(p, 1-q; p+1; x).$$

Такое представление результатов может быть полезно, в частности, для вычисления плотности индекса баланса в заданной точке.

**Замечание 2.** Результаты теорем 1 и 2 могут быть использованы для вычисления различных характеристик байесовских моделей надежности, например средней предельной надежности системы.

## Литература

1. Королев В. Ю., Соколов И. А. Основы математической теории надежности модифицируемых систем. — М.: ИПИ РАН, 2006. 102 с.
2. Кудрявцев А. А., Соколов И. А., Шоргин С. Я. Байесовская рекуррентная модель роста надежности: равномерное распределение параметров // Информатика и её применения, 2013. Т. 7. Вып. 2. С. 55–59.
3. Кудрявцев А. А., Шоргин С. Я. Байесовские модели в теории массового обслуживания и надежности. — М.: ФИЦ ИУ РАН, 2015. 76 с.
4. Жаворонкова Ю. В., Кудрявцев А. А., Шоргин С. Я. Байесовская рекуррентная модель роста надежности: бета-распределение параметров // Информатика и её применения, 2014. Т. 8. Вып. 2. С. 48–54.
5. Жаворонкова Ю. В., Кудрявцев А. А., Шоргин С. Я. Байесовская рекуррентная модель роста надежности: бета-равномерное распределение параметров // Информатика и её применения, 2015. Т. 9. Вып. 1. С. 98–105.
6. Кудрявцев А. А., Палионная С. И. Байесовская рекуррентная модель роста надежности: параболическое распределение параметров // Информатика и её применения, 2016. Т. 10. Вып. 2. С. 80–83.
7. Кудрявцев А. А. Байесовские модели массового обслуживания и надежности: априорные распределения с компактным носителем // Информатика и её применения, 2016. Т. 10. Вып. 1. С. 67–71.
8. Кудрявцев А. А. Зависимые от коэффициента баланса характеристики в байесовских моделях с компактным носителем априорных распределений // Информатика и её применения, 2016. Т. 10. Вып. 3. С. 77–80.

Поступила в редакцию 29.06.18

---

## BETA-POLYNOMIAL *A PRIORI* DENSITIES IN BAYESIAN RELIABILITY MODELS

**A. A. Kudryavtsev<sup>1</sup>, S. I. Palionnaia<sup>1</sup>, and S. Ya. Shorgin<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Faculty of Computational Mathematics and Cybernetics, M. V. Lomonosov Moscow State University, 1-52 Leninskiye Gory, GSP-1, Moscow 119991, Russian Federation

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

**Abstract:** The Bayesian approach to constructing models of the reliability theory is considered. Within this approach, the model is considered to be incomplete in a certain sense — it is assumed that the key parameters of the system are random variables with known *a priori* distributions. At some time points, the

modifications are introduced to the system to improve reliability; however, each modification may either increase or reduce the reliability of the system. Thus, system's reliability characteristics depend on the ratio of the modification means' parameters of "efficiency" to the parameters of "defectiveness." Such relation can be called the "system's balance index." In this paper, the case of beta-polynomial *a priori* distributions is considered, where one of the parameters of the system has an *a priori* beta distribution and the density of the other parameter has the form of a polynomial. For various combinations of given *a priori* distributions, the formulas for calculating the probabilistic characteristics of the balance index are provided.

**Keywords:** Bayesian approach; modifiable information systems; reliability theory; polynomial densities; beta distribution; balance index

**DOI:** 10.14357/08696527180304

## Acknowledgments

The work was partly supported by the Russian Foundation for Basic Research (project 17-07-00577).

## References

1. Korolev, V. Yu., and I. A. Sokolov. 2006. *Osnovy matematicheskoy teorii nadezhnosti modifitsiruemikh sistem* [Fundamentals of mathematical theory of modified systems reliability]. Moscow: IPI RAN. 102 p.
2. Kudryavtsev, A. A., I. A. Sokolov, and S. Ya. Shorgin. 2013. Bayesovskaya rekurrentnaya model' rosta nadezhnosti: ravnomerne raspredelenie parametrov [Bayesian recurrent model of reliability growth: Uniform distribution of parameters]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 7(2):55–59.
3. Kudryavtsev, A. A., and S. Ya. Shorgin. 2015. *Bayesovskie modeli v teorii massovogo obsluzhivaniya i nadezhnosti* [Bayesian models in mass service and reliability theories]. Moscow: FIC IU RAN. 76 p.
4. Zhavoronkova, Iu. V., A. A. Kudryavtsev, and S. Ya. Shorgin. 2014. Bayesovskaya rekurrentnaya model' rosta nadezhnosti: beta-raspredelenie parametrov [Bayesian recurrent model of reliability growth: Beta-distribution of parameters]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 8(2):48–54.
5. Zhavoronkova, Iu. V., A. A. Kudryavtsev, and S. Ya. Shorgin. 2015. Bayesovskaya rekurrentnaya model' rosta nadezhnosti: beta-ravnomerne raspredelenie parametrov [Bayesian recurrent model of reliability growth: Beta-uniform distribution of parameters]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 9(1):98–105.
6. Kudryavtsev, A. A., and S. I. Palionnaia. 2016. Bayesovskaya rekurrentnaya model' rosta nadezhnosti: parabolicheskoe raspredelenie parametrov [Bayesian recurrent model of reliability growth: Parabolic distribution of parameters]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 10(2):80–83.
7. Kudryavtsev, A. A. 2016. Bayesovskie modeli massovogo obsluzhivaniya i nadezhnosti: apriornye raspredeleniya s kompaktnym nositelem [Bayesian queueing and reliability

- models: *A priori* distributions with compact support]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 10(1):67–71.
8. Kudryavtsev, A. A. 2016. Zavisimye ot koeffitsienta balansa kharakteristiki v bayesovskikh modelyakh s kompaktnym nositelem apriornykh raspredeleniy [Characteristics dependent on the balance coefficient in Bayesian models with compact support of *a priori* distributions]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 10(3):77–80.

Received June 29, 2018

## Contributors

**Kudryavtsev Alexey A.** (b. 1978) — Candidate of Science (PhD) in physics and mathematics, associate professor, Department of Mathematical Statistics, Faculty of Computational Mathematics and Cybernetics, M. V. Lomonosov Moscow State University, 1-52 Leninskiye Gory, GSP-1, Moscow 119991, Russian Federation; nubigena@mail.ru

**Palionnaia Sofia I.** (b. 1995) — student, Faculty of Computational Mathematics and Cybernetics, M. V. Lomonosov Moscow State University, 1-52 Leninskiye Gory, GSP-1, Moscow 119991, Russian Federation; sofiapalionnaya@gmail.com

**Shorgin Sergey Ya.** (b. 1952) — Doctor of Science in physics and mathematics, professor, principal scientist, Institute of Informatics Problems, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences (FRC CRC RAS), 44-2 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation; sshorgin@ipiran.ru

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ МОМЕНТОВ КОНЕЧНЫХ НОРМАЛЬНЫХ СМЕСЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ПРЯМОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ\*

*A. K. Горшенин<sup>1</sup>, B. Ю. Кузьмин<sup>2</sup>*

**Аннотация:** Моделирование и анализ нестационарных потоков данных в реальных системах различного рода может эффективно проводиться с помощью конечных нормальных сдвиг-масштабных смесей. Проведена апробация ранее развитой авторами методологии прогнозирования с помощью нейронных сетей на основе замены значений исходных непрерывных рядов дискретными величинами на примере изменяющихся во времени моментов смешанной вероятностной модели. Продемонстрирована точность более 80% для большинства рассмотренных случаев при краткосрочном прогнозировании с помощью нейронной сети прямого распространения, работа с которой реализована средствами библиотеки глубокого обучения *Keras*, фреймворка *TensorFlow* и языка программирования *Python*.

**Ключевые слова:** конечные смеси нормальных распределений; моменты; нейронные сети; прогнозирование; глубокое обучение; интеллектуальный анализ данных

**DOI:** 10.14357/08696527180305

### 1 Введение

Моделирование и анализ нестационарных потоков данных в реальных системах различного рода может эффективно проводиться с помощью аппарата смешанных вероятностных моделей, прежде всего конечных нормальных сдвиг-масштабных смесей. Оценивание неизвестных параметров модели может быть основано на методе скользящего разделения смесей (CPC-метод) [1], расширяющего область применения такого популярного метода интеллектуального анализа данных, как EM (expectation-maximization) алгоритм [2–4]. Основная идея CPC-метода заключается в специальном разбиении исходной выборки на подвыборки (окна) и дальнейшем анализе поведения данных на каждом окне. Это позволяет отслеживать эволюцию во времени тонкой структуры изучаемых процессов, например в финансах [5] или физике турбулентной плазмы [6].

\*Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (проект 16-07-00736) и Стипендии Президента Российской Федерации молодым ученым и аспирантам (СП-538.2018.5).

<sup>1</sup>Институт проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук; факультет вычислительной математики и кибернетики Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, agorshenin@frccsc.ru

<sup>2</sup>ООО «Вай2Гео», shadesilent@yandex.ru

Параметры конечной смеси могут изменяться с течением времени как с точки зрения величин отдельных компонент, так и общего числа слагаемых, поэтому прогнозирование подобного класса распределений представляет собой нетривиальную задачу. В статьях [7, 8] были реализованы различные подходы к построению прогнозов на основе специального преобразования исходных данных и формирования паттернов. В упомянутых работах рассматривались гидрологические параметры (осадки), для которых характерны сезонность, влияние географического расположения измерительных станций и т. п. В данной статье предложена реализация концептуально близкого подхода, однако в качестве тестовых данных использованы наблюдения совершенно иной физической природы, полученные в экспериментах с турбулентной плазмой. Отличительной особенностью работы является построение прогнозов не для исходных рядов, а для эволюционирующих во времени моментов вероятностной модели, полученной в результате проведения упомянутого выше интеллектуального анализа данных.

## 2 Построение данных для анализа с помощью нейронных сетей

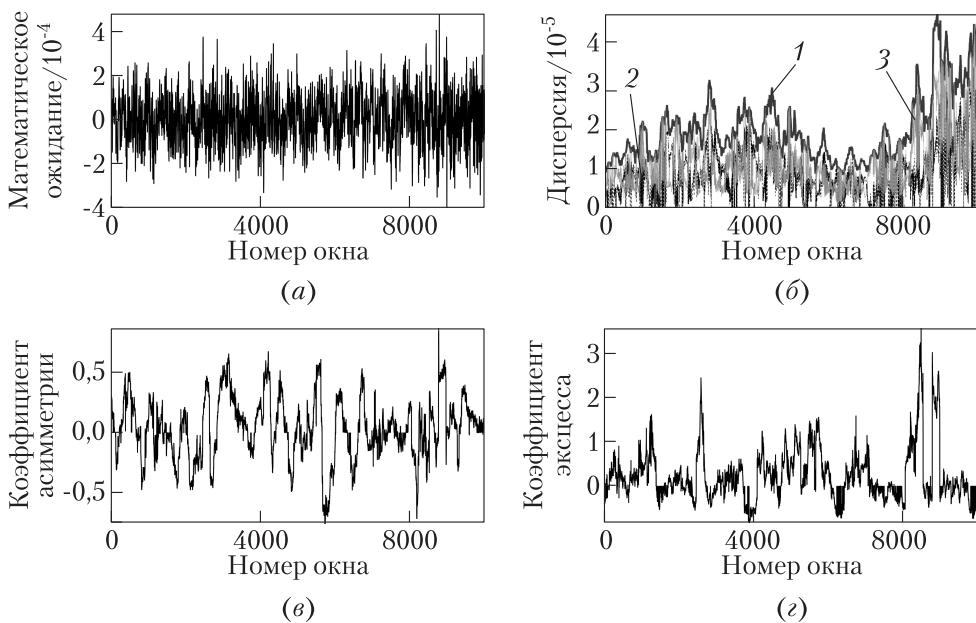
Пусть случайная величина  $Z_n$  имеет функцию распределения  $F_Z(x, n)$ , представимую в виде конечной сдвиг-масштабной смеси нормальных законов, а именно:

$$F_Z(x, n) = \sum_{i=1}^{k(n)} \frac{p_i(n)}{\sigma_i(n)\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp\left\{-\frac{(y - a_i(n))^2}{2\sigma_i^2(n)}\right\} dy. \quad (1)$$

Здесь

$$\begin{aligned} \forall x \in \mathbb{R}, \quad a_i(n) \in \mathbb{R}, \quad \sigma_i(n) > 0, \quad i = 1, \dots, k(n), \\ \sum_{i=1}^{k(n)} p_i(n) = 1, \quad p_i(n) \geq 0, \quad n = 1, 2, \dots \end{aligned}$$

Параметр  $n$  здесь соответствует времени (номеру окна в СРС-методе) и подчеркивает тот факт, что параметры распределения эволюционируют во времени (при этом базовое семейство остается прежним). Также может изменяться и величина параметра  $k(n)$ , описывающего число компонент в смеси вида (1). Это обстоятельство затрудняет построение прогнозов, так как появление и исчезновение компонент зачастую объясняется эволюцией набора факторов, часть из которых может возникнуть с течением времени, поэтому представляется разумным строить прогнозы для «интегральных» характеристик. В качестве таких величин можно использовать моменты различных порядков, а также производные от них коэффициенты асимметрии и эксцесса. Явные выражения для математического



**Рис. 1** Эволюция во времени моментов смеси конечных нормальных распределений для данных, полученных в рамках физического эксперимента: (a) математическое ожидание; (б) дисперсия (1 — дисперсия смеси; 2 — динамическая компонента; 3 — диффузионная компонента); (в) коэффициент асимметрии; (г) коэффициент эксцесса

ожидания, дисперсии, упомянутых выше коэффициентов для конечных смесей нормальных распределений, зависящие от параметров компонент, приведены, например, в статье [9].

На рис. 1 приведен пример результатов обработки тестовых данных, полученных в процессе экспериментов с турбулентной плазмой, с помощью СРС-метода.

На графиках продемонстрирована эволюция во времени (в зависимости от положения скользящего окна) математического ожидания, дисперсии и коэффициентов асимметрии и эксцесса для 10 000 шагов вычислительной процедуры, соответствующих в реальном времени 2 мс эксперимента. В следующих разделах полученные в результате подобной интеллектуальной обработки временные ряды будут использованы как объект для анализа и прогнозирования с помощью нейронных сетей прямого распространения.

### 3 Архитектура нейронной сети

В данном разделе рассмотрим архитектуру нейронной сети, которая будет использована для решения задачи прогнозирования моментов (рис. 2).

На рис. 2 представлена многослойная сеть прямого распространения, состоящая из входного, скрытого и выходного слоев. В качестве функции активации нейронов входного и скрытого слоев использована функция `rectifier`, функциональная зависимость для которой выражается формулой  $f(x) = \max(0, x)$ . Нейроны с такой функцией активации называются ReLU (*Rectified Linear Unit*) и весьма часто используются в архитектурах глубоких нейросетей с несколькими скрытыми слоями, так как позволяют значительно повысить скорость обучения [10], в частности по сравнению с сигмоидной функцией активации вида  $f(x) = (1 + e^{-x})^{-1}$ . Для выходного слоя используется традиционная для задач классификации функция `softmax`, которая представляет  $j$ -й выход в виде  $y_j = e^{x_j} / (\sum_i e^{x_i})^{-1}$ . При этом выход нейронной сети состоит из  $M = K^T$  нейронов, где  $K$  — количество интервалов разбиения данных;  $T$  — длительность прогноза, измеренная в шагах СРС-метода.

Число нейронов в скрытом слое выбиралось таким образом, чтобы получить достаточно точную (в смысле прогнозов) модель, но при этом избежать эффекта переобучения (*overfitting*). В данной архитектуре число нейронов определяется выражением  $0,25N + 0,75M$ , где  $N$  соответствует числу входных нейронов. Дополнительно для устранения возможности переобучения во входном и скрытом слое применяется  $L^2$ -регуляризация.

Полученный массив значений от нейронной сети переводится в унитарный код длины  $M$  (набор, состоящий из  $M - 1$  нулей и единственной единицы, расположенной в позиции с индексом, совпадающим с номером диапазона). Это позволяет отнести полученный прогноз к одному из заранее определенных классов, соответствующих диапазонам значений анализируемого ряда. Для получения таких интервалов используется методология на основе выборочных квантилей:

- выбираются все уникальные значения из выборки;
- полученный ряд длины  $L$  сортируется по возрастанию;
- в диапазон с номером  $i$  попадают значения ряда с номерами от  $\lfloor (i - 1)/(K - 1)L + 1 \rfloor$  до  $\lfloor i/(K - 1)L \rfloor$ , где  $\lfloor x \rfloor$  обозначает ближайшее целое число к  $x$  снизу.



**Рис. 2** Архитектура нейронной сети

Ошибка считается несовпадение результата работы нейросети с номером диапазона.

## **4 Программная реализация**

Для реализации и обучения нейронных сетей при проведении данных исследований использованы библиотека глубокого обучения **Keras**, фреймворк **TensorFlow** и язык программирования **Python**. Создан набор программных инструментов для прогнозирования временных рядов с помощью нейронных сетей и методов глубокого обучения на основе паттернов. В частности:

- реализовано обучение нейронной сети прямого распространения с функцией активации **ReLU**;
- поддерживается пакетная обработка данных: набор заданий и конфигурационных переменных считывается из файла, после чего производится последовательная обработка и сохранение результатов;
- настройка оптимизатора, функции потерь и целевых метрик проводится без изменения программного кода за счет задания в файле конфигурации соответствующих параметров;
- для ускорения процесса обучения нейросетей на реальных данных используются вычисления с привлечением графических процессоров с поддержкой технологии **NVIDIA CUDA** (*Compute Unified Device Architecture*);
- архитектура нейронной сети, эволюция ошибки и точности обучения во времени наблюдения сохраняются в графическом (**PNG**) и текстовом (**CSV**) форматах.

## **5 Построение прогнозов с помощью паттернов**

Обучение нейронной сети проводилось для прогнозирования поведения некоторых моментов смеси распределений. Были построены предсказания для математического ожидания, дисперсии, а также коэффициентов асимметрии и эксцесса. При анализе каждый ряд разбивался на 5 интервалов согласно правилам, описанным в конце разд. 3, осуществлялось соответствующее преобразование данных (см. также статью [8]). На вход нейронной сети подавался входной вектор из 100 «новых» наблюдений, на выходе ожидалось предсказание на 1 или 3 последующих шага. Наблюдения в каждом анализируемом ряде случайным образом разделялись на тренировочную (т. е. используемую для построения модели в процессе обучения) и тестовую выборки в соотношении 70% к 30%. В качестве метода оптимизации использован **Adam** [11], качество обучения нейросети определялось на основе значения величины кросс-энтропии. Максимальное число эпох обучения было задано равным 500, при этом в большинстве

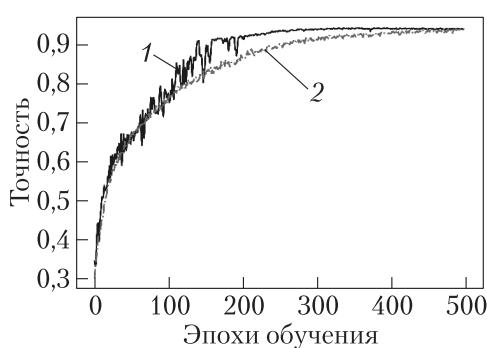
## Точность обучения и прогнозирования нейронной сети (500 эпох обучения)

Момент смеси	Длительность прогноза (число шагов)	Точность обучения	Точность (тестовые данные)
Математическое ожидание	1	96,8%	97,8%
	3	96,5%	96,7%
Дисперсия	1	93,9%	93,3%
	3	87,6%	87,4%
Коэффициент асимметрии	1	91,5%	91,4%
	3	84%	83%
Коэффициент эксцесса	1	85%	82%
	3	73%	70%

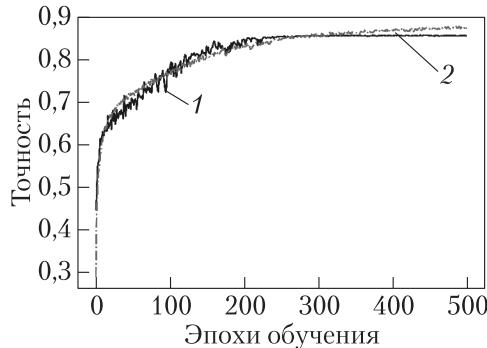
случаев модель достигала относительно стабильной величины точности обучения за меньший временной период.

В рамках данного подхода предсказание нейросети считается правильным в том случае, если оно в точности совпадает со значениями соответствующих преобразованных наблюдений, в противном случае — признается ошибочным. Полученные результаты работы нейронной сети для различных комбинаций длительностей прогноза продемонстрированы в таблице.

На рис. 3 продемонстрированы созданные средствами языка программирования Python графики эволюции точности обучения и качества прогнозирования нейросети на 1 шаг полученной моделью для дисперсии смеси. Для данного случая в соответствующие интервалы при разбиении попали 1902, 2109, 2086, 2036 и 1765 наблюдений соответственно. При дальнейшем увеличении числа



**Рис. 3** Пример точности обучения для дисперсии смеси, прогноз на 1 шаг: 1 — тестовая выборка; 2 — тренировочная выборка



**Рис. 4** Пример точности обучения для коэффициента асимметрии смеси, прогноз на 3 шага: 1 — тестовая выборка; 2 — тренировочная выборка

эпох значительного роста точности тренировочной выборки не наблюдается. Получены значения 93,9% для точности обучения и 93,3% для тестовых данных (см. таблицу).

На рис. 4 приведены графики эволюции точности обучения и качества прогнозирования нейросети на 3 шага для коэффициента асимметрии смеси. Для данного случая в соответствующие интервалы при разбиении попали 1989, 1950, 2034, 2030 и 1895 наблюдений соответственно. К 500 эпохам обучения точность выходит на «плато» и дальнейшего роста не происходит. Получены значения 84% для точности обучения и 83% для тестовых данных (см. таблицу).

Нейронная сеть хорошо предсказывает поведение первого, второго и третьего моментов на один шаг, наблюдается постепенное падение точности с увеличением номера момента. Точность предсказания на три шага резко падает от первого момента ко второму, что может быть связано с большей волатильностью данных в рядах моментов с большим номером. Применение  $L^2$ -регуляризации помогло избежать переобучения при анализе первых трех моментов, в некоторой мере соответствующий негативный эффект проявился при обработке коэффициента эксцесса.

## **6 Заключение**

В работе проведена апробация ранее развитой авторами методологии прогнозирования с помощью нейронных сетей для некоторых моментных характеристик конечных нормальных смесей на основе замены значений исходных непрерывных рядов дискретными величинами. Для всех моментов использовалась единая архитектура нейронной сети. Продемонстрированная точность превышает 80% для большинства изученных случаев при краткосрочном прогнозировании на 1 и 3 шага, при этом для ее достижения требовалось не более 500 (в ряде случаев — 300) эпох обучения достаточно простой нейронной сети прямого распространения. Дальнейшие исследования в этой области могут быть ориентированы на общее повышение точности расчетов, на построение более длительных прогнозов, а также увеличение числа интервалов разбиения для более корректной аппроксимации и предсказания непрерывных данных, в том числе за счет возможных модификаций используемой архитектуры.

Авторы выражают признательность профессору Г. М. Батанову за предоставленные результаты физических экспериментов.

## **Литература**

1. Королев В. Ю. Вероятностно-статистические методы декомпозиции волатильности хаотических процессов. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 2011. 512 с.
2. Wu X. D., Kumar V., Quinlan J. R., et al. Top 10 algorithms in data mining // Knowl. Inf. Syst., 2008. Vol. 14. Iss. 1. P. 1–37.

3. Yang M.-Sh., Lai Ch.-Yo, Lin C.-Y. A robust EM clustering algorithm for Gaussian mixture models // Pattern Recogn., 2012. Vol. 45. Iss. 11. P. 3950–3961.
4. Lee G., Scott C. EM algorithms for multivariate Gaussian mixture models with truncated and censored data // Comput. Stat. Data An., 2012. Vol. 56. Iss. 9. P. 2816–2829.
5. Горшенин А.К., Королев В.Ю., Турсунбаев А.М. Медианные модификации ЕМ- и SEM-алгоритмов для разделения смесей вероятностных распределений и их применение к декомпозиции волатильности финансовых временных рядов // Информатика и её применения, 2008. Т. 2. Вып. 4. С. 12–47.
6. Батанов Г.М., Горшенин А.К., Королев В.Ю., Малахов Д.В., Скворцова Н.Н. Эволюция вероятностных характеристик низкочастотной турбулентности плазмы в микроволновом поле // Математическое моделирование, 2011. Т. 23. № 5. С. 35–55.
7. Горшенин А.К. Анализ вероятностно-статистических характеристик осадков на основе паттернов // Информатика и её применения, 2017. Т. 11. Вып. 4. С. 38–46.
8. Gorshenin A.K., Kuzmin V.Yu. Neural network forecasting of precipitation volumes using patterns // Pattern Recogn. Image Anal., 2018. Vol. 28. No. 3. P. 450–461.
9. Горшенин А.К. Концепция онлайн-комплекса для стохастического моделирования реальных процессов // Информатика и её применения, 2016. Т. 10. Вып. 1. С. 72–81.
10. Glorot X., Bordes A., Bengio Y. Deep sparse rectifier neural networks // J. Mach. Learn. Res., 2011. Vol. 15. P. 315–323.
11. Kingma D., Ba J. Adam: A method for stochastic optimization // arXiv:1412.6980, 2014.

Поступила в редакцию 13.08.18

---

## FORECASTING MOMENTS OF FINITE NORMAL MIXTURES USING FEEDFORWARD NEURAL NETWORKS

**A. K. Gorshenin<sup>1,2</sup> and V. Yu. Kuzmin<sup>3</sup>**

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

<sup>2</sup>Faculty of Computational Mathematics and Cybernetics, M. V. Lomonosov Moscow State University, GSP-1, Leninskie Gory, Moscow 119991, Russian Federation

<sup>3</sup>“Wi2Geo LLC”, 3-1 Mira Ave., Moscow 129090, Russian Federation

**Abstract:** Modeling and analysis of nonstationary data flows in real systems of various types can be effectively performed using finite local-scale normal mixtures. Approbation of the prediction methodology developed by the authors is carried out on the example of time-varied moments of the mixed probability

model. Within this approach, values of the initial continuous time-series are replaced with the discrete ones and then modified samples are analyzed with a neural network. For short-term forecasting, the accuracy of more than 80% is demonstrated. Feedforward neural network is implemented using the **Keras** deep learning library, the **TensorFlow** framework, and the **Python** programming language.

**Keywords:** finite normal mixtures; moments; artificial neural network; forecasting; deep learning; data mining

**DOI:** 10.14357/08696527180305

## Acknowledgments

The research is partially supported by the Russian Foundation for Basic Research (project 16-07-00736) and the RF Presidential scholarship program (project No. 538.2018.5).

## References

1. Korolev, V. Yu. 2011. *Veroyatnostno-statisticheskie metody dekompozitsii volatil'nosti khaoticheskikh protsessov* [Probabilistic and statistical methods of decomposition of volatility of chaotic processes]. Moscow: Moscow University Publs. 512 p.
2. Wu, X. D., V. Kumar, J. R. Quinlan, et al. 2008. Top 10 algorithms in data mining. *Knowl. Inf. Syst.* 14(1):1–37.
3. Yang, M.-Sh., Ch.-Yo Lai, and C.-Y. Lin. 2012. A robust EM clustering algorithm for Gaussian mixture models. *Pattern Recogn.* 45(11):3950–3961.
4. Lee, G., and C. Scott. 2012. EM algorithms for multivariate Gaussian mixture models with truncated and censored data. *Comput. Stat. Data An.* 56(9):2816–2829.
5. Gorshenin, A. K., V. Yu. Korolev, and A. M. Tursunbaev. 2008. Mediannye modifikatsii EM- i SEM-algoritmov dlya razdeleniya smesey veroyatnostnykh raspredeleniy i ikh primenie k dekompozitsii volatil'nosti finansovykh vremennykh ryadov [Median modifications of the EM and SEM algorithms for decomposing mixtures of probability distributions and their applications to the decomposition of volatility of financial time series]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 2(4):12–47.
6. Batanov, G. M., A. K. Gorshenin, V. Yu. Korolev, D. V. Malakhov, and N. N. Skvortsova. 2012. The evolution of probability characteristics of low-frequency plasma turbulence. *Math. Models Computer Simulations* 4(1):10–25.
7. Gorshenin, A. K. 2017. Analiz veroyatnostno-statisticheskikh kharakteristik osadkov na osnove patternov [Pattern-based analysis of probabilistic and statistical characteristics of precipitations]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 11(4):38–46.
8. Gorshenin, A. K., and V. Yu. Kuzmin. 2018. Neural network forecasting of precipitation volumes using patterns. *Pattern Recogn. Image Anal.* 28(3):450–461.
9. Gorshenin, A. K. 2016. Kontseptsiya onlayn-kompleksa dlya stokhasticheskogo modelirovaniya real'nykh protsessov [Concept of online service for stochastic modeling of real processes]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 10(1):72–81.

10. Glorot, X., A. Bordes, and Y. Bengio. 2011. Deep sparse rectifier neural networks. *J. Mach. Learn. Res.* 15:315–323.
11. Kingma, D., and J. Ba. 2014. Adam: A method for stochastic optimization. arXiv:1412.6980.

*Received August 13, 2018*

## Contributors

**Gorshenin Andrey K.** (b. 1986)— Candidate of Science (PhD) in physics and mathematics, associate professor, leading scientist, Institute of Informatics Problems, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilova Str., Moscow 119333, Russian Federation; leading scientist, Faculty of Computational Mathematics and Cybernetics, M. V. Lomonosov Moscow State University, GSP-1, Leninskie Gory, Moscow 119991, Russian Federation; agorshenin@frcsc.ru

**Kuzmin Victor Yu.** (b. 1986)— Head of Development, “Wi2Geo LLC”, 3-1 Mira Ave., Moscow 129090, Russian Federation; shadesilent@yandex.ru

## ОЦЕНКА ФОРМЫ ОТКЛИКА В СИГНАЛАХ МАГНИТОЭНЦЕФАЛОГРАММ С ШУМОМ В ВИДЕ КОНЕЧНОЙ НОРМАЛЬНОЙ СМЕСИ

*М. Б. Гончаренко<sup>1</sup>*

**Аннотация:** Статья посвящена методам оценки формы отклика (или паттерна активации), возникающего в сигналах испытуемого в ответ на внешний стимул во время проведения нейрофизиологического эксперимента. Особенностью математической модели является представление шума в виде конечной нормальной смеси. Данный подход лучше согласуется с экспериментальными данными. В рамках рассматриваемой модели проведен анализ различных оценок отклика и исследованы их статистические свойства. Автором предложено несколько новых оценок, использующих особенности распределения шума. Доказана более высокая эффективность новых оценок в терминах величины дисперсии по отношению к широко используемым в исследованиях оценкам методом моментов. Несмотря на то что акцент сделан на применении оценок к сигналам магнитоэнцефалограмм (МЭГ), рассматриваемые методы могут быть использованы в аналогичных приложениях для любых нейрофизиологических сигналов, а также в наиболее общей постановке — для оценки параметра сдвига конечной многомерной нормальной смеси.

**Ключевые слова:** магнитоэнцефалография; обработка сигналов; конечные нормальные смеси; точечные оценки; эффективные оценки; информация Фишера; оценка сдвига распределения

**DOI:** 10.14357/08696527180306

### 1 Введение

В современной нейронауке важное место занимают методы обработки результатов экспериментов. В случае энцефалографических данных особый интерес представляет задача оценки формы отклика, или паттерна активации, в сигналах испытуемого. Откликом называют зарегистрированный во время эксперимента физиологический ответ испытуемого на внешний стимул: визуальный, звуковой, тактильный или какой-либо другой. Этот довольно популярный у исследователей подход называют методом вызванных потенциалов. Во время эксперимента многократно подается стимул, разделяя итоговый сигнал на эпохи — участки, содержащие отклик на один стимул (подробнее о методах обработки подобных

---

<sup>1</sup>Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, факультет вычислительной математики и кибернетики, goncharenko.mir@yandex.ru

сигналов можно прочесть в [1]). Оценка отклика, полученная на данных всех эпох, используется для изучения физиологических процессов, поэтому важно не только получать такую оценку, но и знать ее свойства. В статье рассматриваются сигналы МЭГ с моделью шума в виде конечной нормальной смеси (всесторонний обзор применения МЭГ в нейрофизиологических исследованиях содержится в статье [2]). Проведен анализ широко используемой оценки усреднения сигнала по эпохам, доказана ее несмещеннность и состоятельность. Также предложены другие, более эффективные оценки, использующие особенности распределения шума.

## 2 Порождающая модель сигналов магнитоэнцефалограмм

Для начала рассмотрим внимательнее, что представляют собой сигналы МЭГ и что измеряют с помощью МЭГ-установки. Порождающая модель сигналов может быть представлена как

$$Y_t = L(J_t) + \mathcal{E}_t, \quad (1)$$

где  $Y_t$  — значение магнитной индукции, измеряемое МЭГ-сенсорами;  $L(\cdot)$  — оператор Био–Савара–Лапласа;  $J$  — неизвестная плотность тока источников;  $\mathcal{E}_t$  — шум.

Единицей активации во всех формализациях прямой и обратной задачи являются токовые диполи. Токовый диполь представляет собой абстрактную физическую модель активации  $5 \cdot 10^4$  нейронов на площади примерно  $30 \text{ мм}^2 \approx \approx 5,5 \cdot 5,5 \text{ мм}^2$  (более подробное описание токовых диполей можно найти в [2]).

Оператор Био–Савара–Лапласа для токового диполя имеет вид:

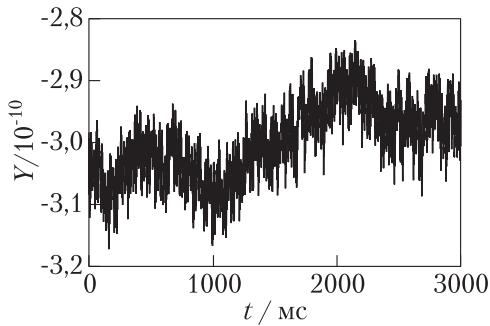
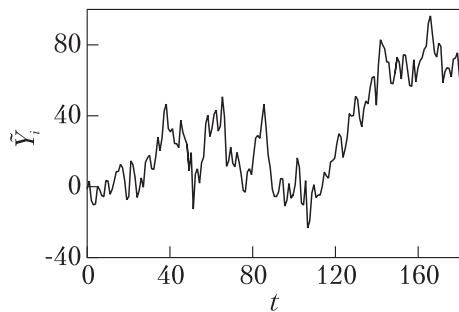
$$L_r = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{\left( [\vec{Q} \times \vec{r}_Q], \vec{e}_r \right)}{|\vec{r} - \vec{r}_Q|^3}.$$

Здесь  $\vec{r}$  — радиус-вектор точки в пространстве, где определяется значение индукции, наведенное диполем;  $\vec{r}_Q$  — радиус-вектор диполя;  $\vec{Q}$  — его дипольный момент;  $\mu_0$  — магнитная проницаемость среды;  $\vec{e}_r = \vec{r}/\|\vec{r}\|$  — единичный вектор.

Общую модель (1) можно упростить, используя квазистатическую аппроксимацию уравнений Максвелла и уравнения Пуассона:  $L(\cdot) \sim L$ , где  $L$  — линейный оператор (известный под названием lead-field, или gain matrix).

Условия, позволяющие сделать подобный переход:

- топология мозга не изменяется во время эксперимента;
- все потоки (поток крови и др.) стационарны (т. е. обладают одинаковыми характеристиками во время измерения);
- голова испытуемого не двигается, и не двигаются лицевые мышцы.

**Рис. 1** МЭГ-сигнал одной эпохи**Рис. 2** Усредненный отклик

В этом случае задача формулируется в линейной форме (Generalized linear model) как

$$Y = LJ + \mathcal{E}. \quad (2)$$

Здесь

$$Y \in \mathbb{R}^{N_s \times N_t}; \quad L \in \mathbb{R}^{N_s \times N_d}; \quad J \in \mathbb{R}^{N_d \times N_t}; \quad \mathcal{E} \in \mathbb{R}^{N_s \times N_t},$$

где  $N_s$ ,  $N_d$  и  $N_t$  — число сенсоров, возможных позиций диполей и временных отсчетов соответственно.

Подход (2) подразумевает фиксирование  $N_d$  позиций токовых диполей (или  $3N_d$  с учетом ориентации) и поиск интенсивности источников  $J$  в этих точках. Такая формализация задачи называется распределенной или «имаджинговой». Подробнее об обратной задаче МЭГ можно прочесть в [3], решения обратной задачи в замкнутом виде для сферической и эллиптической аппроксимации приведены в [4, 5].

Довольно часто исследовательский интерес представляет оценка формы отклика (паттерна активации) сигналов испытуемого на внешний стимул. На рис. 1 представлен МЭГ-сигнал одной эпохи, а на рис. 2 — усредненный отклик (проведено шкалирование амплитуд и передискретизация временных отсчетов, это обычная процедура при обработке сигналов, позволяющая нивелировать проблемы округления в конечной арифметике и сократить объем анализируемых данных). Данные взяты из эксперимента по распознаванию лиц [6].

В терминах модели (2) оценка формы отклика представляет собой поиск  $\hat{\Theta}$ , где  $\Theta = LJ$  на участке сигнала  $\bar{Y}$ , содержащем физиологическую реакцию пациента на поданный внешний стимул.

### 3 Различные оценки формы отклика

Для упрощения выкладок в дальнейшем анализе будет рассматриваться сигнал только одного сенсора, т. е. следующая порождающая модель:

$$Y = \theta + \varepsilon, \quad (3)$$

где

$$Y \in \mathbb{R}; \quad \theta \in \mathbb{R}; \quad \varepsilon \sim \sum_{i=1}^m \mathcal{N}(\mu_i, \sigma_i^2), \quad \mathbb{E} \varepsilon = \sum_{i=1}^m \alpha_i \mu_i = 0.$$

При дизайне эксперимента с использованием метода вызванных потенциалов осуществляется многократная подача внешнего стимула на протяжении всей записи. Участки сигнала, содержащие нейрофизиологический отклик испытуемого на один стимул, называются эпохами и обозначаются  $\tilde{Y}_i$ , где  $i = \overline{1, n}$  — порядковый номер эпохи.

#### 3.1 Оценка методом моментов

В подавляющем большинстве прикладных исследований, а также во многих программных пакетах для анализа нейрофизиологических сигналов, для нахождения формы отклика используется оценка усреднением:

$$\hat{\theta}_{\text{avg}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \tilde{Y}_i, \quad (4)$$

где  $\tilde{Y}_i$  — сигнал  $i$ -й эпохи. Дисперсия оценки (4) равна

$$\mathbb{D} \hat{\theta}_{\text{avg}} = \mathbb{D} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \tilde{Y}_i = \frac{1}{n^2} \mathbb{D} \sum_{i=1}^n \tilde{Y}_i = \frac{1}{n} \mathbb{D} \tilde{Y}_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^m \alpha_i \sigma_i.$$

**Теорема 1.** *Оценка (4) несмещенная.*

**Доказательство.** Вычислим смещение оценки  $\hat{\theta}_{\text{avg}}$ :

$$b(\hat{\theta}_{\text{avg}}) = \mathbb{E} \hat{\theta}_{\text{avg}} - \theta = \mathbb{E} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \tilde{Y}_i - \theta = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \mathbb{E} \tilde{Y}_i - \theta = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \theta - \theta = 0.$$

Теорема доказана. □

**Теорема 2.** *Оценка (4) состоятельна.*

**Доказательство.** Воспользуемся неравенством Чебышёва с учетом того, что  $\mathbb{E} \hat{\theta}_{\text{avg}} = \theta$  (по теореме 1):

$$\mathbb{P} \left( \left| \hat{\theta}_{\text{avg}} - \theta \right| > \varepsilon \right) \leq \frac{\mathbb{E} \left| \hat{\theta}_{\text{avg}} - \theta \right|}{\varepsilon} \leq \frac{\mathbb{D} \hat{\theta}_{\text{avg}}}{\varepsilon^2} \xrightarrow[n \rightarrow \infty]{} 0, \quad \forall \varepsilon > 0,$$

так как

$$\mathbb{D} \hat{\theta}_{\text{avg}} = \frac{1}{n^2} \mathbb{D} \sum_{i=1}^n \tilde{Y}_i = \frac{1}{n} \mathbb{D} \tilde{Y}_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^m \alpha_i \sigma_i^2 \xrightarrow[n \rightarrow \infty]{} 0.$$

Теорема доказана.  $\square$

**Теорема 3.** Оценка (4) асимптотически нормальна.

**Доказательство.** Это утверждение напрямую следует из теоремы, приведенной в [7], причем имеет место следующая сходимость:

$$\sqrt{n} \left( \theta - \hat{\theta}_{\text{avg}} \right) \xrightarrow{d} \xi \sim \mathcal{N} \left( 0, \mathbb{D}Y - (\mathbb{E}Y)^2 \right).$$

Теорема доказана.  $\square$

### 3.2 Оценка максимального правдоподобия

Оценки максимального правдоподобия занимают важное место в статистике и применяются во множестве прикладных задач. В широком спектре моделей они демонстрируют такие замечательные свойства, как асимптотическая эффективность и асимптотическая нормальность.

**Определение 1.** Оценкой максимального правдоподобия величины  $\theta$  по выборке  $Y$  называют оценку

$$\hat{\theta}_{\text{mle}} = \arg \max_{\theta} \mathcal{L}(Y; \theta),$$

где  $\mathcal{L}(Y; \theta)$  — функция правдоподобия выборки  $Y$ .

В модели (3) функция правдоподобия имеет вид:

$$\mathcal{L}(Y; \theta) = \prod_{j=1}^n \sum_{i=1}^m \left( \frac{\alpha_i}{\sqrt{2\pi}\sigma_i} e^{-(y_j - \mu_i - \theta)^2 / (2\sigma_i^2)} \right). \quad (5)$$

В теории вероятностей доказано, что для класса регулярных моделей оценка максимального правдоподобия является наиболее эффективной (т. е. обладает наименьшей возможной дисперсией, см. [7]).

**Определение 2.** Вероятностная модель называется регулярной, если плотность распределения  $p(x; \theta)$  удовлетворяет следующим условиям регулярности:

1.  $\Theta$  — открытый интервал на прямой (возможно, бесконечный), где  $\Theta$  — параметрическое множество всех возможных значений  $\theta$ .
2. Носитель распределения  $A = \{x : p(x; \theta) > 0\}$  не зависит от  $\theta$ .

3. Для  $\forall x \in A$  и  $\theta \in \Theta$  производная  $(\partial/\partial\theta)p(x; \theta)$  существует и конечна.
4. Для случайной величины  $U_1 = (\partial/\partial\theta)\ln p(X_1; \theta)$  при всех  $\theta \in \Theta$  справедливы тождество  $\mathbb{E} U_1 \equiv 0$  и неравенство  $0 < \mathbb{D} U_1 < \infty$ .

Согласно известной теореме (см. [7]) оценка максимального правдоподобия будет асимптотически эффективной и асимптотически нормальной при справедливости 1–4 и выполнении дополнительных условий регулярности:

5. Плотности  $p(x; \theta)$  различны при разных  $\theta \in \Theta$ .
6. Плотность  $p(x; \theta)$  при любом  $x \in A$  трижды непрерывно дифференцируема по  $\theta$ .
7.  $\int_A p(x; \theta)dx$  можно дважды дифференцировать по  $\theta$  под знаком интеграла.
8. Существует функция  $h(x)$  такая, что для  $\forall x \in A$  и  $\theta \in \Theta$  выполнено  $|(\partial^3/\partial\theta^3)\ln p(x; \theta)| \leq h(x)$  и  $\mathbb{E}h(X_1) < \infty$ .

**Теорема 4.** Для модели (3) выполнены условия регулярности 1–8.

**Доказательство.** Пункты 1–3 и 5–7 очевидностью выполнены для (3).

Рассмотрим п. 4. Для его доказательства необходимы сведения из подразд. 4.1. Заметим, что  $\mathbb{D} U_1 = \mathcal{I}_1(\theta)$  — информация Фишера величины  $\tilde{Y}_1$ . Лемма 1 доказывает, что  $\mathbb{D} U_1 < \infty$ .

В то же время условие  $\mathbb{E} U_1 \equiv 0$  выполнено для всех плотностей  $p(x; \theta)$ , для которых справедливо (см. [7]):

$$\frac{\partial}{\partial\theta} \int_A p(x; \theta) dx = \int_A \frac{\partial}{\partial\theta} p(x; \theta) dx .$$

С очевидностью это выполнено для модели (3).

Докажем справедливость пункта 8. Выпишем в явном виде его условие:

$$\begin{aligned} \left| \frac{\partial^3}{\partial\theta^3} \ln p(x; \theta) \right| &= \left| \frac{p'''(x; \theta)}{p(x; \theta)} + \frac{2(p'(x; \theta))^3}{(p(x; \theta))^3} - \frac{3p'(x; \theta)p''(x; \theta)}{(p(x; \theta))^2} \right| \leq \\ &\leq \left| \frac{p'''(x; \theta)}{p(x; \theta)} \right| + 2 \left| \frac{p'(x; \theta)}{p(x; \theta)} \right|^3 + 3 \left| \frac{p'(x; \theta)p''(x; \theta)}{(p(x; \theta))^2} \right|. \end{aligned}$$

Таким образом, достаточно доказать ограниченность каждого из последних слагаемых. Ограниченность  $p(x; \theta)$  очевидна:

$$p(x; \theta) \leq \sum_{i=1}^m \frac{\alpha_i}{\sqrt{2\pi}\sigma_i} = C_p , \quad (6)$$

где константа  $0 < C_p < \infty$ .

Рассмотрим производные функции  $p(x; \theta)$  по  $\theta$ :

$$\begin{aligned} p'(x; \theta) &= \sum_{i=1}^m \frac{\alpha_i}{\sqrt{2\pi} \sigma_i^3} e^{-(x-\mu_i-\theta)^2/(2\sigma_i^2)} (x - \mu_i - \theta) \leq \\ &\leq \sum_{i=1}^m \frac{\alpha_i}{\sqrt{\pi} \sigma_i^2} \frac{1}{2e} = C_{p'} < \infty; \quad (7) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} p''(x; \theta) &= \sum_{i=1}^m \left( \frac{\alpha_i}{\sqrt{2\pi} \sigma_i^5} e^{-(x-\mu_i-\theta)^2/(2\sigma_i^2)} (x - \mu_i - \theta)^2 - \right. \\ &\quad \left. - \frac{\alpha_i}{\sqrt{2\pi} \sigma_i^3} e^{-(x-\mu_i-\theta)^2/(2\sigma_i^2)} \right) \leq \sum_{i=1}^m \frac{\sqrt{2} \alpha_i}{\sqrt{\pi} \sigma_i^3} \frac{1}{e} = C_{p''} < \infty; \quad (8) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} p'''(x; \theta) &= \sum_{i=1}^m \left( \frac{\alpha_i}{\sqrt{2\pi} \sigma_i^5} e^{-(x-\mu_i-\theta)^2/(2\sigma_i^2)} (x - \mu_i - \theta) ((x - \mu_i - \theta)^2 - 3) \right) \leq \\ &\leq \sum_{i=1}^m \frac{2\alpha_i}{\sqrt{\pi} \sigma_i^2} \frac{3\sqrt{3/2}}{2e^{3/2}} - 3 \sum_{i=1}^m \frac{\alpha_i}{\sqrt{\pi} \sigma_i^4} \frac{1}{2e} = C_{p'''} < \infty. \quad (9) \end{aligned}$$

Учитывая ограничения (7)–(9), получаем итоговое выражение:

$$\left| \frac{\partial^3}{\partial \theta^3} \ln p(x; \theta) \right| \leq \left| \frac{C_{p'''}}{C_p} \right| + 2 \left| \frac{C_{p'}}{C_p} \right|^3 + 3 \left| \frac{C_{p'} C_{p''}}{C_p^2} \right| = h(x) < \infty.$$

Из вида  $h(x)$  очевидно, что  $\mathbb{E}h(X_1) < \infty$ . Теорема доказана.  $\square$

Таким образом, оценка максимального правдоподобия в модели (3) является эффективной. Однако функция (5) имеет сложный вид, и ее непосредственная максимизация в прикладных задачах выполняется численно и сопряжена со множеством трудностей [8].

### 3.3 Оценки, основанные на классификации наблюдений

Для упрощения выкладок при работе со смесями распределений удобно использовать вспомогательные латентные переменные, показывающие принадлежность конкретного наблюдения одной из компонент. Используя данный подход, построим процедуру оценки сдвига в несколько этапов. Для этого воспользуемся утверждением из [8], позволяющим вычислить вероятность принадлежности наблюдения  $y_j$ , где  $j = \overline{1, n}$ , одной из компонент смеси  $\{C_i\}$ , где  $i = \overline{1, m}$ ,

$$\mathbb{P}(C_i | y_j) = \frac{(\alpha_i / \sigma_i) e^{-(y_j - \mu_i - \theta)^2 / (2\sigma_i^2)}}{\sum_{k=1}^m (\alpha_k / \sigma_k) e^{-(y_j - \mu_k - \theta)^2 / (2\sigma_k^2)}}, \quad (10)$$

где  $P(C_i|y_j)$  — вероятность того, что наблюдение  $y_j$  порождено  $i$ -й компонентой.

Таким образом, предлагается воспользоваться следующим алгоритмом:

1. Классифицировать каждое наблюдение  $y_j$  по компонентам  $\{C_i\}$ ,  $i = \overline{1, m}$ , используя формулу (10) для подсчета вероятностей.
2. Вычислить оценки  $\tilde{\theta}_i$  для каждой из  $C_i$ .
3. Вычислить итоговую оценку  $\hat{\theta}$  как композицию оценок  $\tilde{\theta}_i$ .

Рассмотрим каждый из шагов по отдельности. На шаге 1 каждое из наблюдений  $y_j$  классифицируется на основании максимизации вероятности компоненты, используя формулу (10).

На шаге 2 вычисляется  $m$  оценок сдвига  $\tilde{\theta}_i$ . Поскольку рассматривается случай нормальной смеси, то каждая из этих оценок является оценкой сдвига в классической нормальной модели. В таком случае (см. [7]) будет эффективной следующая оценка:

$$\tilde{\theta}_i = \frac{1}{n_i} \sum_{k=1}^{n_i} y_k, \quad (11)$$

где  $n_i$  — число наблюдений, отнесенных к компоненте  $C_i$ .

Вычислим дисперсию (11):

$$\mathbb{D}\tilde{\theta}_i = \mathbb{D} \frac{1}{n_i} \sum_{k=1}^{n_i} y_k = \frac{1}{n_i^2} \sum_{k=1}^{n_i} \mathbb{D} y_k = \frac{1}{n_i^2} n_i \sigma_i^2 = \frac{\sigma_i^2}{n_i} \approx \frac{\sigma_i^2}{\alpha_i n}.$$

В последнем равенстве используется приближение  $n_i \approx \alpha_i n$ , которое справедливо при больших  $n$ .

На шаге 3 из оценок шага 2 необходимо получить итоговую оценку сдвига модели (3).

Простейшим подходом будет воспользоваться методом моментов и получить оценку

$$\hat{\theta}_{\text{cavg}} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \tilde{\theta}_i. \quad (12)$$

Эта оценка будет несмещенной и состоятельной как линейная комбинация несмешанных и состоятельных оценок.

Вычислим дисперсию (12):

$$\mathbb{D}\hat{\theta}_{\text{cavg}} = \mathbb{D} \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \tilde{\theta}_i = \frac{1}{m^2} \sum_{i=1}^m \mathbb{D} \tilde{\theta}_i = \frac{1}{m^2} \sum_{i=1}^m \frac{\sigma_i^2}{\alpha_i n}.$$

С другой стороны, оценка (12) смешивает оценки разных дисперсий с одинаковым весом. Логично было бы ввести меньший вес для оценок с большей дисперсией, такой подход приводит к оценке

$$\begin{aligned}\hat{\theta}_{\text{cwavg}} &= \left( \sum_{i=1}^m \left( \mathbb{D} \tilde{\theta}_i \right)^{-1} \right)^{-1} \sum_{i=1}^m \left( \mathbb{D} \tilde{\theta}_i \right)^{-1} \tilde{\theta}_i = \left( \sum_{i=1}^m \frac{n_i}{\sigma_i^2} \right)^{-1} \sum_{i=1}^m \frac{n_i}{\sigma_i^2} \tilde{\theta}_i \approx \\ &\approx \left( \sum_{i=1}^m \frac{\alpha_i n}{\sigma_i^2} \right)^{-1} \sum_{i=1}^m \frac{\alpha_i n}{\sigma_i^2} \tilde{\theta}_i , \quad (13)\end{aligned}$$

где  $n_i$  — число наблюдений, отнесенных к компоненте  $C_i$ . В последнем равенстве используется приближение  $n_i \approx \alpha_i n$ , которое справедливо при больших  $n$ . Оценка (13) является несмешенной и состоятельной как линейная комбинация несмешенных и состоятельных оценок.

Вычислим дисперсию (13):

$$\begin{aligned}\mathbb{D} \hat{\theta}_{\text{cwavg}} &= \mathbb{D} \left( \sum_{i=1}^m \frac{\alpha_i n}{\sigma_i^2} \right)^{-1} \sum_{i=1}^m \frac{\alpha_i n}{\sigma_i^2} \tilde{\theta}_i = \left( \sum_{i=1}^m \frac{\alpha_i n}{\sigma_i^2} \right)^{-2} \sum_{i=1}^m \left( \frac{\sigma_i^2}{\alpha_i n} \right)^{-2} \mathbb{D} \tilde{\theta}_i = \\ &= \left( \sum_{i=1}^m \frac{\alpha_i n}{\sigma_i^2} \right)^{-2} \sum_{i=1}^m \left( \frac{\sigma_i^2}{\alpha_i n} \right)^{-2} \frac{\sigma_i^2}{\alpha_i n} = \left( n \sum_{i=1}^m \frac{\alpha_i}{\sigma_i^2} \right)^{-1} .\end{aligned}$$

## 4 Сравнение эффективностей оценок

### 4.1 Граница Рао–Крамера для дисперсии оценок

Как уже было отмечено в подразд. 3.2, оценки максимального правдоподобия в регулярных моделях являются эффективными, т. е. достигают нижней границы неравенства Рао–Крамера [7]. Таким образом,  $\mathbb{D} \hat{\theta}_{\text{mle}} = (n \mathcal{I}_1(\theta))^{-1}$ , где  $\mathcal{I}_1(\theta)$  — информация Фишера случайной величины  $Y_1$ .

**Определение 3.** Информацией Фишера параметра  $\theta$ , содержащейся в случайной величине  $\xi$ , называют величину

$$\mathcal{I}_\xi(\theta) = \mathbb{E}_\theta \left( \frac{\partial}{\partial \theta} \ln p_\xi(\theta) \right)^2 ,$$

где  $p_\xi(\theta)$  — плотность случайной величины  $\xi$ , зависящая от параметра  $\theta$ .

В рассматриваемой модели информация Фишера величины  $Y_1$  имеет вид:

$$\begin{aligned}\mathcal{I}_1(\theta) &= \int_{\mathbb{R}} \left( \sum_{i=1}^m \frac{\alpha_i}{\sqrt{2\pi} \sigma_i} e^{-(x-\mu_i-\theta)^2/(2\sigma_i^2)} \right)^{-1} \times \\ &\times \left( \sum_{i=1}^m \frac{\alpha_i}{\sqrt{2\pi} \sigma_i^3} e^{-(x-\mu_i-\theta)^2/(2\sigma_i^2)} (x - \mu_i - \theta) \right)^2 dx . \quad (14)\end{aligned}$$

**Лемма 1.** Информация Фишера (14) конечна.

**Доказательство.** Воспользовавшись неравенствами (6) и (7), получим ограничение для обеих скобок в (14). Следовательно,  $\mathcal{J}(\theta) < \infty$ . Лемма доказана.  $\square$

Выражение (14) довольно тяжело вычислять и использовать в прикладных задачах, так что в данном случае имеет смысл воспользоваться наблюдаемой информацией Фишера (см. [9]).

**Определение 4.** Наблюдаемой информацией Фишера параметра  $\theta$ , содержащейся в выборке  $\xi_1, \dots, \xi_n$  реализаций случайной величины  $\xi$  с плотностью  $p_\xi(\theta)$ , называют величину

$$\mathcal{J}(\theta) = - \sum_{i=1}^n \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} \ln p_\xi(\xi_i; \theta),$$

где  $p_\xi(\xi_i; \theta)$  — значение плотности  $p_\xi(\theta)$  в точке  $\xi_i$ .

Наблюдаемая информация Фишера величины  $Y_1$  в модели (3) имеет вид:

$$\mathcal{J}(\theta) = \sum_{j=1}^n \frac{(p'(y_j; \theta))^2 - p(y_j; \theta) p''(y_j; \theta)}{(p(y_j; \theta))^2}. \quad (15)$$

Производные  $p(y; \theta)$  были получены ранее в (7) и (8).

Выражение (15) гораздо удобнее для численных расчетов, чем (14).

## 4.2 Вычисление относительных эффективностей оценок

В этом разделе под эффективностью оценки понимается величина ее дисперсии. Таким образом, одна оценка считается эффективнее другой, если она обладает меньшей дисперсией и, следовательно, меньшей погрешностью при оценке параметров.

**Теорема 5.** При  $m > \max_{i \in I}(1/\alpha_i)$  оценка (12) эффективнее оценки (4), а при  $m < \min_{i \in I}(1/\alpha_i)$  оценка (4) эффективнее (12), где  $I = \{1, \dots, n\}$ .

**Доказательство.** Сравним дисперсии (12) и (4):

$$\begin{aligned} & \mathbb{D}\hat{\theta}_{\text{avg}} \vee \mathbb{D}\hat{\theta}_{\text{cavg}} ; \\ & \frac{1}{n} \sum_{i=1}^m \alpha_i \sigma_i^2 \vee \frac{1}{m^2 n} \sum_{i=1}^m \frac{\sigma_i^2}{\alpha_i}. \end{aligned}$$

Рассмотрим коэффициенты при  $\sigma_i$ . Неравенство  $\mathbb{D}\hat{\theta}_{\text{avg}} > \mathbb{D}\hat{\theta}_{\text{cavg}}$  будет справедливо, если для  $\forall i = \overline{1, m}$  выполнено следующее:

$$\alpha_i > \frac{1}{m^2 \alpha_i}; \quad m^2 \alpha_i^2 > 1; \quad m \alpha_i > 1; \quad m > \max_{i \in I} \frac{1}{\alpha_i}.$$

Нетрудно заметить, что при  $m < \min_{i \in I}(1/\alpha_i)$  справедливо обратное неравенство. Теорема доказана.  $\square$

Таким образом, теорема 5 задает условия, при которых одна из оценок (4) и (12) предпочтительнее другой в смысле величины дисперсии.

**Теорема 6.** Оценка (13) эффективнее оценок (4) и (12).

**Доказательство.** Для начала сравним дисперсии оценок (13) и (4):

$$\begin{aligned} & \mathbb{D}\hat{\theta}_{\text{avg}} \vee \mathbb{D}\hat{\theta}_{\text{cavg}} ; \\ & \frac{1}{n} \sum_{i=1}^m \alpha_i \sigma_i^2 \vee \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^m \frac{\alpha_i}{\sigma_i^2} \right)^{-1} ; \\ & \frac{1}{n} \sum_{i=1}^m \alpha_i \left( \frac{1}{\sigma_i^2} \right)^{-1} \vee \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^m \alpha_i \frac{1}{\sigma_i^2} \right)^{-1} . \end{aligned}$$

Используя неравенство Йенсена, получим

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^m \alpha_i \left( \frac{1}{\sigma_i^2} \right)^{-1} \geq \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^m \alpha_i \frac{1}{\sigma_i^2} \right)^{-1} ,$$

из чего следует, что  $\mathbb{D}\hat{\theta}_{\text{avg}} \geq \mathbb{D}\hat{\theta}_{\text{cavg}}$ . Таким образом, оценка (13) предпочтительнее оценки (4) в терминах величины дисперсии.

Сравним дисперсии (13) и (12):

$$\begin{aligned} & \mathbb{D}\hat{\theta}_{\text{cavg}} \vee \mathbb{D}\hat{\theta}_{\text{cavg}} ; \\ & \frac{1}{nm^2} \sum_{i=1}^m \frac{\sigma_i^2}{\alpha_i} \vee \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^m \frac{\alpha_i}{\sigma_i^2} \right)^{-1} . \end{aligned}$$

Обозначим  $\gamma_i = \sigma_i^2/\alpha_i > 0$ . Тогда:

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^m \gamma_i \sum_{i=1}^m \gamma_i^{-1} \vee m^2 ; \\ & \sum_{i,j} \frac{\gamma_i}{\gamma_j} \vee m^2 . \end{aligned}$$

Рассмотрим внимательнее сумму, стоящую слева. Ее можно раскрыть как

$$\sum_{i,j} \frac{\gamma_i}{\gamma_j} = m + \sum_{k=1}^{m(m-1)/2} \tau_k + \sum_{k=1}^{m(m-1)/2} \tau_k^{-1} = m + \sum_{k=1}^{m(m-1)/2} (\tau_k + \tau_k^{-1}) ,$$

где  $\tau_k = \gamma_i/\gamma_j > 0$ , т. е. при  $k = \overline{1, m(m-1)/2}$  величина  $\tau_k$  пробегает все возможные значения частных  $\gamma_i/\gamma_j$  при  $i \neq j$ .

Для окончательного разрешения неравенства необходимо показать, что

$$\sum_{k=1}^{m(m-1)/2} (\tau_k + \tau_k^{-1}) \geq m(m-1).$$

Это выполнено, так как  $\tau_k + \tau_k^{-1} \geq 2, \forall \tau_k > 0$ .

Таким образом,  $\mathbb{D}\hat{\theta}_{\text{cavg}} \geq \mathbb{D}\hat{\theta}_{\text{cwavg}}$ . Теорема доказана.

## 5 Заключение

Статистические методы оценки параметров находят важное применение в обработке сигналов нейрофизиологических экспериментов, в частности для получения формы физиологического отклика. Правильная оценка отклика позволяет неинвазивно изучать процессы, происходящие в человеческом мозге.

В данной статье показано, что широко используемые в прикладных исследованиях оценки усреднением обладают множеством важных статистических свойств, таких как несмещенност, состоятельность и асимптотическая нормальность. К тому же использование более сложной модели шума в виде конечной нормальной смеси не нарушает справедливости этих свойств и не ограничивает применимость распространенных процедур обработки данных.

С другой стороны, использование особенностей новой модели шума позволяет строить более эффективные оценки. В статье предложен алгоритм построения таких оценок на основе классификации наблюдений. Результаты данной работы, несмотря на то что они были выполнены с опорой на данные МЭГ, применимы в самой широкой статистической постановке — для оценки сдвига конечной нормальной смеси.

## Литература

1. Захарова Т. В., Никифоров С. Ю., Гончаренко М. Б., Драницына М. А., Климов Г. А., Хазиахметов М. Ш., Чаянов Н. В. Методы обработки сигналов для локализации невосполнимых областей головного мозга // Системы и средства информатики, 2012. Т. 22. № 2. С. 157–175.
2. Hamalainen M., Hari R., Ilmoniemi R. J., Knuutila J., Lounasmaa O. V. Magnetoencephalography — theory, instrumentation, and applications to noninvasive studies of the working human brain // Rev. Mod. Phys., 1993. Vol. 65. No. 2. P. 413–497. doi: 10.1103/revmodphys.65.413.
3. Гончаренко М. Б., Захарова Т. В. Вероятностный подход к решению обратной задачи магнитоэнцефалографии // Системы и средства информатики, 2018. Т. 28. № 1. С. 35–52. doi: 10.14357/08696527180103.
4. Zakhарова Т. В., Karpov P. I., Bugaevskii V. M. Localization of the activity source in the inverse problem of magnetoencephalography // Comput. Math. Model., 2017. Vol. 28. No. 2. P. 148–157. doi: 10.1007/s10598-017-9353-6.

5. *Karpov P. I., Zakharova T. V.* Magnetoencephalography inverse problem in the spheroid geometry // J. Inverse Ill-Pose. P., 2018 (in press). doi: 10.1515/jipp-2017-0101.
6. *Henson R. N., Wakeman D. G., Litvak V., Friston K. J.* A parametric empirical Bayesian framework for the EEG/MEG inverse problem: Generative models for multi-subject and multi-modal integration // Front. Hum. Neurosci., 2011. Vol. 5. No. 76. P. 1–16. doi: 10.3389/fnhum.2011.00076.
7. *Лагутин М. Б.* Наглядная математическая статистика. — Москва: БИНОМ, 2013. 472 с.
8. *Королев В. Ю.* Вероятностно-статистические методы декомпозиции волатильности хаотических процессов. — М.: Изд-во Московского ун-та, 2011. 510 с.
9. *Efron B., Hinkley D. V.* Assessing the accuracy of the maximum likelihood estimator: Observed versus expected Fisher Information // Biometrika, 1978. Vol. 65. No. 3. P. 457–487. doi: 10.1093/biomet/65.3.457.

*Поступила в редакцию 30.03.18*

---

## EVALUATION OF THE WAVEFORM IN THE MAGNETOENCEPHALOGRAPHIC SIGNALS WITH NOISE IN THE FORM OF A FINITE NORMAL MIXTURE

*M. B. Goncharenko*

Department of Mathematical Statistics, Faculty of Computational Mathematics and Cybernetics, M. V. Lomonosov Moscow State University, 1-52 Leninskiye Gory, GSP-1, Moscow 119991, Russian Federation

**Abstract:** The article is devoted to the methods of evaluation of the waveform (or activation pattern) that occurs in the signals of the subject in response to an external stimulus during a neurophysiological experiment. The peculiarity of the mathematical model considered is the representation of noise in terms of finite normal mixtures. This approach is more consistent with the experimental data. Within the framework of the considered model, the analysis of different waveform estimators is carried out and their statistical properties are investigated. Several new estimators that utilize features of noise distribution were proposed. The author proved higher efficiency of new estimators in terms of variance amount in relation to the method of moments which is widely used in studies. Despite the fact that the article focuses on the application of estimators to the magnetoencephalographic signals, the considered methods can be used in similar applications for any neurophysiological signals as well as in the most general setting — for bias estimation of a finite normal mixture.

**Keywords:** magnetoencephalography; signal processing; finite Gaussian mixtures; point estimators; efficient estimators; Fisher information; estimation of distribution bias

**DOI:** 10.14357/08696527180306

## References

1. Zakharova, T. V., S. Yu. Nikiforov, M. B. Goncharenko, M. A. Dranitsyna, G. A. Klimov, M. Sh. Khaziakhmetov, and N. V. Chayanov. 2012. Metody obrabotki signalov dlya lokalizatsii nevospolnomykh oblastey golovnogo mozga [Signal processing methods for localization of nonrenewable brain regions]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 22(2):157–175.
2. Hamalainen, M., R. Hari, R. J. Ilmoniemi, J. Knuutila, and O. V. Lounasmaa. 1993. Magnetoencephalography — theory, instrumentation, and applications to noninvasive studies of the working human brain. *Rev. Mod. Phys.* 65(2):413–497. doi: 10.1103/revmodphys.65.413.
3. Goncharenko, M. B., and T. V. Zakharova. 2018. Veroyatnostnyy podkhod k resheniyu obratnoy zadachi magnitoentselografii [Probabilistic approach to solving the magnetoencephalography inverse problem]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 28(1):35–52. doi: 10.14357/08696527180103.
4. Zakharova, T. V., P. I. Karpov, and V. M. Bugaevskii. 2017. Localization of the activity source in the inverse problem of magnetoencephalography. *Comput. Math. Model.* 28(2):148–157. doi: 10.1007/s10598-017-9353-6.
5. Karpov, P. I., and T. V. Zakharova. 2018 (in press). Magnetoencephalography inverse problem in the spheroid geometry. *J. Inverse Ill-Pose. P.* doi: 10.1515/jiip-2017-0101.
6. Henson, R. N., D. C. Wakeman, V. Litvak, and K. J. Friston. 2011. A parametric empirical Bayesian framework for the EEG/MEG inverse problem: Generative models for multi-subject and multi-modal integration. *Front. Hum. Neurosci.* 5(76):1–16. doi: 10.3389/fnhum.2011.00076.
7. Lagutin, M. B. 2013. *Naglyadnaya matematicheskaya statistika* [Evident mathematical statistics]. Moscow: BINOM. 472 p.
8. Korolev, V. Yu. 2011. *Veroyatnostno-statisticheskie metody dekompozitsii volatil'nosti khaoticheskikh protsessov* [Probabilistic-statistical methods of decomposition of volatility of chaotic processes]. Moscow: Publishing House of Moscow University. 510 p.
9. Efron, B., and D. V. Hinkley. 1978. Assessing the accuracy of the maximum likelihood estimator: Observed versus expected Fisher Information. *Biometrika* 65(3): 457–487. doi: 10.1093/biomet/65.3.457.

Received March 30, 2018

## Contributor

**Goncharenko Miroslav B.** (b. 1991) — PhD student, Department of Mathematical Statistics, Faculty of Computational Mathematics and Cybernetics, M. V. Lomonosov Moscow State University, 1-52 Leninskiye Gory, GSP-1, Moscow 119991, Russian Federation; goncharenko.mir@yandex.ru

## АНАЛИЗ ЗАВИСИМОСТЕЙ МЕЖДУ ПОКАЗАТЕЛЯМИ ПРИ ПРОГНОЗИРОВАНИИ ОБЪЕМА ГРУЗОПЕРЕВОЗОК\*

*К. Р. Усманова<sup>1</sup>, С. П. Кудияров<sup>2</sup>, Р. В. Мартышкин<sup>3</sup>, А. А. Замковой<sup>4</sup>,  
В. В. Стрижов<sup>5</sup>*

**Аннотация:** Анализируются взаимосвязь и согласованность показателей в системе управления, мониторинга состояния и отчетности железнодорожных грузоперевозок. Рассматриваются макроэкономические временные ряды, содержащие управляющие воздействия, состояние и целевые показатели. Предполагается, что управление, состояние и целеполагание статистически связаны. Для установления связи используется тест Гренджера. Считается, что два временных ряда связаны, если использование истории одного из рядов улучшает качество прогноза другого. Цель анализа состоит в повышении качества прогноза объема грузоперевозок. Вычислительный эксперимент выполнен на данных об объеме грузоперевозок, управляющих воздействиях и установленных целевых критериях.

**Ключевые слова:** временные ряды; прогнозирование; тест Гренджера; система управления; целевые критерии

**DOI:** 10.14357/08696527180307

### 1 Введение

Прогнозирование грузовых железнодорожных перевозок имеет большое значение как для операторов железнодорожного транспорта, в том числе ОАО «РЖД», так и для органов государственной власти. Понимание перспективного спроса на грузовые железнодорожные перевозки необходимо для управления инвестиционной деятельностью, формирования перспективной топографии железнодорожной сети, рационального обновления и распределения по сети парка подвижного состава. Отсюда появляется необходимость построения максимально достоверного прогноза на основе доступных данных.

\* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты 17-20-01212, 17-20-01184).

<sup>1</sup> Московский физико-технический институт, karina.usmanova@gmail.com

<sup>2</sup> Институт экономики и развития транспорта (АО «ИЭРТ»), s.kudiyarov@gmail.com

<sup>3</sup> Институт экономики и развития транспорта (АО «ИЭРТ»), martyshkinrv@mail.ru

<sup>4</sup> Институт экономики и развития транспорта (АО «ИЭРТ»), rtr@iert.com.ru

<sup>5</sup> Вычислительный центр имени А. А. Дородницына Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук, strijov@gmail.com

**Таблица 1** Анализируемые факторы и соответствующие им временные ряды

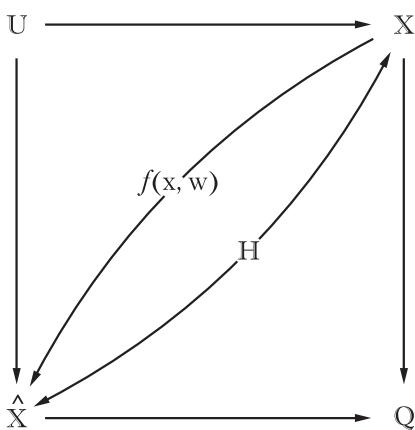
Фактор	Временные ряды
Объем грузоперевозок ( $\mathbb{X}$ )	Импорт нефти
Экзогенные факторы ( $\mathbb{H}$ )	Цена на нефть Курс национальной валюты
Факторы управления ( $\mathbb{U}$ )	Средняя скорость доставки грузов Средний вес брутто Средняя участковая скорость доставки грузов
Целевые критерии ( $\mathbb{Q}$ )	Добыча нефти Темп роста ВВП

Задача прогнозирования железнодорожных грузоперевозок усложняется тем, что существует множество факторов, которые могут влиять на объем грузоперевозок. Поэтому требуется проведение экспертного анализа на предмет отбора факторов по критериям их воздействия на объемы грузовых железнодорожных перевозок и характера этого воздействия. В данной работе исследуемые факторы делятся на экзогенные и управляемые. Экспертами высказываются гипотезы о влиянии тех или иных факторов на объем грузоперевозок, а также влиянии грузоперевозок на целевые критерии. Требуется проверить выдвинутые гипотезы и исследовать зависимости между объемом грузоперевозок, экзогенными факторами, управлением и целевыми критериями.

В табл. 1 представлены рассматриваемые в работе временные ряды.

Нахождение зависимостей объема грузоперевозок от экзогенных факторов и факторов управления может повысить качество прогноза, а также упростить прогностическую модель. Если удается установить, что ряд грузоперевозок  $\mathbf{x}$  не зависит от фактора управления  $\mathbf{u}$  (или экзогенного фактора  $\mathbf{h}$ ), то ряд  $\mathbf{y}$  можно не учитывать при прогнозе, не снижая качество прогноза.

Будем говорить, что ряд  $\mathbf{x}$  зависит от ряда  $\mathbf{y}$  (или следует из ряда  $\mathbf{y}$ ), если использование истории ряда  $\mathbf{y}$  при построении прогностической модели улучшает прогноз ряда  $\mathbf{x}$ . Такой подход лежит в основе теста Гренджера [1, 2]. Тест Гренджера позволяет установить причинно-следственные связи между рядами и основан на сравнении качества прогноза, в котором используется история только прогнозируемого ряда, и прогноза, который дополнительно использует историю других рядов. Если улучшение качества прогноза подтверждается статистически, то говорят, что прогнозируемый ряд следует из использовавшихся во втором прогнозе рядов. Более формально используемый в этой работе тест Гренджера описан в разд. 4. Тест Гренджера применим к стационарным временным рядам, поэтому в случае нестационарных рядов их необходимо продифференцировать перед проведением теста Гренджера. Тест Гренджера используется в различных задачах, в которых необходимо исследовать взаимосвязь между развивающимися во времени процессами [3, 4].



**Рис. 1** Схема модели обнаружения зависимостей

представляется в виде суммы временных рядов. Метод SSA применяется в таких задачах, как выявление трендов [9] во временных рядах, подавление шума во временных рядах [10], прогнозирование временных рядов [11, 12].

На рис. 1 изображена схема модели обнаружения зависимостей. Она состоит из четырех частей: множество управляющих воздействий, состояние объекта, прогноз состояния объекта и множество критериев качества состояния объекта. Принятие решения заключается в выборе воздействия  $u \in \mathbb{U}$ , которое изменяет состояние объекта  $x$ . На состояние объекта помимо управляемых воздействий могут влиять неуправляемые воздействия, называемые экзогенными факторами  $h \in \mathbb{H}$ . Модель наблюдения объекта заключается в измерениях  $y(x, h)$ , которые можно провести, чтобы описать состояния объекта  $x$ . Модель оценки состояния определяет качество текущего состояния объекта  $q(x) \in \mathbb{Q}$ , на основе которого принимается решение о выборе управляющего воздействия.

В данной работе модель обнаружения зависимостей рассматривается применительно к данным РЖД. Объектом  $x \in \mathbb{X}$  являются показатели объема грузоперевозок. Экспертами назначаются целевые критерии  $q_i \in \mathbb{Q}$ , управляющие факторы  $u_i \in \mathbb{U}$  и экзогенные факторы  $h_i \in \mathbb{H}$ . Целевые критерии выступают в роли оценки состояния объекта. Ставится задача проверки зависимости состояния объекта  $x$  от управляемых ( $u_i$ ) и экзогенных ( $h_i$ ) факторов, а также зависимости целевых критериев  $q_i$  от состояния  $x$ .

## 2 Постановка задачи прогнозирования

В данной работе строится прогноз объема грузоперевозок с использованием истории рядов управляющих факторов и целевых критериев. Поставим задачу

В данной работе для построения прогноза одного временного ряда по нескольким используется алгоритм многомерной гусеницы (MSSA-L) [5]. Этот алгоритм является обобщением на многомерный случай алгоритма анализа спектральных компонент SSA (singular spectrum analysis) [6–8].

Метод SSA основан на разложении временного ряда в сумму интерпретируемых компонент. Он делится на четыре основных шага: запись ряда в виде траекторной матрицы, ее сингулярное разложение, группировка компонент, полученных при сингулярном разложении, по каждой сгруппированной матрице восстанавливается временной ряд. Таким образом исходный временной ряд пред-

прогноза многомерного временного ряда. Обозначим  $\mathbf{X} = (\mathbf{x}^{(1)}, \dots, \mathbf{x}^{(s)})^\top$  — заданный  $s$ -мерный временной ряд. Построим матрицу плана из сегментов ряда:

$$\begin{pmatrix} x_0^{(1)} & \cdots & x_{n-1}^{(1)} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_0^{(s)} & \cdots & x_{n-1}^{(s)} \end{pmatrix} = \mathbf{X}_{0:(n-1)}. \quad (1)$$

Пусть  $\mathbf{x}_n = (x_n^{(1)}, \dots, x_n^{(s)})^\top$  — значение ряда  $\mathbf{X}$  в момент времени  $n$ . Построим прогноз  $\hat{\mathbf{x}}$  ряда  $\mathbf{X}$  в точке  $\mathbf{x}_n$ . Проделаем это  $k$  раз для различных обучающих выборок  $\mathbf{X}_{\text{train}}^i = \mathbf{X}_{i:(n+i-1)}$ ,  $i = 0, \dots, (k-1)$ . Получим  $k$  прогнозов  $\hat{\mathbf{X}} = (\hat{\mathbf{x}}_n, \hat{\mathbf{x}}_{n+1}, \dots, \hat{\mathbf{x}}_{n+k-1})$  ряда  $\mathbf{X}$  в точках  $\mathbf{x}_n, \mathbf{x}_{n+1}, \dots, \mathbf{x}_{n+k-1}$ .

Прогностическая модель имеет вид:

$$\hat{\mathbf{x}}_{t+1} = \mathbf{f}(\hat{\mathbf{w}}, \mathbf{x}_t, \mathbf{x}_{t-1}, \dots, \mathbf{x}_{t-L+2}),$$

$$\hat{\mathbf{w}} = \underset{\mathbf{w}}{\operatorname{argmin}} S(\mathbf{w}, \mathbf{X}, \hat{\mathbf{x}}_n, \hat{\mathbf{x}}_{n+1}, \dots, \hat{\mathbf{x}}_{n+k-1}) = S(\mathbf{w}, \mathbf{X}, \hat{\mathbf{X}}),$$

где функция потерь

$$S(\mathbf{w}, \mathbf{X}, \hat{\mathbf{X}}) = \sum_{i=0}^{k-1} \mathcal{L}\left(\mathbf{x}_{n+i}^{(1)}, \hat{\mathbf{x}}_{n+i}^{(1)}\right).$$

В данной работе в качестве прогностической модели  $\mathbf{f}$  используется алгоритм многомерной гусеницы (MSSA-L). Функция  $\mathbf{f}$  имеет вид:

$$\mathbf{f}(\hat{\mathbf{w}}, \mathbf{x}_t, \mathbf{x}_{t-1}, \dots, \mathbf{x}_{t-L+2}) = \begin{pmatrix} x_{t-L+2}^{(1)} & \cdots & x_t^{(1)} \\ x_{t-L+2}^{(2)} & \cdots & x_t^{(2)} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{t-L+2}^{(s)} & \cdots & x_t^{(s)} \end{pmatrix} \cdot \mathbf{p},$$

вектор коэффициентов  $\mathbf{p}$  определяется алгоритмом многомерной гусеницы MSSA-L. Алгоритм MSSA-L подробнее описан в следующем разделе.

### 3 Алгоритм многомерной гусеницы

Алгоритм MSSA-L является обобщением на многомерный случай алгоритма гусеницы (SSA). Задача алгоритма MSSA-L состоит в представлении временного ряда в виде суммы интерпретируемых компонент. Это осуществляется в 4 шагах: запись ряда в виде траекторной матрицы, сингулярное разложение этой

матрицы, группировка компонент, полученных при сингулярном разложении, в интерпретируемые компоненты и восстановление временного ряда по каждой из интерпретируемых компонент.

По ряду (1) построим матрицу Ганкеля  $\mathbf{H} \in \mathbb{R}^{L \times sK}$ ,  $K = N - L + 1$ :

$$\mathbf{H} = [\mathbf{H}_1, \mathbf{H}_2, \dots, \mathbf{H}_s],$$

где  $L$  — ширина окна;  $\mathbf{H}_i \in \mathbb{R}^{L \times K}$  — матрица Ганкеля для ряда  $\mathbf{x}^{(i)}$ ,

$$\mathbf{H}^{(i)} = \begin{pmatrix} x_0^{(i)} & x_1^{(i)} & \cdots & x_{N-L}^{(i)} \\ x_1^{(i)} & x_2^{(i)} & \cdots & x_{N-L+1}^{(i)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{L-1}^{(i)} & x_L^{(i)} & \cdots & x_{N-1}^{(i)} \end{pmatrix}.$$

По матрице Ганкеля  $\mathbf{H}$  восстановим временной ряд  $\mathbf{X}$ . Метод многомерной гусеницы строит приближение  $\hat{\mathbf{H}}$  матрицы  $\mathbf{H}$  меньшего ранга с помощью сингулярного разложения этой матрицы и восстанавливает ряд по матрице  $\hat{\mathbf{H}}$ . Сингулярное разложение матрицы  $\mathbf{H}$  имеет вид:

$$\mathbf{H} = \mathbf{U}\Lambda\mathbf{V} = \sum_{i=1}^d \lambda_i \mathbf{u}_i \mathbf{v}_i^\top,$$

где  $\lambda_1, \dots, \lambda_d > 0$  — сингулярные числа матрицы  $\mathbf{H}$ ;  $\mathbf{u}_i$  и  $\mathbf{v}_i$  — столбцы матриц  $\mathbf{U}$  и  $\mathbf{V}$ . Тогда наилучшее приближение матрицы  $\mathbf{H}$  матрицей ранга  $r < d$  имеет вид:

$$\hat{\mathbf{H}} = \sum_{i=1}^r \lambda_i \mathbf{u}_i \mathbf{v}_i^\top.$$

По матрице  $\hat{\mathbf{H}}$  восстанавливается временной ряд  $\mathbf{X}$  путем усреднения элементов, стоящих на антидиагоналях.

Алгоритм многомерной гусеницы также позволяет построить прогноз временного ряда в момент  $N$  по  $(L-1)$  предыдущим значениям ряда. Алгоритм находит такой вектор коэффициентов  $\mathbf{p} \in \mathbb{R}^{(L-1)}$ , что значения ряда  $\mathbf{X}$  в момент  $N$ :

$$\mathbf{x}_N = \begin{pmatrix} x_{N-L+1}^{(1)} & \cdots & x_{N-1}^{(1)} \\ x_{N-L+1}^{(2)} & \cdots & x_{N-1}^{(2)} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{N-L+1}^{(s)} & \cdots & x_{N-1}^{(s)} \end{pmatrix} \cdot \mathbf{p} = \mathbf{Y} \cdot \mathbf{p}.$$

Заметим, что коэффициенты  $\mathbf{p}$  оказываются общими для всех компонент ряда  $\mathbf{X}$ .

Для каждого  $i \in [1, r]$  обозначим  $\tilde{\mathbf{u}}_i$  первые  $(L-1)$  компонент столбца  $\mathbf{u}_i$ ,  $\pi_i$  — последнюю компоненту столбца  $\mathbf{u}_i$  и  $\nu = \sum_{i=1}^r \pi_i^2$ . Тогда вектор коэффициентов  $\mathbf{p}$  вычисляется по формуле:

$$\mathbf{p} = \frac{1}{1 - \nu^2} \sum_{i=1}^r \pi_i \tilde{\mathbf{u}}_i.$$

Заметим, что для одномерного временного ряда справедливы все приведенные соотношения при  $s = 1$ .

## 4 Анализ взаимосвязи показателей грузоперевозок

В работе для установления причинно-следственных связей предлагается использовать статистический тест Гренджера. Ниже приведен алгоритм теста Гренджера для проверки наличия зависимости одного временного ряда от другого. Пусть требуется проверить, зависит ли ряд  $\mathbf{x}$  от ряда  $\mathbf{y}$ . Выдвинем гипотезу о независимости ряда  $\mathbf{x}$  от ряда  $\mathbf{y}$  и проверим ее. Делаем это следующим образом.

- Строим прогноз ряда  $\mathbf{x}$  без использования ряда  $\mathbf{y}$  и находим значение функции потерь:

$$S_{\mathbf{x}} = \sum_{i=1}^n \mathcal{L}(\mathbf{x}_i, \hat{\mathbf{x}}_i),$$

где  $n$  — длина тестовой выборки.

Функцию  $\mathcal{L}(\mathbf{x}, \hat{\mathbf{x}})$  выбираем в зависимости от распределения ошибок прогноза на тестовой выборке (2) (см. подразд. 5.4).

- Строим прогноз ряда  $\mathbf{x}$  с использованием ряда  $\mathbf{y}$ . Вычисляем для него значение функции потерь:

$$S_{\mathbf{xy}} = \sum_{i=1}^n \mathcal{L}(\mathbf{x}_i, \hat{\mathbf{x}}_i(\mathbf{y}_i)).$$

- Рассмотрим статистику

$$T(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \frac{N - 2k}{k} \frac{S_{\mathbf{x}} - S_{\mathbf{xy}}}{S_{\mathbf{xy}}},$$

где  $N$  — длина обучающей выборки;  $k$  — размерность регрессионной модели. Статистика  $T$  имеет распределение  $F(k, N - 2k)$  (распределение Фишера с параметрами  $(k, N - 2k)$ ).

4. Если ряд  $\mathbf{x}$  не зависит от ряда  $\mathbf{y}$ , то значения  $S_{\mathbf{x}}$  и  $S_{\mathbf{xy}}$  будут близки, а статистика  $T(\mathbf{x}, \mathbf{y})$  незначима. Поэтому в случае больших значений статистики  $T(\mathbf{x}, \mathbf{y})$  отвергаем гипотезу о независимости ряда  $\mathbf{x}$  от  $\mathbf{y}$ . Выберем некоторое критическое значение  $t$  статистики  $T(\mathbf{x}, \mathbf{y})$ . Тогда критерий зависимости ряда  $\mathbf{x}$  от ряда  $\mathbf{y}$  выглядит следующим образом:

Из  $T(\mathbf{x}, \mathbf{y}) > t$  следует, что ряд  $\mathbf{x}$  зависит от ряда  $\mathbf{y}$ .

5. Аналогично проверим зависимость ряда  $\mathbf{x}$  от восстановленного (с помощью алгоритма MSSA-L) ряда  $\hat{\mathbf{y}}$ . Для этого используем статистику

$$T(\mathbf{x}, \hat{\mathbf{y}}) = \frac{N - 2k}{k} \frac{S_{\mathbf{x}} - S_{\mathbf{xy}}}{S_{\mathbf{xy}}}.$$

Для более подробного изучения связи между временными рядами  $\mathbf{x}$  и  $\mathbf{y}$  вычисляем кросс-корреляционную функцию  $\gamma_{\mathbf{xy}}(h)$ :

$$\gamma_{\mathbf{xy}}(h) = \frac{\mathbb{E}[(\mathbf{x}_t - \mu_{\mathbf{x}})(\mathbf{y}_{t+h} - \mu_{\mathbf{y}})]}{\sigma_{\mathbf{x}}\sigma_{\mathbf{y}}},$$

где  $\mathbb{E}$  — математическое ожидание;  $\mu$  — выборочное среднее;  $\sigma$  — выборочная дисперсия.

Если  $h^*$  соответствует максимальному значению кросс-корреляции, то говорят, что ряд  $\mathbf{y}$  сдвинут на  $h^*$  относительно  $\mathbf{x}$ . Заметим, что если ряд  $\mathbf{x}$  сдвинут на  $h_1$  относительно ряда  $\mathbf{y}$ , а ряд  $\mathbf{y}$  сдвинут на  $h_2$  относительно ряда  $\mathbf{z}$ , то ряд  $\mathbf{x}$  сдвинут на  $h_3 = h_1 + h_2$  относительно ряда  $\mathbf{z}$ .

Пусть прогноз ряда  $\mathbf{x}$  строится с использованием истории ряда  $\mathbf{y}$  и пусть с помощью вычисления кросс-корреляции рядов  $\mathbf{x}$  и  $\mathbf{y}$  получено, что ряд  $\mathbf{x}$  отстает от ряда  $\mathbf{y}$  на  $h$  отсчетов времени. Тогда использование при прогнозе ряда  $\mathbf{y}$ , сдвинутого на  $h$  отсчетов назад, может повысить качество прогноза.

## 5 Вычислительный эксперимент по выявлению зависимостей между показателями грузоперевозок

Эксперимент проводится на реальных данных ОАО «РЖД» об объеме грузоперевозок, экзогенных факторах, факторах управления и целевых критериях [13]. Ставится задача выявления зависимости объема грузоперевозок от экзогенных факторов и управления, а также зависимости целевых критериев от объема грузоперевозок.

Данные представляют собой 8 временных рядов: импорт нефти  $\mathbf{x}$ ; цена на нефть  $\mathbf{h}_1$ ; курс доллара  $\mathbf{h}_2$ ; средняя скорость доставки грузов  $\mathbf{u}_1$ ; средний вес брутто  $\mathbf{u}_2$ ; средняя участковая скорость доставки грузов  $\mathbf{u}_3$ ; добыча нефти  $\mathbf{q}_1$ ; темп роста валового внутреннего продукта (ВВП)  $\mathbf{q}_2$ . Описание заданных временных рядов представлено в табл. 2.

**Таблица 2** Временные ряды объема импорта нефти, целевых критериев, управляемых и экзогенных факторов

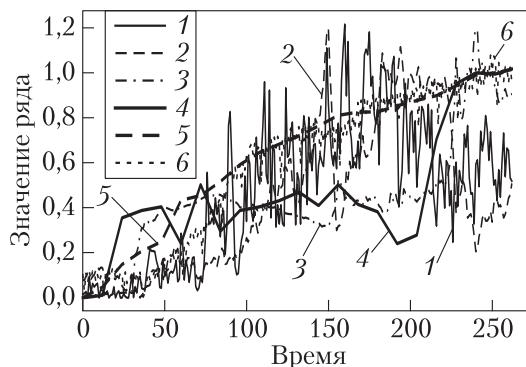
Временной ряд	Период	Частота
1. Импорт нефти ( $\mathbf{x}$ )	1996–2017	По месяцам
2. Цена на нефть ( $\mathbf{h}_1$ )	1996–2017	По месяцам
3. Курс доллара ( $\mathbf{h}_2$ )	1996–2017	По месяцам
4. Средняя скорость доставки грузов ( $\mathbf{u}_1$ )	1996–2017	По годам
5. Средний вес брутто ( $\mathbf{u}_2$ )	1996–2017	По годам
6. Средняя участковая скорость доставки грузов ( $\mathbf{u}_3$ )	2007–2017	По годам
7. Добыча нефти ( $\mathbf{q}_1$ )	1996–2017	По месяцам
8. Темп роста ВВП ( $\mathbf{q}_2$ )	2006–2016	По годам

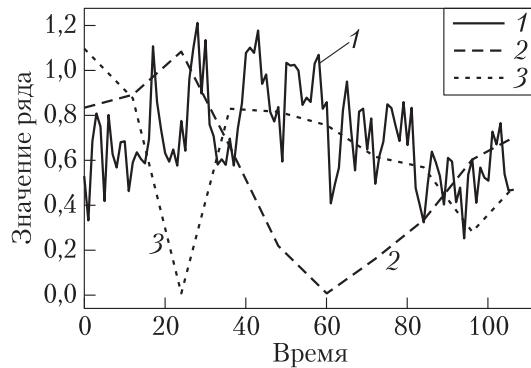
Проверяются следующие гипотезы.

1. Ряд  $\mathbf{x}$  следует из рядов  $\mathbf{h}_1$  и  $\mathbf{h}_2$ .
2. Ряд  $\mathbf{x}$  следует из рядов  $\mathbf{u}_1$ ,  $\mathbf{u}_2$  и  $\mathbf{u}_3$ .
3. Ряд  $\mathbf{q}_1$  следует из ряда  $\mathbf{x}$ .
4. Ряд  $\mathbf{q}_2$  следует из ряда  $\mathbf{x}$ .

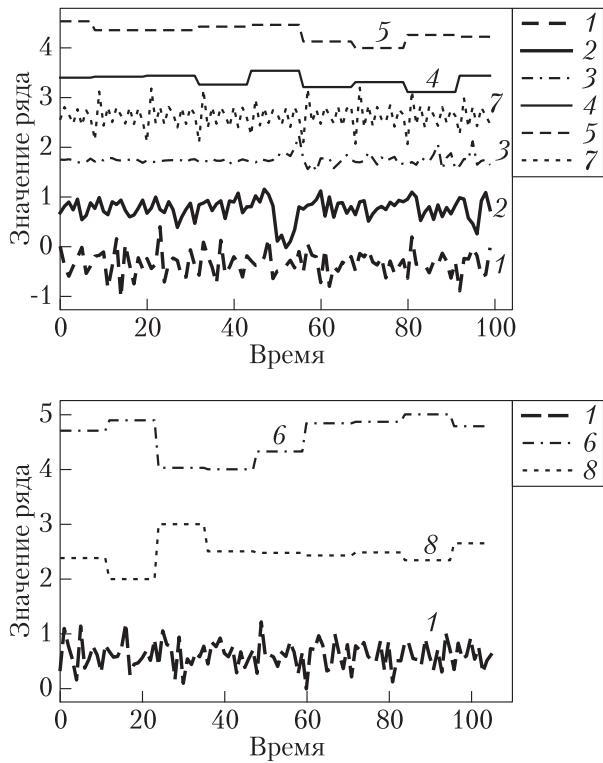
Значения временных рядов, заданных с частотой 1 раз в год, будем линейно аппроксимировать для каждого месяца. Временные ряды, заданные с 1996 по 2017 гг. изображены на рис. 2, а заданные с 2007 по 2016 гг. представлены на рис. 3.

Из графиков на рис. 2 и 3 видно, что рассматриваемые временные ряды не стационарны. Поэтому продифференцируем их. На рис. 4 представлены продифференцированные ряды.

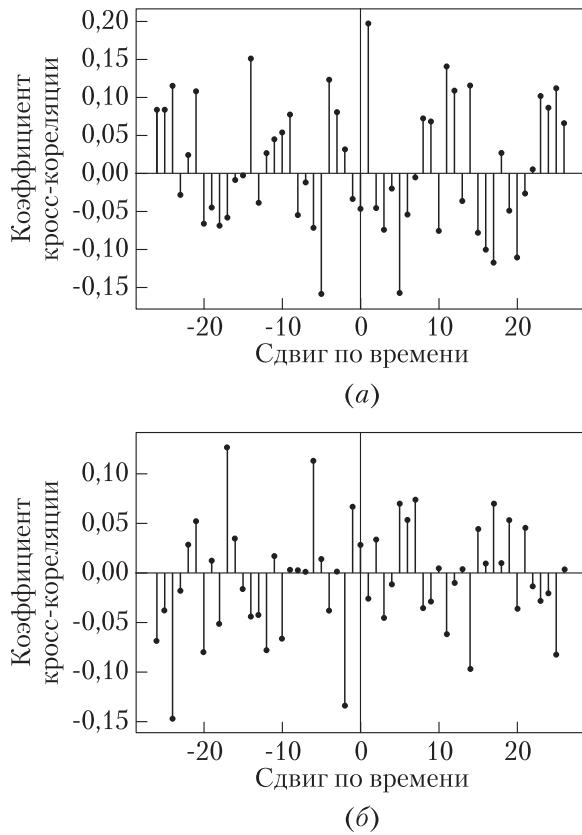
**Рис. 2** Импорт нефти  $\mathbf{x}$  (1), цена на нефть  $\mathbf{h}_1$  (2), курс доллара  $\mathbf{h}_2$  (3), скорость доставки грузов  $\mathbf{u}_1$  (4), средний вес брутто  $\mathbf{u}_2$  (5) и добыча нефти  $\mathbf{q}_1$  (6)



**Рис. 3** Импорт нефти  $x$  (1), участковая скорость доставки грузов  $u_3$  (2) и средний рост ВВП  $q_2$  (3)



**Рис. 4** Продифференцированные временные ряды: 1 — импорт нефти  $x$ ; 2 — цена на нефть  $h_1$ ; 3 — курс доллара  $h_2$ ; 4 — скорость доставки грузов  $u_1$ ; 5 — средний вес брутто  $u_2$ ; 6 — участковая скорость доставки грузов  $u_3$ ; 7 — добыча нефти  $q_1$ ; 8 — темп роста ВВП  $q_2$



**Рис. 5** Кросс-корреляционные диаграммы для пар рядов  $(\mathbf{x}, \mathbf{h}_1)$  (a) и  $(\mathbf{x}, \mathbf{h}_2)$  (б)

## 5.1 Кросс-корреляция рядов

Вычислим кросс-корреляцию для всех исследуемых пар рядов. Для примера приведем кросс-корреляционные диаграммы для пар рядов  $(\mathbf{x}, \mathbf{h}_1)$  и  $(\mathbf{x}, \mathbf{h}_2)$  (рис. 5).

В табл. 3 приведены найденные с помощью вычисления кросс-корреляции значения сдвигов рядов друг относительно друга. Для каждой пары рядов  $(\mathbf{x}, \mathbf{y})$  приведено значение  $h$  такое, что значение  $\gamma_{xy}(h)$  максимально.

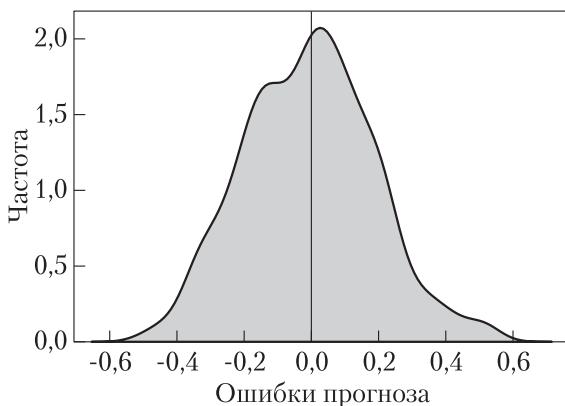
**Таблица 3** Относительные сдвиги для различных пар рядов

Пары рядов	Сдвиг $h$
$(\mathbf{x}, \mathbf{h}_1)$	1
$(\mathbf{x}, \mathbf{h}_2)$	-24
$(\mathbf{x}, \mathbf{u}_1)$	-2
$(\mathbf{x}, \mathbf{u}_2)$	16
$(\mathbf{x}, \mathbf{u}_3)$	-19
$(\mathbf{q}_1, \mathbf{x})$	24
$(\mathbf{q}_2, \mathbf{x})$	19

## 5.2 Выбор функции потерь

Для оценки качества прогноза необходимо выбрать функцию потерь. Это делается, исходя из распределения ошибок прогноза. Найдем распределение ошибок прогноза рядов. Для примера на графике рис. 6 представлено распределение ошибок при прогнозе ряда  $\mathbf{x}$ .

Видно, что распределение ошибок несимметрично, поэтому надо подбирать функционал ошибки как суперпозицию функционалов (MSE, MAE, MAPE). В данной работе эта проблема не исследуется и в качестве функционала ошибки используется MSE.



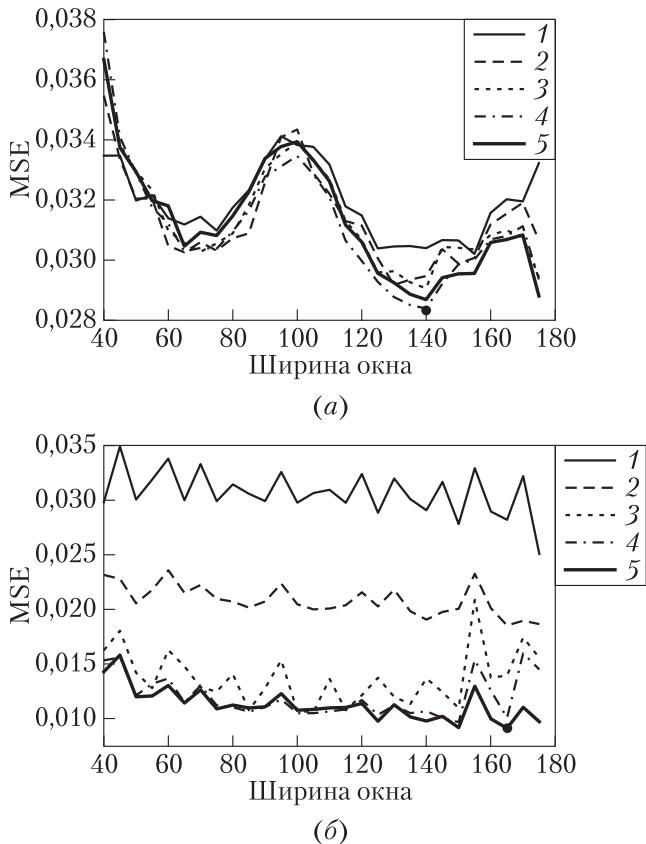
**Рис. 6** Распределение ошибок прогноза ряда  $\mathbf{x}$

## 5.3 Выбор оптимальных параметров модели

Для проведения теста Гренджера построим прогноз временных рядов. В качестве прогностической модели выбрана MSSA-L. Подберем оптимальные параметры модели для каждой исследуемой пары рядов. Для этого найдем среднеквадратичную ошибку (MSE, mean square error) прогноза при различных значениях ширины окна  $L$  и ранга восстановления  $r$ .

Ширина окна перебирается по сетке  $40, 45, \dots, 175$ . Ранг восстановления  $r$  перебирается по сетке  $3, 4, \dots, 7$ . При построении прогноза по двум рядам будем сдвигать один из них на число отсчетов  $h$ , найденное в подразд. 5.1 при помощи кросс-корреляции.

Приведем график зависимости MSE от ширины окна  $L$  для различных значений  $r$  при прогнозировании ряда  $\mathbf{x}$  с использованием ряда  $\mathbf{h}_1$  (рис. 7,  $a$ ), а также при прогнозировании ряда  $\mathbf{q}_1$  с использованием ряда  $\mathbf{x}$  (рис. 7,  $b$ ).



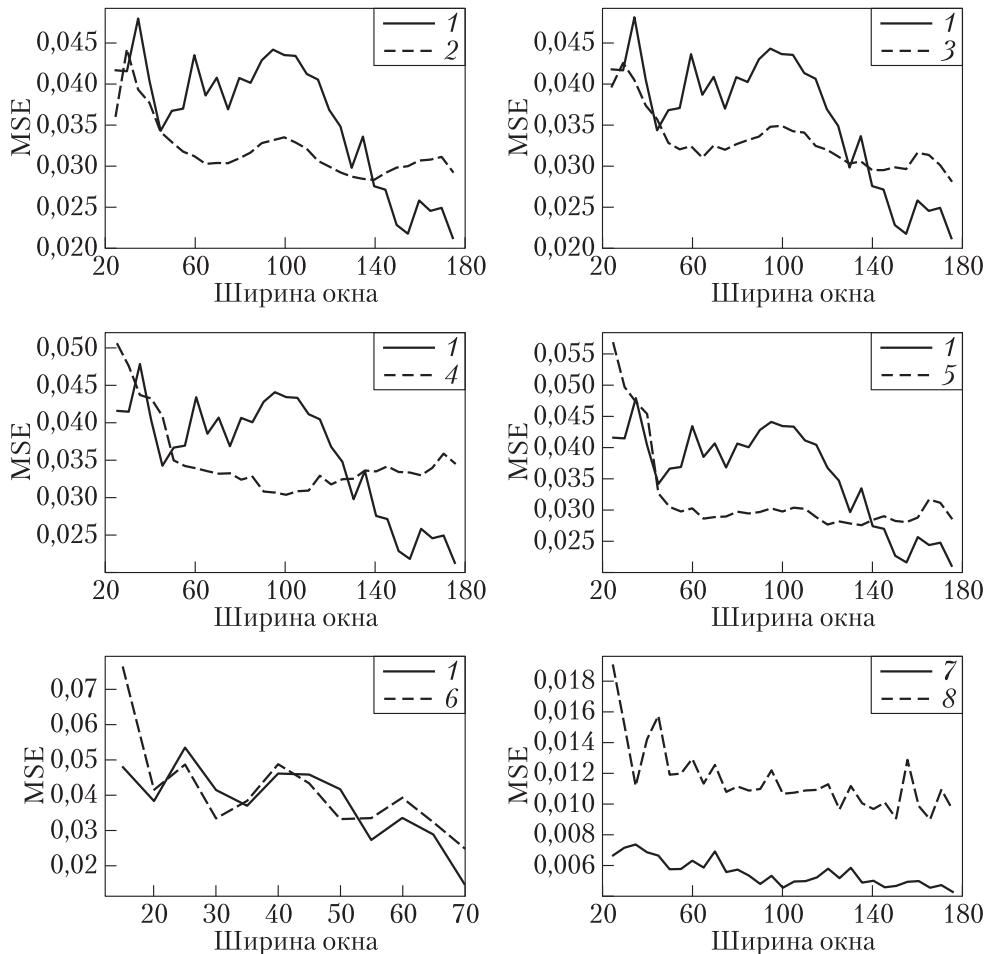
**Рис. 7** Среднеквадратичные ошибки прогнозов импорта нефти  $\mathbf{x}$  с использованием ряда цен на нефть  $\mathbf{h}_1$  (а) и добычи нефти  $\mathbf{q}_1$  с использованием ряда импорта нефти  $\mathbf{x}$  (б): 1 —  $r = 3$ ; 2 — 4; 3 — 5; 4 — 6; 5 —  $r = 7$

#### 5.4 Тест Гренджера

Исследуем зависимость объема грузоперевозок от экзогенных факторов и факторов управления, а также зависимость целевых критериев от объема грузоперевозок с помощью теста Гренджера.

На рис. 8 представлена среднеквадратичная ошибка прогноза от длины окна  $L$  при отобранных в предыдущем пункте оптимальных значениях ранга восстановления  $r$ .

Для каждой рассматриваемой пары рядов проверим гипотезу независимости. Для этого найдем для каждой пары значение статистики  $T$ :

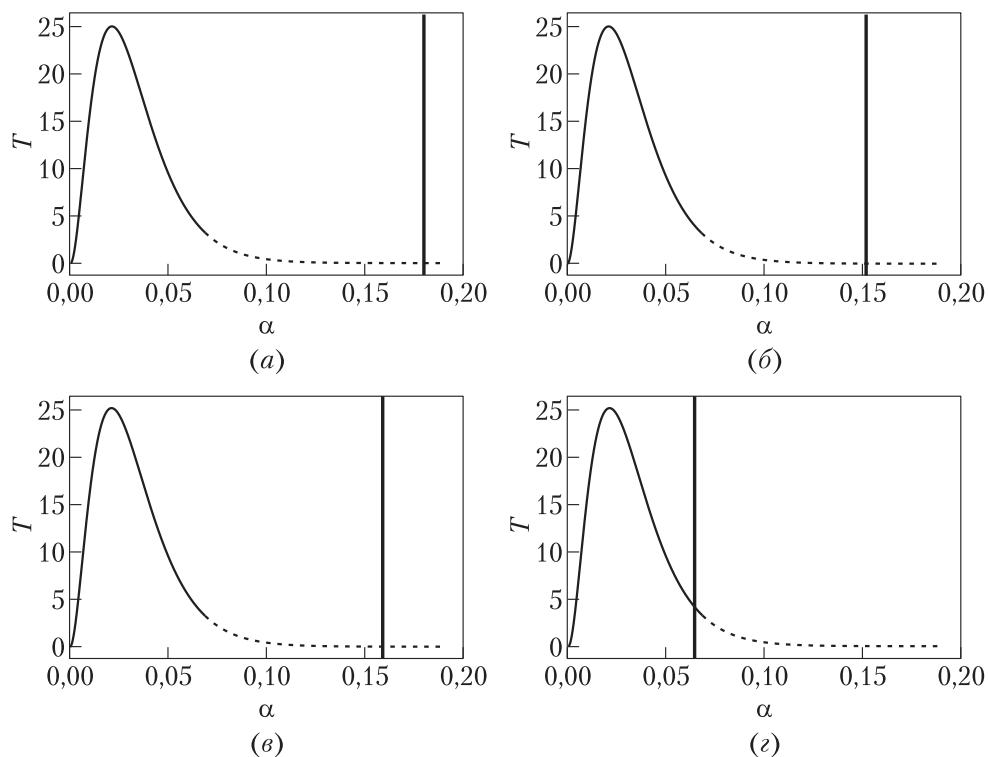


**Рис. 8** Среднеквадратичная ошибка прогноза по  $\mathbf{x}$  (1),  $(\mathbf{x}, \mathbf{h}_1)$  (2),  $(\mathbf{x}, \mathbf{h}_2)$  (3),  $(\mathbf{x}, \mathbf{u}_1)$  (4),  $(\mathbf{x}, \mathbf{u}_2)$  (5),  $(\mathbf{x}, \mathbf{u}_3)$  (6),  $\mathbf{q}_1$  (7) и  $(\mathbf{q}_1, \mathbf{x})$  (8)

$$T(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \frac{N - 2k}{k} \frac{\text{MSE}_{\mathbf{x}} - \text{MSE}_{\mathbf{xy}}}{\text{MSE}_{\mathbf{xy}}}, \quad \text{MSE}_{\mathbf{x}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \|\mathbf{x}_i - \hat{\mathbf{x}}_i\|_2^2, \quad (2)$$

где  $k$  — размерность регрессионной модели;  $N$  — длина обучающей выборки.

На рис. 9 представлено распределение статистики  $T$  и ее значения, полученные в эксперименте для различных пар рядов. Пунктиром выделена область, соответствующая  $p\text{-value} = 0,05$ .



**Рис. 9** Значения статистики  $T$  для пар рядов  $(\mathbf{x}, \mathbf{h}_1)$  (a),  $(\mathbf{x}, \mathbf{h}_2)$  (б),  $(\mathbf{x}, \mathbf{u}_1)$  (в) и  $(\mathbf{x}, \mathbf{u}_2)$  (г)

Для остальных рассматриваемых пар рядов значения статистики  $T$  получились отрицательными. Это означает, что в этих парах ряды независимы. Из графиков видно, что на уровне значимости  $\alpha = 0,05$  можно утверждать, что импорт нефти ( $\mathbf{x}$ ) зависит от курса доллара ( $\mathbf{h}_1$ ), цены на нефть ( $\mathbf{h}_2$ ) и скорости доставки грузов ( $\mathbf{u}_1$ ), а от среднего веса брутто ( $\mathbf{u}_2$ ) не зависит.

В табл. 4 приведены результаты эксперимента. Для каждой тройки рядов (экзогенный фактор, фактор управления и целевой критерий) приведено найденное в эксперименте значение статистики  $T$  и вывод о наличии связи между состоянием и экзогенным фактором, состоянием и фактором управления, целевым критерием и состоянием.

## 6 Заключение

Решалась задача проверки зависимости объема грузоперевозок от экзогенных и управляемых факторов, а также зависимости целевых критериев от объема

**Таблица 4** Значения статистики  $T$  для различных пар рядов

Рассмотренные ряды	Исследованные зависимости		
	(x, h)	(x, u)	(q, x)
Цена на нефть ( $h_1$ ) Скорость доставки грузов ( $u_1$ ) Добыча нефти ( $q_1$ )	$T = 0,80$ $x$ зависит от $h_1$	$T = 0,159$ $x$ зависит от $u_1$	$T < 0$ $q_1$ не зависит от $x$
Курс доллара ( $h_2$ ) Скорость доставки грузов ( $u_1$ ) Добыча нефти ( $q_1$ )	$T = 0,153$ $x$ зависит от $h_2$	$T = 0,159$ $x$ зависит от $u_1$	$T < 0$ $q_1$ не зависит от $x$
Цена на нефть ( $h_1$ ) Средний вес брутто ( $u_2$ ) Добыча нефти ( $q_1$ )	$T = 0,180$ $x$ зависит от $h_1$	$T = 0,065$ $x$ не зависит от $u_2$	$T < 0$ $q_1$ не зависит от $x$
Курс доллара ( $h_2$ ) Средний вес брутто ( $u_2$ ) Добыча нефти ( $q_1$ )	$T = 0,153$ $x$ зависит от $h_2$	$T = 0,065$ $x$ не зависит от $u_2$	$T < 0$ $q_1$ не зависит от $x$
Цена на нефть ( $h_1$ ) Средняя участковая скорость ( $u_3$ ) Добыча нефти ( $q_1$ )	$T = 0,180$ $x$ зависит от $h_1$	$T < 0$ $x$ не зависит от $u_3$	$T < 0$ $q_1$ не зависит от $x$
Курс доллара ( $h_2$ ) Средняя участковая скорость ( $u_3$ ) Добыча нефти ( $q_1$ )	$T = 0,153$ $x$ зависит от $h_2$	$T < 0$ $x$ не зависит от $u_3$	$T < 0$ $q_1$ не зависит от $x$
Цена на нефть ( $h_1$ ) Скорость доставки грузов ( $u_1$ ) Темп роста ВВП ( $q_2$ )	$T = 0,180$ $x$ зависит от $h_1$	$T = 0,159$ $x$ зависит от $u_1$	$T < 0$ $q_2$ не зависит от $x$
Курс доллара ( $h_2$ ) Скорость доставки грузов ( $u_1$ ) Темп роста ВВП ( $q_2$ )	$T = 0,153$ $x$ зависит от $h_2$	$T = 0,159$ $x$ зависит от $u_1$	$T < 0$ $q_2$ не зависит от $x$
Цена на нефть ( $h_1$ ) Средний вес брутто ( $u_2$ ) Темп роста ВВП ( $q_2$ )	$T = 0,180$ $x$ зависит от $h_1$	$T = 0,065$ $x$ не зависит от $u_2$	$T < 0$ $q_2$ не зависит от $x$
Курс доллара ( $h_2$ ) Средний вес брутто ( $u_2$ ) Темп роста ВВП ( $q_2$ )	$T = 0,153$ $x$ зависит от $h_2$	$T = 0,065$ $x$ не зависит от $u_2$	$T < 0$ $q_2$ не зависит от $x$
Цена на нефть ( $h_1$ ) Средняя участковая скорость ( $u_3$ ) Темп роста ВВП ( $q_2$ )	$T = 0,180$ $x$ зависит от $h_1$	$T < 0$ $x$ не зависит от $u_3$	$T < 0$ $q_2$ не зависит от $x$
Курс доллара ( $h_2$ ) Средняя участковая скорость ( $u_3$ ) Темп роста ВВП ( $q_2$ )	$T = 0,153$ $x$ зависит от $h_2$	$T < 0$ $x$ не зависит от $u_3$	$T < 0$ $q_2$ не зависит от $x$

грузоперевозок. Исследуемые ряды факторов управления и целевых критериев отбирались согласно экспертным высказываниям о наличии причинно-следственной связи между этими рядами и объемом грузоперевозок. Ставилась задача проверки достоверности экспертных оценок зависимостей рядов. В работе про-

веден тест Гренджера для установления взаимосвязи между рядами показателей грузоперевозок. Была исследована зависимость импорта нефти от цены на нефть, курса доллара, средней скорости доставки грузов, средней участковой скорости доставки грузов, среднего веса брутто, а также зависимость добычи нефти и темпа роста ВВП от импорта нефти. В эксперименте было показано, что импорт нефти зависит от цены на нефть, курса доллара, скорости доставки грузов, а от средней участковой скорости и среднего веса брутто не зависит. Также было установлено, что добыча нефти и темп роста ВВП не зависят от импорта нефти. Таким образом, результаты эксперимента показывают, что объем грузоперевозок зависит не от всех факторов управления и что рассмотренные целевые критерии не зависят от объема грузоперевозок. В дальнейшем предполагается обсуждение полученных результатов с экспертами, а также возможное изменение подхода к исследованию зависимостей между рядами.

## Литература

1. *Granger C. W. J.* Investigating causal relations by econometric models and cross-spectral methods // *Econometrica*, 1969. Vol. 37. No. 3. P. 424–438.
2. *Barrett A. B., Barnett L., Seth A. K.* Multivariate Granger causality and generalized variance // *Phys. Rev. E*, 2010. Vol. 81. No. 4. P. 041907.
3. *Hiemstra C., Jones J. D.* Testing for linear and nonlinear Granger causality in the stock price-volume relation // *J. Financ.*, 1994. Vol. 49. No. 5. P. 1639–1664.
4. *Hoffmann R., Lee C.-G., Ramasamy B., Yeung M.* FDI and pollution: A Granger causality test using panel data // *J. Int. Dev.*, 2005. Vol. 17. No. 3. P. 311–317.
5. *Golyandina N., Stepanov D.* SSA-based approaches to analysis and forecast of multi-dimensional time series // 5th St. Petersburg Workshop on Simulation Proceedings, 2005. Vol. 293. P. 298.
6. *Golyandina N., Nekrutkin V., Zhigljavsky A. A.* Analysis of time series structure: SSA and related techniques. — Chapman and Hall, 2002. 320 p.
7. *Golyandina N., Zhigljavsky A.* Singular spectrum analysis for time series. — Springer Science & Business Media, 2013. 120 p.
8. *Elsner J. B., Tsonis A. A.* Singular spectrum analysis: A new tool in time series analysis. — Springer Science & Business Media, 2013. 164 p.
9. *Alexandrov T.* A method of trend extraction using singular spectrum analysis // *REVSTAT Stat. J.*, 2009. Vol. 7. No. 1. P. 1–22.
10. *Allen M. R., Smith L. A.* Monte Carlo SSA: Detecting irregular oscillations in the presence of colored noise // *J. Climate*, 1996. Vol. 9. No. 12. P. 3373–3404.
11. *Marques C. A. F., Ferreira J. A., Rocha A., Castanheira J. M., Melo-Gonccalves P., Vaz N., Dias J. M.* Singular spectrum analysis and forecasting of hydrological time series // *Phys. Chem. Earth*, 2006. Vol. 31. No. 18. P. 1172–1179.
12. *Hassani H., Heravi S., Zhigljavsky A.* Forecasting UK industrial production with multivariate singular spectrum analysis // *J. Forecasting*, 2013. Vol. 32. No. 5. P. 395–408.

13. Исходный код эксперимента к работе «Анализ зависимостей между показателями при прогнозировании объема грузоперевозок» (модуль на Python и Jupyter-ноутбук). <http://svn.code.sf.net/p/mlalgorithms/code/Group474/Usmanova2017TransportationQueryForecasting>.

*Поступила в редакцию 27.03.18*

---

## **ANALYSIS OF RELATIONSHIPS BETWEEN INDICATORS IN FORECASTING CARGO TRANSPORTATION**

***K. R. Usmanova<sup>1</sup>, S. P. Kudiyarov<sup>2</sup>, R. V. Martyshkin<sup>2</sup>, A. A. Zamkovoy<sup>2</sup>,  
and V. V. Strijov<sup>3</sup>***

<sup>1</sup>Moscow Institute of Physics and Technology, 9 Institutskiy Per., Dolgoprudny, Moscow Region 141701, Russian Federation

<sup>2</sup>Joint Stock Company “Institute of Economics and Transport Development,” 24 Novoryazanskaya Str., Moscow 105066, Russian Federation

<sup>3</sup>A. A. Dorodnicyn Computing Center, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 40 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation

**Abstract:** The authors analyze relationship and conformity between indicators in control system, monitoring of state, and accounting of railway cargo transportation. Macroeconomic time series that contain control actions, system state, and target criteria are considered. The authors suppose that control actions, state, and goal-setting are statistically related. Granger causality test is used to establish a relationship between time series. It is assumed that a pair of time series are related if the use of the history of one of the series improves the quality of the forecast of the other. The main goal of this analysis is to improve the quality of cargo transportation forecast. The computational experiment is carried out on data about cargo transportation, control actions, and set target criteria.

**Keywords:** time series; forecasting; Granger causality test; control system; target criteria

**DOI:** 10.14357/08696527180307

### **Acknowledgments**

The work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (projects 17-20-01212 and 17-20-01184).

### **References**

1. Granger, C. W. J. 1969. Investigating causal relations by econometric models and cross-spectral methods. *Econometrica* 37(3):424–438.
2. Barrett, A. B., L. Barnett, and A. K. Seth. 2010. Multivariate Granger causality and generalized variance. *Phys. Rev. E* 81(4):041907.

3. Hiemstra, C., and J. D. Jones. 1994. Testing for linear and nonlinear Granger causality in the stock price-volume relation. *J. Financ.* 49(5):1639–1664.
4. Hoffmann, R., C.-G. Lee, B. Ramasamy, and M. Yeung. 2005. FDI and pollution: A Granger causality test using panel data. *J. Int. Dev.* 17(3):311–317.
5. Golyandina, N., and D. Stepanov. 2005. SSA-based approaches to analysis and forecast of multidimensional time series. *5th St. Petersburg Workshop on Simulation Proceedings*. 293:298.
6. Golyandina, N., V. Nekrutkin, and A. A. Zhigljavsky. 2002. *Analysis of time series structure: SSA and related techniques*. Chapman and Hall. 320 p.
7. Golyandina, N., and A. Zhigljavsky. 2013. *Singular spectrum analysis for time series*. Springer Science & Business Media. 120 p.
8. Elsner, J. B., and A. A. Tsonis. 2013. *Singular spectrum analysis: A new tool in time series analysis*. Springer Science & Business Media. 164 p.
9. Alexandrov, T. 2009. A method of trend extraction using singular spectrum analysis. *REVSTAT Stat. J.* 7(1):1–22.
10. Allen, M. R., and L. A. Smith. 1996. Monte Carlo SSA: Detecting irregular oscillations in the presence of colored noise. *J. Climate* 9(12):3373–3404.
11. Marques, C. A. F., J. A. Ferreira, A. Rocha, J. M. Castanheira, P. Melo-Gonccalves, N. Vaz, and J. M. Dias. 2006. Singular spectrum analysis and forecasting of hydrological time series. *Phys. Chem. Earth* 31(18):1172–1179.
12. Hassani, H., S. Heravi, and A. Zhigljavsky. 2013. Forecasting UK industrial production with multivariate singular spectrum analysis. *J. Forecasting* 32(5):395–408.
13. Source code of the experiment for paper “Analysis of relationships between indicators in forecasting cargo transportation.” Available at: <http://svn.code.sf.net/p/mlalgorithms/code/Group474/Usmanova2017TransportationQueryForecasting> (accessed August 27, 2018)

Received March 27, 2018

## Contributors

**Usmanova Karina R.** (b. 1996) — student, Moscow Institute of Physics and Technology, 9 Institutskiy Per., Dolgoprudny, Moscow Region 141701, Russian Federation; karina.usmanova@phystech.edu

**Kudiyarov Sergey P.** (b. 1988) — senior specialist, Institute of Economics and Transport Development, 24 Novoryazanskaya Str., Moscow 105066; s.kudiyarov@gmail.com

**Martyshkin Roman V.** (b. 1987) — Candidate of Science (PhD) in psychology, Head of Sector, Institute of Economics and Transport Development, 24 Novoryazanskaya Str., Moscow 105066; martyshkinrv@mail.ru

**Zamkovoy Alexey A.** (b. 1978) — Candidate of Science (PhD) in economics, Head of Department, Institute of Economics and Transport Development, 24 Novoryazanskaya Str., Moscow 105066; rtr@iert.com.ru

**Strijov Vadim V.** (b. 1967) — Doctor of Science in physics and mathematics, leading scientist, A. A. Dorodnicyn Computing Centre, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 40 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation; strijov@ccas.ru

## НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБЛАЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ\*

*А. А. Зацаринный<sup>1</sup>, Ю. С. Ионенков<sup>2</sup>, А. П. Сучков<sup>3</sup>*

**Аннотация:** Статья посвящена вопросам оценки эффективности облачных технологий с учетом их специфики. Рассмотрены основные характеристики и особенности облачных технологий, влияющие на их эффективность. Предложены обобщенные и частные показатели эффективности, учитывающие риски и уязвимости при внедрении облачных технологий. Представлены математические модели показателей эффективности облачных технологий, используемые при расчетах. Разработана методика оценки эффективности облачных технологий, использующая совокупность множества количественных данных, характеризующих все стороны технологий, в сочетании с применением экспертных оценок. Приведен пример оценки экономической эффективности внедрения облачных технологий.

**Ключевые слова:** облачные технологии; модель обслуживания; эффективность; показатель; критерий; ситуационный центр

**DOI:** 10.14357/08696527180308

### 1 Введение

В настоящее время наблюдается активное развитие и внедрение облачных технологий. Облачные технологии — это технологии распределенной обработки данных, в которой компьютерные ресурсы и мощности предоставляются пользователю как интернет-сервис. Облачные технологии позволяют получить доступ к информации в любое время и из любого места, сокращают затраты на создание информационной инфраструктуры. В 2017 г. уже более 75% расходов российских предприятий на информационные технологии связаны с облачными технологиями. Аналитики утверждают, что развитие программы «Цифровая экономика» будет способствовать дальнейшему расширению сферы применения облачных технологий [1].

На рынке информационных технологий можно найти немало предложений в сфере облачных технологий. При этом весьма важной задачей является выбор лучших альтернатив из всего спектра предложений с учетом технических,

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

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

<sup>2</sup>Институт проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук, uionenkov@ipiran.ru

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

экономических и других факторов, а также рисков внедрения. С этой целью необходима разработка методов поддержки принятия решений при выборе облачных технологий. Это может быть сделано на основе оценки эффективности соответствующих продуктов и технологий.

Таким образом, весьма актуальной задачей является создание методологической базы количественной оценки эффективности облачных технологий, которая в существующей научно-технической литературе представлена недостаточно. Целью настоящей статьи является анализ основных особенностей облачных технологий, формирование на этой основе перечня показателей их эффективности, а также разработка предложений по методике расчета обобщенных показателей эффективности облачных технологий.

## 2 Общие подходы к оценке эффективности облачных технологий

Использование технологий облачных вычислений создает условия для существенного снижения капитальных расходов на построение центров обработки данных (ЦОД), закупку серверного и сетевого оборудования. Кроме того, длительное время построения и ввода в эксплуатацию крупных объектов инфраструктуры информационных технологий и высокая их начальная стоимость ограничивают способность потребителей гибко реагировать на требования рынка, тогда как облачные технологии обеспечивают возможность гибко и оперативно реагировать на увеличение спроса на вычислительные мощности.

При использовании облачных технологий реализуется множество моделей обслуживания, основными из которых являются [2, 3]:

- программное обеспечение как услуга (*SaaS*, англ. Software-as-a-Service) — модель, в которой потребителю предоставляется возможность использования прикладного программного обеспечения провайдера, работающего в облачной инфраструктуре и доступного с различных клиентских устройств);
- платформа как услуга (*PaaS*, англ. Platform-as-a-Service) — модель, когда потребителю предоставляется возможность использования облачной инфраструктуры для размещения базового программного обеспечения для последующего размещения на нем новых или существующих приложений (собственных, разработанных на заказ или приобретенных тиражируемых приложений);
- инфраструктура как услуга (*IaaS*, англ. Infrastructure-as-a-Service) — предоставляет возможность использования облачной инфраструктуры для самостоятельного управления ресурсами обработки, хранения, сетей и другими фундаментальными вычислительными ресурсами.

Согласно общепринятым требованиям Национального института стандартов и технологий США определены следующие основные характеристики облачных технологий:

- широкая сетевая доступность. Доступ к ресурсам может осуществляться с различных типов оконечных устройств (компьютеры, планшеты, телефоны и т. п.);
- легкая масштабируемость. При необходимости подключаются к работе дополнительные аппаратные или программные ресурсы;
- возможность мониторинга. Облако оснащено системой мониторинга и может быть оценено с точки зрения доступности и стабильности работы;
- самообслуживание. При необходимости пользователь может дополнить либо изменить набор используемых ресурсов без непосредственного контакта с провайдером;
- объединение ресурсов. Облачные технологии подразумевают динамическое изменение объема используемых аппаратных ресурсов.

На основе анализа особенностей облачных технологий может быть предложен ряд обобщенных показателей для оценки их эффективности.

К числу основных преимуществ облачных технологий наиболее часто относят экономические, включая снижение затрат на организацию ЦОД и их техническое обслуживание, на организацию собственной информационной инфраструктуры (каналы связи), а также на содержание обслуживающего персонала. Исходя из этого, в состав обобщенных показателей целесообразно включить экономичность, которая будет характеризовать экономический эффект от внедрения облачных технологий.

Информационная безопасность очень важна в информационных технологиях. Особенno актуальна она для облачных ресурсов, предоставляемых дистанционно широкому кругу клиентов. Это обуславливает необходимость разграничения прав пользователей, изоляции данных и программных продуктов, защиты средств управления виртуальной инфраструктурой и других мер защиты информации. Кроме того, применение технологии облачных вычислений порождает новые угрозы информационной безопасности и требует существенного изменения подходов и принципов обеспечения защиты информации [4, 5]. Таким образом, в состав обобщенных показателей должен быть включен показатель информационной безопасности.

При оценке эффективности облачных технологий также необходим учет человеческого фактора. Этот аспект весьма важен, так как эти технологии являются относительно новыми, а любые изменения сопровождаются сопротивлением со стороны части персонала в связи с тем, что люди с подозрением относятся ко всем новшествам, меняющим привычный уклад жизни. Кроме того, создается дополнительная нагрузка на сотрудников, которым необходимо изучить и освоить новые технологии.

Представляется целесообразным использование обобщенного показателя «степень риска», который учитывал бы степень использования провайдером

нормативно-правовых документов в области облачных вычислений, а также реакцию поставщика услуг на неисправности, порядок восстановления данных и т. п. Это обусловлено тем, что вопросы правового регулирования применения облачных технологий к настоящему времени развиты недостаточно.

Наряду с указанными выше обобщенными показателями целесообразно использовать и показатели, традиционно применяемые при оценке информационных систем и технологий — технический и технологический факторы, учитывающие основные характеристики и возможности облачных технологий, предоставляемые клиенту (скорость, производительность, среда работы приложения, удобство интерфейса и др.).

Частные показатели определены на основе анализа научно-технической литературы, посвященной облачным технологиям, информации провайдеров и другой доступной информации.

К числу частных показателей эффективности, характеризующих технический фактор, могут быть отнесены:

- уровень надежности, определяемый соглашением об уровне обслуживания (Service Level Agreements — SLA) между поставщиком услуг и клиентом;
- предоставляемая пользователям скорость обмена информацией;
- масштабируемость, т. е. возможность подключения дополнительных ресурсов;
- наличие дополнительного пространства для хранения информации;
- возможности резервного копирования информации.

Для технологического фактора могут быть предложены следующие частные показатели:

- возможности интеграции приложений;
- развитие среды работы приложений (операционная система, базы данных);
- развитие системы мониторинга, позволяющей оценивать доступность и стабильность работы облака;
- удобство пользовательского интерфейса.

При оценке экономичности могут использоваться следующие показатели:

- расходы на внедрение облачной технологии;
- экономия средств, т. е. сокращение капитальных и операционных затрат при использовании облачных сервисов;
- выгодность использования облачных технологий по сравнению с организацией собственного ЦОД.

Для комплексного показателя «степень риска» предлагаются следующие частные показатели:

- нормативно-правовые вопросы, характеризующие степень соблюдения провайдером законов и правил в области облачных технологий;
- реагирование провайдера на инциденты (происшествия, неисправности);
- совместимость облачных технологий с имеющейся инфраструктурой;
- восстановление данных и их конфиденциальности.

Информационная безопасность характеризуется следующими показателями:

- криптографическая защита данных;
- аутентификация пользователей;
- разграничение прав пользователей;
- антивирусная защита.

Для оценки человеческого фактора могут быть использованы следующие частные показатели:

- готовность сотрудников к внедрению новых технологий;
- уровень подготовки сотрудников в части информационных технологий;
- способность сотрудников к обучению;
- уровень мотивации сотрудников.

В зависимости от видов облачных ресурсов и выбранной модели обслуживания могут быть предложены и другие обобщенные и частные показатели эффективности.

### **3 Модели показателей эффективности облачных технологий**

Для расчета интегрального показателя эффективности облачных технологий используется математическое выражение в виде средневзвешенной суммы обобщенных показателей эффективности их отдельных сторон (факторов):

$$\mathcal{E}_{\text{инт}} = \alpha_1 \mathcal{E}_{\text{техн}} + \alpha_2 \mathcal{E}_{\text{технол}} + \alpha_3 \mathcal{E}_{\text{экон}} + \alpha_4 \mathcal{E}_{\text{риск}} + \alpha_5 \mathcal{E}_{\text{безоп}} + \alpha_6 \mathcal{E}_{\text{чел}}, \quad (1)$$

где  $\alpha_i$  и  $\mathcal{E}_i$  — весовые коэффициенты и показатели эффективности технического ( $\alpha_1$  и  $\mathcal{E}_{\text{техн}}$ ), технологического ( $\alpha_2$  и  $\mathcal{E}_{\text{технол}}$ ), экономического ( $\alpha_3$  и  $\mathcal{E}_{\text{ экон}}$ ), степени риска ( $\alpha_4$  и  $\mathcal{E}_{\text{риск}}$ ), информационной безопасности ( $\alpha_5$  и  $\mathcal{E}_{\text{безоп}}$ ) и человеческого ( $\alpha_6$  и  $\mathcal{E}_{\text{чел}}$ ) факторов.

Обобщенные показатели эффективности для технического, технологического, экономического и человеческого факторов, а также степени риска определяются путем аддитивной свертки частных показателей  $K_{ji}$ , выбранных для каждого фактора:

$$\mathcal{E}_i = \sum_{j=1}^{n_i} \alpha_{ji} K_{ji}, \quad (2)$$

где  $\Theta_i$  — показатель эффективности  $i$ -го фактора;  $n_i$  — число показателей  $i$ -го фактора;  $\alpha_{ji}$  — весовые коэффициенты соответствующих показателей,  $0 \leq \alpha_{ji} \leq 1$ ,  $\sum_{j=1}^{n_i} \alpha_{ji} = 1$ ;  $K_{ji}$  — частные показатели эффективности отдельных элементов системы.

Для расчета обобщенного показателя эффективности в части информационной безопасности используется мультипликативная свертка:

$$\Theta_i = \prod_{j=1}^{n_i} K_{ji}^{\alpha_{ji}}. \quad (3)$$

Применение мультипликативной модели обосновывается тем, что низкие оценки даже по одному—двум показателям в данном случае неприемлемы. Аддитивная свертка здесь не подходит, так как частные показатели в данном случае не компенсируют друг друга.

Для определения частных показателей эффективности для каждого из факторов применяются экспертные оценки. Экспертные оценки представляют собой точки зрения (мнения, суждения) квалифицированных специалистов в определенных предметных областях — экспертов, сформулированные в виде оценок объекта в содержательной, качественной или количественной форме [6]. Качественный и количественный состав экспертов должен формироваться с учетом широты проблемы, достоверности оценок и квалификации экспертов.

Частные показатели эффективности, характеризующие технический фактор, определяются следующим образом:

- уровень надежности, указывается в договоре между поставщиком услуг и клиентом (как правило, более 99%);
- скорость обмена информацией, масштабируемость, дополнительное пространство для хранения информации, возможности резервного копирования определяются как отношение предлагаемого поставщиком услуг значения к требуемому:

$$\Theta_i = \frac{N}{N_{\text{тр}}}. \quad (4)$$

Частные показатели эффективности для технического, технологического, экономического и человеческого факторов, а также степени риска определяются экспертным путем по десятибалльной шкале и приводятся к значениям от 0 до 1.

При оценке экономичности расходы на внедрение облачной технологии и экономия средств определяются путем расчетов для конкретного варианта технологии. Выгодность использования облачных технологий определяется по формуле [7]:

$$t_{\text{обл}}(T_r - P_{\text{ч.обл}}) \geq t_{\text{ЦОД}} \left( T_r - \frac{P_{\text{ч.ЦОД}}}{U} \right), \quad (5)$$

где  $t_{\text{обл}}$  — использованные часы облака;  $T_r$  — доход;  $P_{\text{ч.обл}}$  — стоимость одного часа облака;  $t_{\text{ЦОД}}$  — использованные часы ЦОД;  $P_{\text{ч.ЦОД}}$  — стоимость одного часа ЦОД;  $U$  — средняя загрузка ЦОД.

Найденные значения частных показателей переводятся в баллы по десятибалльной шкале и приводятся к значениям от 0 до 1.

Весовые коэффициенты определяются экспертыным путем, в том числе с использованием математических методов (например, метод попарных сравнений и т. п.). Метод попарных сравнений достаточно подробно описан в [8, 9].

## **4 Методический подход к оценке эффективности облачных технологий**

В рамках представленного выше подхода для оценки эффективности облачных технологий предлагается следующая методика.

**Шаг 1.** Осуществляется сбор исходных данных. Этот шаг включает сбор данных, характеризующих все шесть указанных выше групп факторов, характеризующих облачные технологии.

**Шаг 2.** Формирование экспертной группы.

**Шаг 3.** Определение частных показателей качества экспертами по десятибалльной шкале и их нормирование относительно максимального значения (10). Нормированные показатели получают значения от 0 до 1. Кроме того, оценка может производиться как отношение реального значения показателя к его требуемому по формуле (4). Выгодность использования облачных технологий определяется по формуле (5).

**Шаг 4.** Определение экспертным способом весовых коэффициентов частных показателей качества с применением метода попарных сравнений. Весовые коэффициенты получают значения в интервале от 0 до 1. При этом сумма весовых коэффициентов частных показателей качества по каждому из факторов равна единице.

**Шаг 5.** Производится расчет обобщенных показателей качества в соответствии с выбранной математической моделью по формуле (2) или (3).

**Шаг 6.** Определяются экспертным способом весовые коэффициенты обобщенных показателей качества. Назначение весовых коэффициентов проводится по тем же правилам, что и на шаге 4.

**Шаг 7.** По формуле (1) производится расчет интегрального показателя эффективности облачных технологий.

**Шаг 8.** На основе анализа полученных результатов выбирается лучший вариант из представленных либо формулируются рекомендации по совершенствованию характеристик рассматриваемых вариантов облачных технологий.

## 5 Оценка эффективности облачных технологий для создания предметно-ориентированной системы ситуационного управления (ситуационного центра)

Предпосылками для создания системы управления как общедоступной мультисервисной технологии в облачной среде являются существующие модели обслуживания IaaS и DaaS (Desktop as a Service), позволяющие реализовать определенную инфраструктуру (серверы, рабочие места, хранилища, базы данных) и специализированные рабочие места с прикладным программным обеспечением, реализующие необходимый функционал. Услуга IaaS предоставляет возможность конструировать ИТ-инфраструктуру и управлять ею. Самые известные IaaS-решения: Amazon Cloud Formation [10], Google Compute Engine [11], Windows Azure [12]. При предоставлении услуги DaaS клиенты получают полностью готовые к работе (под ключ) специализированные виртуальные рабочие места, которые каждый пользователь имеет возможность дополнительного настраивать под свои задачи и получает доступ не к отдельной программе, а к необходимому для полноценной работы программному комплексу. Такой подход используется в Amazon WorkSpaces [13], Oracle Virtual Desktop Infrastructure [14].

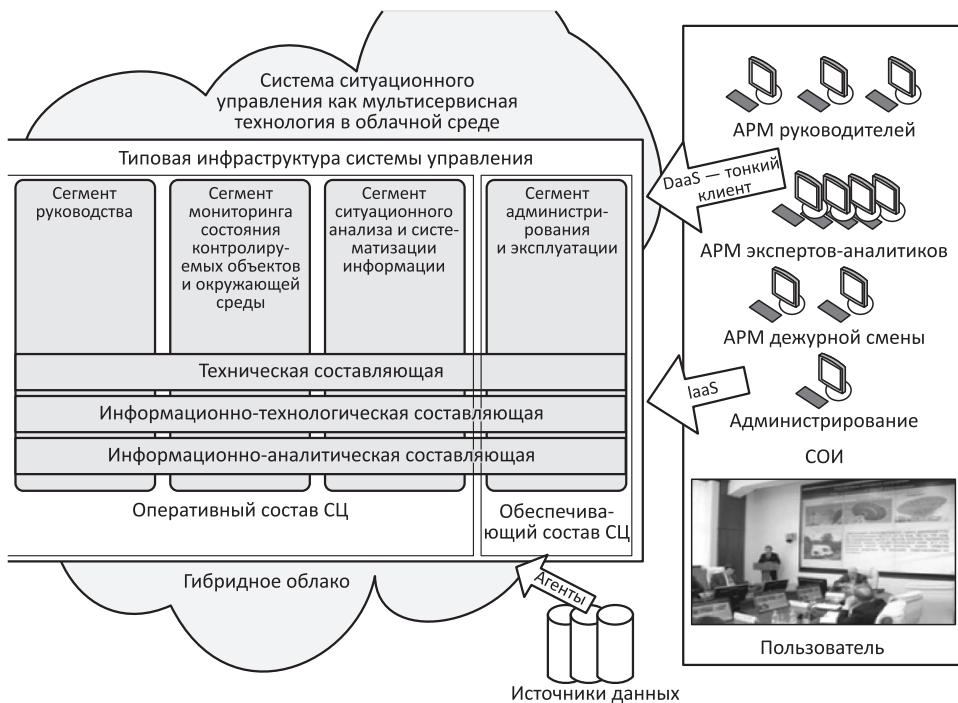
Как обосновано в [15], реализация мультисервисной технологии предполагает наличие у провайдера типовой инфраструктуры системы управления, предоставляемой пользователю в модели обслуживания IaaS, инструментального и прикладного программного обеспечения, размещаемого на специализированных рабочих местах, доступ пользователя к которым осуществляется в режиме «тонкого клиента».

С точки зрения реализации функционала облачной системы управления в рамках услуги DaaS целесообразно создание специализированных рабочих мест в соответствии с организационной структурой ситуационного центра (СЦ) (рис. 1):

- сегмент руководства — лиц, принимающих решения, реализующий группу сервисов целеполагания и решения;
- сегмент мониторинга состояния контролируемых объектов и окружающей среды (оперативная дежурная служба), реализующий группу сервисов мониторинга;
- сегмент ситуационного анализа и систематизации информации, реализующий группу сервисов анализа и действия;
- сегмент администрирования, реализующий группу сервисов локализации.

После создания и оснащения инфраструктуры запускаются интерактивные процессы локализации: осуществляется настройка информационной модели предметной области и компонентов системы под нужды заказчика (адаптеры, документооборот, аналитические приложения).

Активация системы осуществляется с запуском сервисов мониторинга контролируемого пространства системы управления.



**Рис. 1** Реализация СЦ в облачной среде (СОИ — система обработки информации)

Оценим экономические показатели для случая создания ситуационного центра по классической схеме (с закупкой программно-технических средств) и в случае создания центра на основе облачных технологий при условии одинаковых технических и технологических характеристик центров. Примем число автоматизированных рабочих мест (АРМ) равным 30.

По опыту выполнения проектов ФИЦ ИУ РАН [16], стоимость разработки такого СЦ составляет 15–17 млн руб., а среднегодовая стоимость эксплуатации — порядка 18 млн руб., включая порядка 4,5 млн руб. на содержание обслуживающего персонала.

Стоимость аренды виртуальных ресурсов оценим на примере облачных услуг, предоставляемых ПАО «Ростелеком» [17]. Данный провайдер предлагает универсальное облачное решение по предоставлению вычислительной и сетевой инфраструктуры на технологиях Windows Server 2012 R2 с гипервизором Hyper-V. Стоимость аренды виртуальных машин (для одной машины, 8 ядер) в Москве составляет порядка 500 руб. в сутки. Тогда стоимость аренды 30 виртуальных машин составит порядка 15 000 руб. в сутки или 5,5 млн руб. в год.

Внедрение облачных технологий позволяет не только полностью отказаться от расходов, связанных с закупкой и последующей эксплуатацией собственного

## Расходы на создание и эксплуатацию СЦ

Вариант СЦ	Единовременные затраты, млн руб.	Ежегодные эксплуатационные расходы, млн руб.	Общие расходы за 5 лет, млн руб.
Собственный СЦ	16,0	18,0	106,0
Аренда виртуальных ресурсов	2,5 (локализация)	7,5	40,0

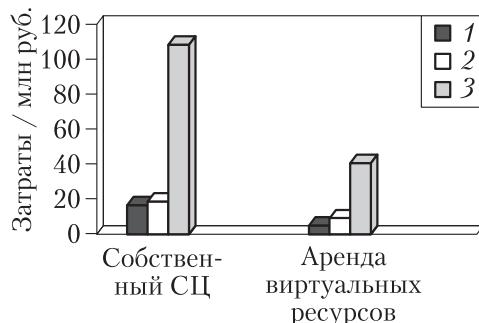
оборудования, но и экономить на заработной плате тех сотрудников, которые преимущественно отвечают за работу оборудования, а не приложений. Оценки показывают, что содержание обслуживающего персонала для СЦ в виртуальной среде составит порядка 2 млн руб. в год. Затраты на локализацию облачной среды составят порядка 2,5 млн руб.

Все расходы по двум описанным выше вариантам создания СЦ сведены в таблицу.

Результаты расчетов представлены на рис. 2.

Значительный экономический эффект от использования облачных технологий может быть достигнут при создании систем СЦ, обладающих схожей функциональностью. Такие «системы систем» создаются при автоматизации процессов управления в иерархических ведомственных и корпоративных системах, а также при создании системы распределенных центров, работающих по единому регламенту в национальном масштабе. Применение гибридных облачных структур на среднем уровне управления позволит, создавая типовые СЦ для нижестоящего уровня, на порядок снизить расходы по их созданию и эксплуатации. При этом расходы на локализацию унифицированных облачных СЦ сводятся к минимуму после локализации первого же СЦ. В настоящий момент, к сожалению, создание региональных СЦ осуществляется каждый раз практически с нуля, несмотря на то что функциональность их очень схожа.

Таким образом, применение облачных решений и создание СЦ на их основе позволяют существенно снизить среднегодовые эксплуатационные расходы (как минимум в 2 раза, а в случае создания систем СЦ — в десятки раз) по сравнению с традиционной моделью, предполагающей создание собственных СЦ. Вместе с тем при выборе облачных технологий основным вопросом остается обеспечение их информационной безопасности. Это один из вопросов, который



**Рис. 2** Результаты расчета экономической эффективности создания СЦ: 1 — единовременные затраты; 2 — ежегодные затраты; 3 — расходы за 5 лет

сдерживает массовый переход к облачной платформе и который предстоит решать в ближайшем будущем.

## **6 Заключение**

Внедрение и использование информационных технологий требует объективной оценки их состояния и выявления проблемных аспектов. Тем более это актуально для такой быстроразвивающейся области, как облачные технологии, обладающие наряду с рядом преимуществ и присущими им рисками и уязвимостями. Для решения указанной задачи в статье предложен перечень обобщенных и частных показателей эффективности, на основе которых разработана методика оценки эффективности облачных технологий, учитывающая совокупность множества количественных данных о функционировании автоматизированных систем в сочетании с применением экспертных оценок.

Предложенная методика позволяет оценить эффективность облачных технологий в различных условиях применения и оценить их вклад в эффективность организационной системы в целом, что имеет большое практическое значение в совершенствовании механизма управления соответствующими системами.

## **Литература**

1. Облачные сервисы (рынок России). TAdviser. <http://www.tadviser.ru/index.php/%D0%A1%D1>.
2. Облачные технологии. <https://studfiles.net/preview/4034311>.
3. Волович К. И., Зацаринный А. А., Кондрашев В. А., Шабанов А. П. О некоторых подходах к представлению научных исследований как облачного сервиса // Системы и средства информатики, 2017. Т. 27. № 1. С. 73–84.
4. Гаврилов В. Е., Зацаринный А. А. Некоторые системотехнические и нормативно-методические вопросы обеспечения защиты информации в автоматизированных информационных системах на облачных технологиях с использованием методов искусственного интеллекта // Системы и средства информатики, 2016. Т. 26. № 4. С. 40–52.
5. ГОСТ Р 56938-2016. Защита информации при использовании технологий виртуализации. — М.: Стандартинформ, 2017. 14 с.
6. Окунев Ю. Б., Плотников В. Г. Принципы системного подхода к проектированию в технике связи. — М.: Связь, 1976. 183 с.
7. Якушева Н. А. Расчет экономической эффективности облачных вычислений // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Приборостроение, 2012. С. 224–235.
8. Ларичев О. И. Теория и методы принятия решений. — М.: Логос, 2007. 392 с.
9. Зацаринный А. А., Ионенков Ю. С. К вопросу оценки эффективности автоматизированных систем с использованием метода анализа иерархий // Системы и средства информатики, 2015. Т. 25. № 3. С. 162–179.
10. AWS CloudFormation. <https://aws.amazon.com/ru/cloudformation>.

11. Compute engine: Scalable, high-performance virtual machines. <https://cloud.google.com/compute>.
12. Глобальность. Надежность. Гибридность: Облако на ваших условиях. <https://azure.microsoft.com/ru-ru>.
13. Amazon WorkSpaces: Полностью управляемые и защищенные виртуальные облачные рабочие столы на AWS. <https://aws.amazon.com/ru/workspaces>.
14. Oracle Virtual Desktop Infrastructure. <http://www.oracle.com/technetwork/server-storage/virtualdesktop/overview/index.html>.
15. Засаринный А. А., Сучков А. П. Система ситуационного управления как мультисервисная технология в облачной среде // Информатика и её применения, 2018. Т. 12. Вып. 1. С. 78–88.
16. Исследование вопросов управления результатами научно-исследовательской деятельности организаций, подведомственных ФАНО России, и научными сервисами сети ЦКП ФАНО: Отчет о НИР «Сервис-У». — ФИЦ ИУ РАН, 2016. 437 с.
17. Виртуальный ЦОД. — М.: Ростелеком. [https://moscow.rt.ru/b2b/service\\_cloudy/virtual\\_cod](https://moscow.rt.ru/b2b/service_cloudy/virtual_cod).

Поступила в редакцию 06.06.18

---

## SOME ASPECTS OF CLOUD COMPUTING EFFICIENCY ESTIMATION

*A. A. Zatsarinny<sup>1</sup>, Yu. S. Ionenkov<sup>2</sup>, and A. P. Suchkov<sup>2</sup>*

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

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

**Abstract:** The article is devoted to the effectiveness evaluation of the cloud technologies taking into account their specifics. The main characteristics and features of cloud technologies affecting their efficiency are considered. The generalized and partial performance indicators, taking into account the risks and vulnerabilities in the implementation of cloud technologies, are proposed. Mathematical models of cloud technologies efficiency indicators used in calculations are presented. A method of evaluating the effectiveness of cloud technologies, using a set of quantitative data characterizing all aspects of technology, combined with the use of expert assessments is developed. An example of evaluating the economic efficiency of cloud technologies implementation is given.

**Keywords:** cloud technologies; service model; efficiency; indicator; criterion; situation center

**DOI:** 10.14357/08696527180308

## Acknowledgments

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

## References

1. Oblachnye servisy (rynek Rossii) [Cloud services (Russian market)]. Available at: <http://www.tadviser.ru/index.php/%D0%A1%D1> (accessed May 24, 2018).
2. Oblachnye tekhnologii [Cloud technologies]. Available at: <https://studfiles.net/preview/4034311/> (accessed May 24, 2018).
3. Volovich, K. I., A. A. Zatsarinnyy, V. A. Kondrashev, and A. P. Shabanov. 2017. O nekotorykh podkhodakh k predstavleniyu nauchnykh issledovaniy kak oblachnogo servisa [Scientific research as a cloud service]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 27(1):73–84.
4. Gavrilov, V. E., and A. A. Zatsarinny. 2016. Nekotorye sistemotekhnicheskie i normativno-metodicheskie voprosy obespecheniya zashchity informatsii v avtomatizirovannykh informatsionnykh sistemakh na oblachnykh tekhnologiyakh s ispol'zovaniem metodov iskusstvennogo intellekta [On system-technical and regulatory-methodological problems of data security in cloud automated information systems using artificial intelligence technologies]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 26(4):40–52.
5. GOST R 56938-2016. 2017. Zashchita informatsii pri ispol'zovanii tekhnologiy virtualizatsii [Protection of information when using virtualization technologies]. Moscow: Standardinform Publs. 14 p.
6. Okunev, Y. B., and V. G. Plotnikov. 1976. *Printsipy sistemnogo podkhoda k proektirovaniyu v tekhnike svyazi* [Systematic approach principles to design in communication technics]. Moscow: Svyaz'. 183 p.
7. Yakusheva, N. A. 2012. Raschet ekonomiceskoy effektivnosti oblachnykh vychisleniy [Calculation of economic efficiency of cloud computing]. Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Ser. Instrument engineering. 224–235.
8. Larichev, O. I. 2007. *Teoriya i metody prinyatiya resheniy* [Theory and methods of decision making]. Moscow: Logos. 392 p.
9. Zatsarinny, A. A., and Yu. S. Ionenkov. 2015. K voprosu otsenki effektivnosti avtomatizirovannykh sistem s ispol'zovaniem metoda analiza ierarkhiy [Regarding automated systems efficiency evaluation using analytic hierarchy process]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 25(3):161–176.
10. AWS CloudFormation. Available at: <https://aws.amazon.com/ru/cloudformation> (accessed October 25, 2017).
11. Compute engine: Scalable, high-performance virtual machines. Available at: <https://cloud.google.com/compute> (accessed October 25, 2017).
12. The Global. Reliability. Hybridity: The cloud on your terms. Available at: <https://azure.microsoft.com/ru-ru> (accessed October 25, 2017).
13. Amazon WorkSpaces: Fully managed and secure cloud virtual desktops on AWS. Available at: <https://aws.amazon.com/ru/workspaces> (accessed October 25, 2017).

14. Oracle Virtual Desktop Infrastructure. Available at: <http://www.oracle.com/technetwork/server-storage/virtualdesktop/overview/index.html> (accessed October 25, 2017).
15. Zatsarinny, A. A., and A. P. Suchkov. 2018. Sistema situatsionnogo upravleniya kak mul'tiservisnaya tekhnologiya v oblastnoy srede [The situational management system as a multiservice technology in the cloud]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 12(1):78–88.
16. FRC CSC RAS. 2016. Issledovanie voprosov upravleniya rezul'tatami nauchno-issledovatel'skoy deyatel'nosti organizatsiy, podvedomstvennykh FANO Rossii, i nauchnymi servisami seti TsKP FANO: Otchet o NIR "Servis-U" [Report on the research "Service-U." Study of the issues of managing the results of research activities of organizations subordinate to FASO of Russia and the scientific services of the FASO CKP]. 437 p.
17. Virtual'nyy TsOD. [Virtual data center]. Rostelecom. Available at: [https://moscow.rt.ru/b2b/service\\_cloudy/virtual\\_cod](https://moscow.rt.ru/b2b/service_cloudy/virtual_cod) (accessed June 1, 2018).

Received June 6, 2018

## Contributors

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

**Ionenkov Yurij S.** (b. 1956) — senior scientist, Institute of Informatics Problems, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation; uionenkov@ipiran.ru

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

## АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ МЕЖВЕДОМСТВЕННОГО ИНФОРМАЦИОННОГО ВЗАЙМОДЕЙСТВИЯ

*А. П. Сучков<sup>1</sup>*

**Аннотация:** Рассматриваются различные сценарии формирования системы межведомственного информационного взаимодействия (СМИВ). Они различаются по способам формирования интеграционных моделей ядра системы. Первый сценарий предполагает минимальную интеграцию в ядре часто встречающихся базовых понятий. При втором осуществляется начальное формирование онтологии интеграционного ядра, приближающейся к полному составу базовых элементов. Интеграция автоматизированных информационных систем (АИС) осуществляется с учетом существования этого ядра, но без его изменения. Третий сценарий обеспечивает формирование ядра путем присоединения онтологий АИС по мере их интеграции без создания начального интеграционного ядра. Проведено сравнение данных сценариев по затратам, определен оптимальный сценарий. Рассмотрено два примера общегосударственных систем межведомственного взаимодействия.

**Ключевые слова:** межведомственное информационное взаимодействие; сценарии интеграции; информационные модели данных; онтологии

**DOI:** 10.14357/08696527180309

### 1 Введение

Курс на создание цифровой экономики, являясь мировой тенденцией, подразумевает внедрение «бесшовных» информационных взаимосвязей всего наработанного комплекса разнообразных и разнородных АИС, автоматизированных систем управления (АСУ) и прочих информационных ресурсов в различных доменах инфраструктуры общества, а также внутри отдельных отраслей народного хозяйства [1]. Эти ресурсы, являясь во многом разрозненным конгломератом АИС, требуют интеграции, что должно позволить получить новое качество в информатизации общества. Более того, возросла актуальность задач информационного взаимодействия различных организационных систем между собой на основе единых регламентов взаимодействия. Такие задачи поставлены, например, в рамках создания Системы распределенных ситуационных центров.

Из опыта ФИЦ ИУ РАН следует, что одна из критичных и трудно разрешаемых проблем создания интегрированных информационных систем — обеспечение информационного взаимодействия существующих и вновь создаваемых

---

<sup>1</sup>Институт проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук, ASuchkov@ipiran.ru

АСУ, АИС и т. п. Отсутствие единых информационных моделей данных в различных доменах предметных областей и единой методологии их применения и ведения приводит к тому, что информационные системы, созданные под требования конкретного заказчика, при попытке интеграции требуют доработок, иногда сравнимых по затратам на создание новой системы.

Информационную модель данных некоторой предметной области можно трактовать как *онтологию*. Онтология — это попытка всеобъемлющей и подробной формализации некоторой области знаний с помощью концептуальной схемы. Обычно такая схема состоит из структуры данных, содержащей все релевантные классы объектов и их связи, принятые в этой области. Онтология описывается совокупностью базовых объектов, классов, атрибутов и отношений.

Рассматривая обобщенную онтологию всего спектра данных, потенциально охватывающих все виды национального межведомственного информационного взаимодействия, можно определить так называемую *верхнюю онтологию*, которая охватывает *доменные онтологии* различных предметных областей народного хозяйства.

Из необходимости интеграции разнородных баз данных возникла задача *отображения онтологий*, разработанных независимо друг от друга и имеющих, таким образом, свое собственное представление базовых объектов. Отображение двух онтологий означает, что для каждого понятия, отношения или объекта одной онтологии подыскиваются соответствующие элементы в другой онтологии [2]. Решение этой задачи в национальном масштабе, по мнению автора, должно обеспечиваться *системой* межведомственного информационного взаимодействия, объединяющей множество взаимодействующих участников, на основе процессов отображения онтологий.

Методологические подходы для отображения онтологий в основном разрабатываются для управления схемами баз данных, XML-схемами, таксономиями, формальными языками, ER-моделями (*entity–relationship model*) данных, словарями и другими моделями данных. Исходные структуры обычно перед отображением преобразовываются в семантическую сеть (граф).

Так как большинство интегрируемых систем межведомственного взаимодействия относятся к системам управления, то основными разделами такой структуры могут являться [3]:

- классы сущностей, позволяющие формировать иерархические структуры (обеспечивающие наследование свойств в иерархии);
- сущности:
- внешние объекты мониторинга (объекты, задаваемые целями управления);
- внутренние объекты мониторинга (свои силы, материальные, технические, финансовые и другие средства);
- противодействующие ресурсы (силы, средства);
- элементы окружающей среды (природные, техногенные, социальные, политические и экономические факторы контролируемого пространства);

- системы команд и сигналов;
- информационно-лингвистическое обеспечение (ИЛО) (классификаторы, справочники, словари терминов);
- система служебной документации.

Отображение онтологий в процессе интеграции различных информационных систем может проходить по разным сценариям. Однако у всех сценариев есть одна общая черта: по мере построения отображений онтологий для начального пула интегрируемых систем происходит формирование ядра интегральной модели данных, реализующей интегральную онтологию данных. Способы развития этого ядра в процессе межведомственной интеграции и определяют ее основные сценарии. Рассмотрим, как эти процессы могут развиваться во времени и какие результаты с точки зрения организации эффективной СМИВ могут быть достигнуты при реализации различных подходов.

## **2 Математическая модель системы интеграции**

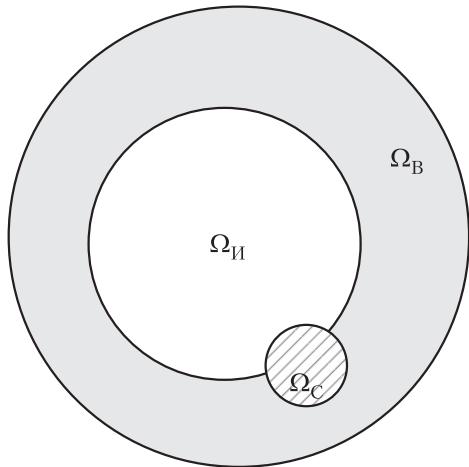
Для того чтобы оценить эффективность СМИВ, необходимо оценить ориентированную стоимость интеграции одной АИС при различных сценариях и соотнести ее с затратами на создание и эксплуатацию самой СМИВ.

Означим  $\Omega_B$  — высшую онтологию СМИВ,  $\Omega_I$  — текущую онтологию ядра интеграционной модели данных СМИВ,  $\Omega_C$  — онтологию интегрируемой АИС. Так как построение отображений онтологий в процессе их интеграции происходит поэлементно, затраты на интеграцию базового набора объектов онтологии пропорциональны их количеству. Введем понятие  $\mu$  — «мощности» онтологии, которую положим равной числу содержащихся в ней базовых элементов, и обозначим

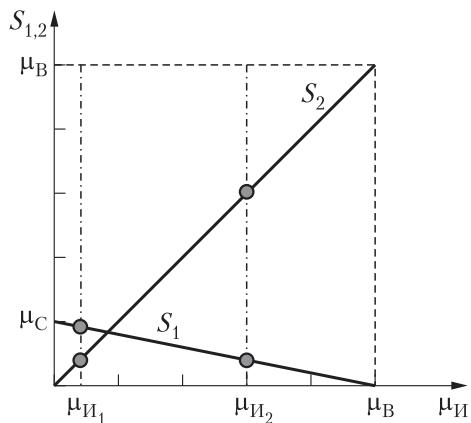
$$\mu_B = \mu(\Omega_B), \quad \mu_I = \mu(\Omega_I), \quad \mu_C = \mu(\Omega_C).$$

Как будет показано на примерах конкретных СМИВ, мощность высшей онтологии составляет до десятка тысяч базовых элементов, поэтому для моделирования процессов интеграции вполне применимы вероятностные методы. Процесс интеграции представим следующим образом. В общем случае онтология  $\Omega_C$  интегрируемой АИС содержит часть объектов онтологии ядра, для которых нет надобности поиска соответствий, и часть объектов высшей онтологии, не входящих в  $\Omega_I$ . Если предположить, что состав  $\Omega_C$  случаен, математическое ожидание числа объектов  $\Omega_C$ , не принадлежащих  $\Omega_I$ , составляет  $\mu_C(\mu_B - \mu_I)/\mu_B$  (рис. 1).

Так как процессу интеграции подлежат только эти элементы  $\Omega_C$ , а стоимость интеграции одной АИС пропорциональна числу этих элементов, не теряя общности, положим стоимость интеграции одной АИС  $S_1 = \mu_C(\mu_B - \mu_I)/\mu_B$ . В предположении, что средняя стоимость интеграции любого базового элемента онтологии одинакова, стоимость  $S_2$  расширения ядра до мощности  $\mu_I$  составляет



**Рис. 1** Соотношение онтологий в процессе интеграции



**Рис. 2** Соотношение величин стоимости интеграции одной АИС

$S_2 = \mu_I$ . Соотношение величин  $S_1$  и  $S_2$  в зависимости от величины  $\mu_I$  представлено на рис. 2. Очевидно, что с ростом  $\mu_I$  (т. е. величины ядра СМИВ) стоимость интеграции одной АИС падает, однако затраты на увеличение  $\mu_I$  при интеграции к СМИВ небольшого числа АИС не окупаются. Оценим число подключаемых АИС, при котором увеличение  $\mu_I$  будет менее затратным.

Рассмотрим два состояния ядра СМИВ:  $\Omega_{I_1}$  и  $\Omega_{I_2}$  с мощностями  $\mu_{I_1}$  и  $\mu_{I_2}$  (см. рис. 2). Тогда стоимость подключения  $N$  АИС для первого и второго случаев при условии, что  $\mu_C$  есть средняя мощность онтологий АИС, будет равна  $\mu_{I_1} + N\mu_C(\mu_B - \mu_{I_1})/\mu_B$  и  $\mu_{I_2} + N\mu_C(\mu_B - \mu_{I_2})/\mu_B$ .

Ясно, что, так как  $\mu_{I_1} < \mu_{I_2}$ , при достаточно большом  $N$

$$\mu_{I_1} + N\mu_C \frac{\mu_B - \mu_{I_1}}{\mu_B} \geq \mu_{I_2} + N\mu_C \frac{\mu_B - \mu_{I_2}}{\mu_B}.$$

Отсюда

$$N \geq \frac{\mu_B}{\mu_C}.$$

Этот замечательный факт говорит о том, что затраты на интеграцию АИС при таком сценарии зависят от их числа с пороговым значением в виде соотношения мощности верхней онтологии и средней мощности онтологий подключаемых АИС. Если  $N$  меньше порогового значения, то затраты на создание ядра СМИВ большей мощности увеличивают затраты на интеграцию, если больше — уменьшают эти затраты. Следует отметить, что  $\mu_B > \mu_C$  на несколько порядков, поэтому пороговое значение составляет  $\approx 10^3$ .

Можно рассмотреть также другой подход к формированию  $\Omega_{\text{И}}$ : последовательное слияние отологий интегрируемых АИС по мере их присоединения. Имеем следующий итерационный процесс формирования онтологии  $\Omega_{\text{И}}$ :

$$\mu_{\text{И}}^0 = 0, \quad \mu_{\text{И}}^1 = \mu_{\text{C}}, \quad \dots, \quad \mu_{\text{И}}^{n+1} = \mu_{\text{И}}^n + \mu_{\text{C}} \left( 1 - \frac{\mu_{\text{И}}^n}{\mu_{\text{B}}} \right).$$

Отсюда после несложных вычислений получаем:

$$\mu_{\text{И}}^{n+1} = \mu_{\text{C}} \sum_{k=0}^n \left( 1 - \frac{\mu_{\text{C}}}{\mu_{\text{B}}} \right)^k = \mu_{\text{B}} \left( 1 - \left( 1 - \frac{\mu_{\text{C}}}{\mu_{\text{B}}} \right)^n \right) \xrightarrow{n \rightarrow \infty} \mu_{\text{B}}.$$

Таким образом, данный подход обеспечивает последовательное пополнение онтологии интеграционного ядра СМИВ, которое со скоростью геометрической прогрессии стремится к верхней онтологии.

Проделанный анализ позволяет сформулировать три сценария создания и развития СМИВ:

1. Осуществляется начальное формирование небольшой онтологии интеграционного ядра СМИВ, содержащей часто встречающиеся в  $\Omega_{\text{B}}$  базовые понятия. Интеграция АИС осуществляется с учетом существования этого ядра, но без его изменения.
2. Осуществляется начальное формирование онтологии интеграционного ядра СМИВ, приближающейся по составу базовых элементов к  $\Omega_{\text{B}}$ . Интеграция АИС осуществляется с учетом существования этого ядра, но без его изменения.
3. Формирование ядра СМИВ осуществляется по мере интеграции АИС путем присоединения онтологий  $\Omega_{\text{C}}$  к  $\Omega_{\text{И}}$  без первоначального создания начального интеграционного ядра.

Рассмотрим соотношение стоимости осуществления этих сценариев с точки зрения эффективности решения задач межведомственного информационного взаимодействия.

Итак, по первому и второму сценарию для подключения  $N$  АИС затраты составляют:

$$C_1 = \mu_{\text{И}} + N \mu_{\text{C}} \frac{\mu_{\text{B}} - \mu_{\text{И}}}{\mu_{\text{B}}};$$
$$C_2 = \mu_{\text{И}} + N \mu_{\text{C}} \frac{\mu_{\text{B}} - \mu_{\text{И}_{21}}}{\mu_{\text{B}}}.$$

Соотношение затрат представлено на рис. 3. При  $N = \mu_{\text{B}}/\mu_{\text{C}}$  имеем  $C_1 = C_2$  и с ростом  $N$   $C_1$  превышает  $C_2$ .

Для третьего сценария затраты для  $N$  АИС составляют:

$$C_3 = \mu_B \left( 1 - \left( 1 - \frac{\mu_C}{\mu_B} \right)^{N-1} \right).$$

Затраты  $C_3$  стремятся в геометрической прогрессии к  $\mu_B$  и при  $N \approx 0,4\mu_B$   $\mu_B - C_3 \leq 10^{-4}$ , что означает  $\Omega_{\text{И}} = \Omega_B$  в силу дискретности процесса и величины  $\Omega_B \approx 10^4$ . При больших  $N$   $C_3 = \text{const}$  (см. рис. 3), так как ядром СМИВ достигнута верхняя топология.

Очевидно, что самым плохим вариантом по суммарным и постоянно растущим затратам является первый сценарий. Во втором сценарии затраты также постоянно растут, но медленнее. Третий сценарий обеспечивает наименьшие суммарные затраты, которые к тому же после интеграции определенного числа АИС вообще не растут, так как не требуют дополнительных расходов. Можно показать, что последний сценарий является оптимальным, т. е. неулучшаемым.

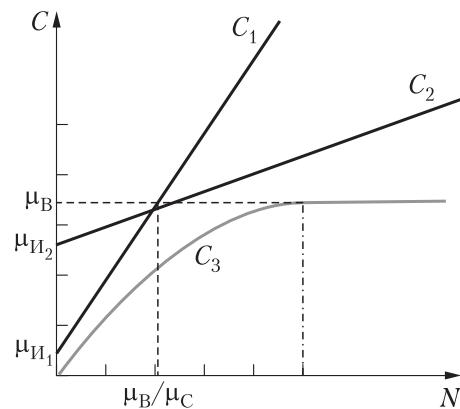
Следует заметить, что оценка затрат произведена лишь с учетом отображения отологии без рассмотрения расходов на поддержание организационных систем СМИВ. Однако это не влияет, по мнению автора, на корректность сделанных выводов, так как эти расходы не зависят от числа подключаемых систем.

Рассмотрим два конкретных примера СМИВ в контексте применения обозначенных выше сценариев.

### 3 Система межведомственного электронного взаимодействия (РФ)

Подход к интеграции разрозненных информационных ресурсов по **первому сценарию** дает отечественная Система межведомственного электронного взаимодействия (СМЭВ) [4]. Она представляет собой федеральную государственную информационную систему, включающую информационные базы данных, в том числе содержащие сведения об используемых органами и организациями информационных, программных и технических средствах, обеспечивающих возможность доступа через систему взаимодействия к их информационным системам.

В системе также собираются сведения об истории движения в системе взаимодействия электронных сообщений при предоставлении государственных и муниципальных услуг, исполнении государственных и муниципальных функций



**Рис. 3** Соотношение затрат по трем сценариям интеграции

в электронной форме, а также программные и технические средства, обеспечивающие взаимодействие информационных систем органов и организаций через СМЭВ.

Система создана в соответствии с Федеральным законом Российской Федерации от 27 июля 2010 г. № 210-ФЗ «Об организации предоставления государственных и муниципальных услуг».

Система межведомственного электронного взаимодействия состоит из сети защищенных каналов связи между узлами, расположенными в центрах обработки данных «Ростелекома». Каждый узел СМЭВ — это шина на базе Oracle Enterprise Service Bus. Участники СМЭВ являются поставщиками и потребителями сведений:

- каждый поставщик сведений создает в СМЭВ **свой электронный сервис**, который предназначен для обработки запросов и выдачи сведений;
- каждый потребитель сведений создает в СМЭВ **свой адаптер**, который умеет правильно запрашивать сведения и получать ответ.

Оператор СМЭВ — Министерство связи и массовых коммуникаций Российской Федерации. Строительством инфраструктуры СМЭВ занимается «Ростелеком».

В 2009 г. обеспечена возможность взаимодействия между **Единым порталом государственных услуг** (ЕПГУ) [5] и информационными системами федеральных органов исполнительной власти для заказа государственных услуг в электронном виде. Взаимодействие обеспечивалось с использованием синхронных электронных сервисов. Третья версия СМЭВ официально введена в эксплуатацию с начала 2015 г.

Задачи СМЭВ в инфраструктуре Электронного правительства:

- обеспечение информационного взаимодействия в электронной форме при предоставлении государственных и муниципальных услуг и исполнении государственных и муниципальных функций;
- обеспечение предоставления государственных и муниципальных услуг в электронной форме, в том числе с использованием федеральной государственной информационной системы «Единый портал государственных и муниципальных услуг (функций)»;
- технологическое обеспечение информационного взаимодействия с применением системы взаимодействия достигается путем использования сервис-ориентированной архитектуры, представляющей собой совокупность видов сведений, построенных по общепринятым стандартам, а также путем использования единых технологических решений и стандартов, единых классификаторов и описаний структур данных.

Следует отметить, что интеграционное ядро СМЭВ содержит единые стандарты, классификаторы, описания структур данных, представленные в виде

XML-моделей, охватывает небольшую часть данных отраслей народного хозяйства и описывает данные, фигурирующие в ЕПГУ, — финансово-экономические, социальные и личные данные. Таким образом, в СМЭВ реализуется первый сценарий интеграции. Для доступа к другим данным требуются адаптеры для формирования запросов и интерпретации ответов в рамках электронного взаимодействия.

По состоянию на март 2014 г. общее число участников СМЭВ превысило 8,4 тыс., а количество запросов, прошедших через систему, составило более 1,6 млрд. Система межведомственного электронного взаимодействия обеспечивает функционирование около 520 сервисов федерального уровня, среди которых около 240 имеют ограниченный доступ, и более 3700 сервисов регионального уровня, из них более 2100 ограниченного доступа [6].

Информационные услуги предоставляют 112 федеральных ведомств и организаций.

#### **4 Национальная информационная XML-модель обмена данными в государственных органах США**

Примером подхода по **второму сценарию интеграции** служит вот уже десятилетний опыт интеграции усилий правоохранительных сообществ США и Европы по созданию Глобальной XML-модели данных правоохранительной сферы на базе веб-технологий (GJXDM — Global Justice XML Data Model) [6].

Дальнейшее развитие глобальная модель GJXDM получила в последнее время в NIEM (National Information Exchange Model) — Национальной информационной XML-модели обмена данными в государственных органах США. В рамках версии 4.0 разработаны XML-модели 15 доменов практически всех отраслей национального хозяйства и международных отношений.

Текущая версия NIEM 4.0 [7] опирается на онтологию интеграционного ядра, включающую более 9000 взаимосвязанных базовых информационных объектов, для описания которых используется свыше 20 000 атрибутов, и объединяет более 70 информационно-лингвистических систем (словарей терминов, классификаторов, рубрикаторов и т. п.) различных ведомств. Модель постоянно совершенствуется и используется для формирования единого информационного пространства и унифицированной системы документов в сфере обмена информацией на всех уровнях государственного управления. Модель поддерживается рабочей группой стандартов (W3C — World Wide Web Consortium).

Глобальная XML-модель включает в себя непосредственно информационную модель данных, словари данных и саму схему XML, независимую от поставщиков, операционных систем, носителей информации и приложений, и является ключевой технологией обмена информацией государственными организациями. Новые версии глобальной модели рассматриваются рабочей группой, каждый вариант оценивается совместно с участниками сообщества экспертов, и по-

сле этого утверждаются все изменения модели, основанные на этой обратной связи.

Для обмена данными NIEM определяет согласованные термины, определения, отношения и форматы, независимо от того, как информация хранится в отдельных системах. В настоящее время он доступен в форматах XSD и Microsoft Excel, а также в инструментах UML (Unified Modeling Language) для графического отображения обменов и элементов каждого сообщения. Имеются инструменты для работы в формате JSON (JavaScript Object Notation).

В рамках NIEM созданы и формализованы в виде XML-схем следующие доменные онтологии:

- ядро (1308 — число сущностей);
- сельское хозяйство (56);
- биометрия (823);
- химическая, биологическая, радиологическая и ядерная безопасность (498);
- чрезвычайные ситуации (588);
- социальные службы (545);
- иммиграция (377);
- защита инфраструктуры (25);
- разведка (47);
- международная торговля (442);
- юстиция (3462);
- морской домен (308);
- военные операции (174);
- скрининг физических лиц (463);
- наземный транспорт (61).

В национальном масштабе создана единая модель данных, реализующая в интересах государственного формализованного документооборота объектно-ориентированную динамическую семантическую сеть. Основными характеристиками этой информационной модели являются:

- сетевая организация данных о динамических объектах и связях между ними (динамическая семантическая сеть);
- объектно-ориентированный подход к описанию иерархии классов и наследования свойств объектов (транзитивность связей «is-a», «has-a», «part-of»);
- наличие компонент для идентификации и регистрации сложных объектов предметной области;
- интеграция в модель актуального ИЛО;

- специальная организация данных для осуществления дискретных методов анализа;
- обеспечение максимально полного охвата потребностей обмена данными и документами на всех уровнях государственного управления.

Создана система формирования, модернизации и ведения единой XML-модели данных с участием уполномоченных государственных органов и широкого интернет-сообщества экспертов. Модель NIEM представляет собой совместное партнерство учреждений и организаций на всех уровнях государственного управления (федеральный, государственный, региональный и местный — до 1500 ведомств и организаций) совместно с частным сектором. Цель этого партнерства заключается в обеспечении эффективного обмена критически важной информацией для поддержки принятия решений государственными органами правосудия, общественной безопасности, управления чрезвычайными ситуациями и стихийными бедствиями, разведки и структурами по обеспечению национальной безопасности. Система призвана разрабатывать, распространять и поддерживать общегосударственные стандарты и процессы обмена информацией, которые позволяют автоматизировать обмен информацией.

Все составляющие системы находятся в открытом доступе на портале NIEM [5]:

- xsd-файлы модели;
- средства для формирования подмножеств модели для конкретных приложений;
- разнообразная документация;
- материалы и автоматизированные системы для тренингов;
- служба поддержки и технической помощи;
- форум для обмена идеями.

## 5 Обсуждение результатов

Итак, два приведенных примера СМИВ реализованы по первому и второму сценарию интеграции. Сравнительные характеристики систем приведены в таблице.

Рассмотренные два подхода интеграции разрозненных информационных ресурсов в национальном масштабе являются в каком-то смысле диаметрально противоположными.

В случае NIEM в национальном масштабе централизованно созданы единые технологические решения и стандарты, единые классификаторы и XML-описания структур данных, обязательные для государственных органов США при создании новых и модернизации существующих информационных ресурсов. В дополнение к этому создана система ведения и поддержания единых моделей

## Основные характеристики СМИВ

СМИВ	Мощность верхней онтологии (оценка)	Мощность интеграционного ядра	Число подключений
NIEM	~ 12 000	~ 10 000	~ 1500 федеральных, региональных и местных органов [5]
СМЭВ	~ 12 000	~ 1 000 (оценка)	~ 8 400 [6] ~ 260 федеральных АИС ~ 1000 региональных АИС

и ИЛО, обеспечивающая единый регламент их корректировки в соответствии с потребностями развития предметных областей существующих и вновь создаваемых доменов. Это, несомненно, потребовало значительных вложений на начальном этапе.

Наша отечественная практика пошла по пути частичной централизации информационных ресурсов, необходимых для оказания населению и организациям закрепленного законодательством набора госуслуг. Эти ресурсы охватывают финансово-экономические, социальные и личные данные и совершенно недостаточны для организации широкого межведомственного взаимодействия. Для доступа же к ресурсам других доменов, в частности доменов, связанных с обеспечением национальной безопасности и сопутствующих им, необходимо каждый раз создавать адаптеры для преобразования данных запросов и ответов между ведомственными АИС — своеобразные «переводчики» с одного языка на другой. По этому пути следует, в частности, МЧС РФ, которое заключило более 2800 межведомственных соглашений по обмену данными с Национальным центром по чрезвычайным ситуациям, и Министерство обороны — более 750 межведомственных соглашений.

Достоинством первого подхода является то, что вопрос интеграции ресурсов решается раз и навсегда — создается единая модель данных и средства для поддержания ее жизнеспособности. Недостатком является то, что этот путь требует больших единовременных затрат на начальном этапе жизненного цикла системы интеграции.

Достоинством второго подхода является сокращение единовременных затрат на начальном этапе (разработка и внедрение технологии информационных обменов), недостатком — постоянные расходы на осуществление попарной интеграции всех со всеми.

По всей видимости, в настоящее время при развитии NIEM применяется третий сценарий формирования интегрального ядра — оно пополняется по мере возникновения потребностей интеграции АИС в новых предметных областях или в модернизированных существующих доменах.

Интересно отметить, что переход в настоящий момент СМЭВ на третий сценарий позволил бы существенно уменьшить затраты на организацию межведом-

ственного взаимодействия и в конечном итоге суммарно превзойти в перспективе по эффективности вложений NIEM. Конечно, это бы потребовало проявления политической воли в государственном масштабе и создания некоторой организационной системы ведения онтологии интеграционного ядра.

## Литература

1. Зацаринный А. А., Сучков А. П. Технологии ситуационного центра как облачные услуги // Современные проблемы безопасности жизнедеятельности: интеллектуальные транспортные системы и ситуационные центры: Мат-лы V Междунар. науч.-практич. конф. (ITS Forum — Kazan 2018). — Казань: Центр инновационных технологий, 2018. Ч. II. С. 24–31.
2. Лапшин В. А. Онтологии в компьютерных системах. — М.: Научный мир, 2010. 222 с.
3. Зацаринный А. А., Сучков А. П. Системотехнические подходы к созданию системы поддержки принятия решений на основе ситуационного анализа // Информатика и её применения, 2016. Т. 10. Вып. 4. С. 105–113.
4. Технологический портал СМЭВ. <http://smev.gosuslugi.ru>.
5. Единый портал государственных услуг. <https://www.gosuslugi.ru>.
6. Global Justice XML Data Model. <http://it.ojp.gov/jxdm/3.0.3/index.html>.
7. National Information Exchange Model. <https://www.niem.gov>.

Поступила в редакцию 24.04.18

---

---

## ANALYSIS OF THE INTERDEPARTMENTAL INFORMATION EXCHANGE PROCESSES

*A. P. Suchkov*

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

**Abstract:** The article deals with various scenarios of the interdepartmental information exchange system formation. They differ in the ways of the system core integration models formation. The first scenario assumes a minimal integration in the kernel of frequently encountered basic concepts. In the second case, the initial formation of the integration core ontology, approaching the full composition of the basic elements, is carried out. Integration of automated information systems (AIS) is carried out taking into account the existence of this core, but without changing it. The third scenario provides the formation of the core by attaching the ontologies of AIS as they integrate without creating an initial integration core. The comparison of these scenarios by costs is carried out, the optimal scenario is defined. Two examples of national systems of interdepartmental exchange are considered.

**Keywords:** interdepartmental information interaction; integration scenarios; information data models; ontologies

**DOI:** 10.14357/08696527180309

## References

1. Zatsarinnyy, A. A., and A. P. Suchkov. 2018. Tekhnologii situatsionnogo tsentra kak oblachnye uslugi [Technologies of situation center as cloud services]. *5th Scientific and Practical Conference (International) ITS Forum — Kazan Proceedings*. Kazan: Center of Innovation Technologies. II:24–31.
2. Lapshin, V. A. 2010. *Ontologii v kompyuternykh sistemakh* [Ontologies in computer systems]. Moscow: Nauchnyy mir. 222 p.
3. Zatsariny, A. A., and A. P. Suchkov. 2016. Sistemotekhnicheskie podkhody k sozdaniyu sistemy podderzhki prinjatiya resheniy na osnove situatsionnogo analiza [Systems engineering approaches to a decision support system based on situational analysis]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 10(4):105–113.
4. SMEV technology portal. 2018. Available at: <http://smev.gosuslugi.ru> (accessed April 23, 2018).
5. Common portal of public services. 2018. Available at: <https://www.gosuslugi.ru> (accessed April 23, 2018).
6. Global Justice XML Data Model. 2018. Available at: <http://it.ojp.gov/jxdm/3.0.3/index.html> (accessed April 23, 2018).
7. National Information Exchange Model. 2018. Available at: <https://www.niem.gov/> (accessed April 23, 2018).

*Received April 24, 2018*

## Contributor

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

## АРХИТЕКТУРА СИСТЕМЫ ПРЕДОСТАВЛЕНИЯ СЕРВИСОВ ЦИФРОВОЙ ПЛАТФОРМЫ ДЛЯ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ\*

*B. A. Кондрашев<sup>1</sup>*

**Аннотация:** Рассматриваются вопросы предоставления научных услуг в условиях цифровой экономики на основе цифровой платформы для научных исследований. Предложена бизнес-модель научных сервисов цифровой платформы. Делается акцент на возможностях цифровой платформы как инструмента для управления научными исследованиями в цифровой экономике. Описываются основные архитектурные решения системы предоставления сервисов цифровой платформы для научных исследований.

**Ключевые слова:** цифровая платформа; облачный сервис; научный сервис; информационные технологии; информационная поддержка деятельности; управление научными сервисами; единая информационная среда

**DOI:** 10.14357/08696527180310

### 1 Введение

В настоящее время в соответствии с программой «Цифровая экономика Российской Федерации» [1] и Указом Президента РФ «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года» [2] начаты работы по созданию отраслевых цифровых платформ. Одно из базовых направлений программы — создание исследовательской инфраструктуры. Очевидно, для повышения эффективности ее использования в интересах научных коллективов России требуется создание цифровой платформы для научных исследований.

Под цифровыми платформами понимают общее информационное пространство поставщиков и потребителей товара (услуги), предоставляющее бизнес-модели взаимодействия на основе информационных технологий. Заметим, что цифровая платформа позволяет накапливать информацию о взаимодействии поставщиков и потребителей, качестве оказанных услуг, снижать число транзакционных связей и наделять бизнес-модели взаимодействия поставщика и потребителя элементами искусственного интеллекта. В рамках работ по программе развития цифровой экономики в России весной 2018 г. принято следующее определение цифровой платформы [3]: «Цифровая платформа — это система алгоритмизированных взаимовыгодных взаимоотношений значимого количества независимых

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

<sup>1</sup>Институт проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук, VKondrashev@frccsc.ru

участников отрасли экономики (или сферы деятельности), осуществляемых в единой информационной среде, приводящая к снижению транзакционных издержек за счет применения пакета цифровых технологий работы с данными и изменения системы разделения труда».

Бизнес-процессы проведения научных исследований обладают рядом особенностей, которые должны быть учтены при создании цифровой платформы. Так, в [4] цифровая платформа представлена в составе трех компонентов: центра компетенции, центра обработки данных и комплекса научных сервисов. При этом понятие «научный сервис» является ключевым для цифровой платформы для научных исследований и определяется как совокупность действий (процессов) и средств обеспечения процесса (ресурсов) по обслуживанию выполнения работ научно-исследовательского и прикладного характера путем предоставления потребителю оборудования, расходных материалов, информационно-коммуникационных ресурсов, обеспечивающих ресурсов, продуктов интеллектуальной научной деятельности и обслуживающих человеческих ресурсов (субъекты сервисной деятельности), результатом которых является научная услуга. Отметим также, что в статье понятие «бизнес» трактуется более широко, чем его классическое определение: «экономическая, предпринимательская деятельность, направленная на извлечение прибыли». Отнесем к этому понятию в рамках настоящей статьи также научно-техническую деятельность, направленную на получение нового знания (результата интеллектуальной деятельности), в том числе при употреблении в сочетаниях бизнес-процессы, бизнес-модели.

## **2 Бизнес-модели предоставления научных сервисов цифровой платформы**

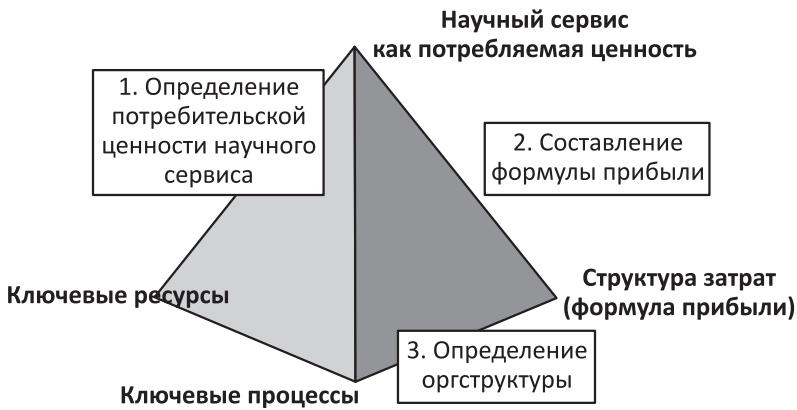
Как показал анализ бизнес-моделей в области инноваций, наиболее близок к концепции цифровой платформы [5] подход [6], представляющий бизнес-модель инновации как комплекс следующих элементов, обеспечивающих в совокупности создание и распространение новой ценности:

- потребляемая ценность;
- ключевые ресурсы (персонал, оборудование и др.);
- ключевые процессы (показатели и критерии, регламенты, протоколы и др.);
- формула прибыли.

Поясним эти элементы модели с точки зрения научного исследования, в котором потребляемой ценностью является научный сервис (научная услуга).

Описание потребляемой ценности содержит понимание того, что требуется от научного сервиса с точки зрения его потребителя. Оно включает:

- характеристики ключевого потребителя исследования;
- спецификацию потребности, требующей удовлетворения;
- предложение исследовательского коллектива по оказанию научной услуги.



**Рис. 1** Бизнес-модель научного сервиса цифровой платформы

Ключевые ресурсы характеризуют персонал, используемые технологии, оборудование, информационные ресурсы, каналы взаимодействия с партнерами и потребителями и пр.

Ключевые процессы дают понимание того, как организованы исследования, чтобы можно было постоянно и в нарастающем объеме предлагать научные услуги. Обычно в этот элемент включаются также система функциональных показателей, правила и нормы организации процессов.

Формула прибыли описывает модель получения результата, структуру затрат, скорость обращения (возобновления) ресурсов.

Соответственно, схема действий при формировании научных сервисов цифровой платформы будет выглядеть следующим образом (рис. 1):

- (1) определение потребительской ценности научного сервиса, основываясь на реальных потребностях пользователей услуги;
- (2) составление формулы прибыли: определение источников финансирования, решения по поводу того, какие ресурсы и процессы потребуются для выполнения научного сервиса;
- (3) сравнение новой модели с уже существующей, решение о том, можно ли оказать научную услугу в существующей организационной структуре или потребуется создавать новое подразделение.

При этом надо стремиться, чтобы цифровая платформа была способна поддерживать бизнес-модели разного объема оказания научного сервиса (по классификации [7]):

- интегрированную модель с охватом всей цепочки выполнения исследования, существенным вкладом в получение качественного результата и доступом к необходимым комплементарным активам внутри организации;

- модель «дирижера» (Orchestrator), при которой оказание услуги специализируется на одном или нескольких участках исследования, обладает существенным вкладом в получение качественного общего результата и доступом к ключевым комплементарным активам, в том числе за счет сотрудничества с другими научными коллективами;
- модель «игрока, действующего на одном уровне» (Layer Player), при которой оказание услуги специализируется на одном звене исследования, имеется относительно небольшой вклад в общий результат исследования, присутствует доступ к ключевым комплементарным активам в результате сотрудничества с другими научными коллективами;
- модель «маркетмейкера» (Market Maker), при которой выполняется совершенно новое звено исследования, характеризуется относительно небольшим вкладом в общий результат исследования и высоким спросом на новаторский научный сервис.

### **3 Аналитика результатов предоставления научных сервисов цифровой платформы**

Цифровая платформа для научных исследований помимо создания инновационной основы исследовательским организациям для предоставления научных сервисов может обеспечить структуризацию научных сервисов, создание сквозных технологий для эффективного использования и учета, а также систематизацию и оптимизацию затрат на проведение научных исследований.

Целесообразно использовать цифровую платформу как один из инструментов управления научными исследованиями. В цифровой платформе можно описать управление научными исследованиями в виде единого бизнес-процесса [8], целью которого являются научные результаты (результаты интеллектуальной деятельности), а управляющими воздействиями — ресурсы, направляемые на проведение исследования.

Информация, доступная и накапливаемая цифровой платформой, позволит выполнить аналитическую оценку результатов предоставления научных сервисов (проведения научных исследований) с учетом следующих положений, свойственных процессам управления научными исследованиями:

- результаты научного исследования могут переоцениваться во времени;
- экспертная оценка результатов исследования носит субъективный характер и должна взвешиваться с использованием рейтинга эксперта;
- рейтинг эксперта наряду с наукометрическими показателями (ученая степень, звание, публикации и т. д.) должен включать показатели качества проведенных экспертиз и выполненных работ.

Накопление в информационном пространстве цифровой платформы информации по экспертам, научным коллективам, научным сервисам и научным результатам обеспечит применение известных методов наукометрии для научных исследований, организуемых с использованием цифровой платформы.

Цифровая платформа позволит взвешенно оценить актуальность, важность, результативность научных сервисов и распределить ресурсы с использованием принципов состязательности, целесообразности и оптимальности.

#### **4 Основные архитектурные решения системы предоставления научных сервисов цифровой платформы**

С учетом вышеизложенных аспектов определим состав цифровой платформы научных исследований как совокупность следующих компонентов:

- система описания научного сервиса;
- система публикации научного сервиса;
- система классификации научных сервисов;
- система поиска научного сервиса;
- система заказа научного сервиса;
- система планирования и учета ресурсов;
- система учета результатов и экспертных оценок;
- система доступа пользователей.

Система предоставления научных сервисов цифровой платформы создает единое информационное пространство для функционирования научных сервисов, смежных систем и вспомогательных сервисов. Ключевой смежной системой для системы предоставления научных сервисов является аналитическая система. Совместное функционирование этих двух систем в едином информационном пространстве цифровой платформы обеспечит выполнение единого бизнес-процесса управления научными исследованиями в рамках цифровой платформы.

Рассмотрим кратко назначение и основные функции компонентов системы предоставления научных сервисов.

Система описания научного сервиса является основой системы предоставления научных сервисов и предназначена для спецификации карточки научного сервиса, определяющей следующие его основные характеристики:

- идентификационные данные;
- данные поставщика сервиса;
- форму заказа сервиса;
- технологическую карту (методику, процесс) выполнения исследования с указанием потребляемых ресурсов (трудозатраты персонала, время работы приборов, потребление расходных материалов и т. п.);

- процедуры заказа сервиса и согласования изменений в технологической карте (методике) исследования.

Система публикации научного сервиса ведет каталог доступных для заказа научных сервисов, обеспечивает систематизацию «близких» научных сервисов.

Система классификации научных сервисов предназначена для группировки научных сервисов в соответствии с заданными критериями (область исследования, методики исследования, приборная база, территориальная и организационная принадлежность и т. д.) с целью обеспечения быстрого релевантного поиска и систематизации научных сервисов. Для системы классификации предусматривается изменяемый список критериев с динамически перестраиваемой системой группировки.

Система поиска научного сервиса предназначена для нахождения «близких» научных сервисов с использованием системы классификации научных сервисов и данных систем описания научного сервиса, учета результатов и экспертных оценок. В системе предусматриваются блоки поиска «близких» сервисов с использованием методов искусственного интеллекта с элементами самообучения.

Система заказа научного сервиса предназначена для оформления договорных отношений на оказание научной услуги в ходе выполнения процесса выбора и заказа научной услуги во взаимодействии с системами публикации, поиска, описания научного сервиса, планирования и учета ресурсов.

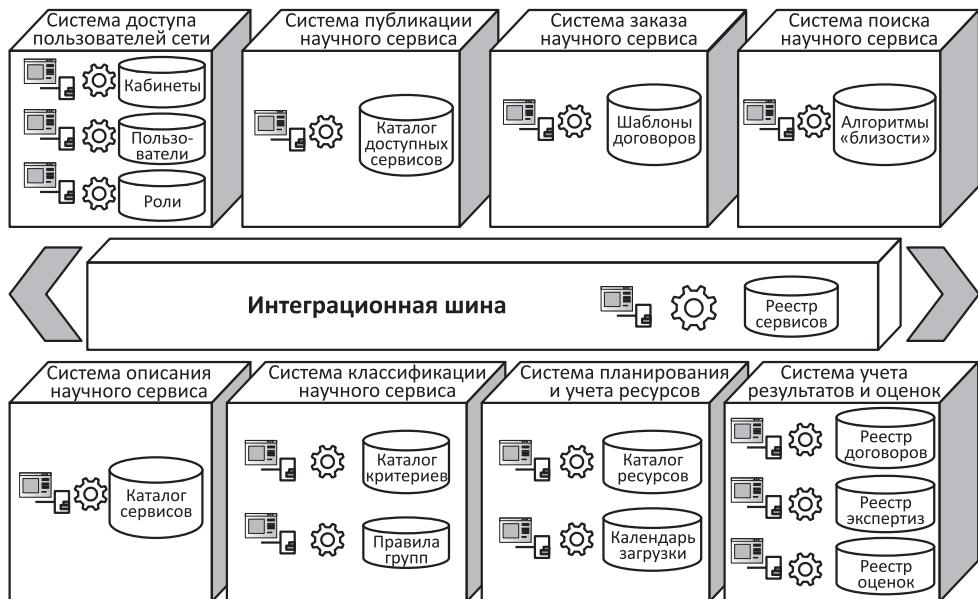
Система планирования и учета ресурсов предназначена для ведения реестра ресурсов (персонала, приборной базы, расходных материалов) и их состояния, а также календаря загрузки и резервирования ресурсов.

Система учета результатов и экспертных оценок предназначена для ведения реестра договоров, результатов интеллектуальной деятельности, включая публикации, согласованных изменений методик и технологических карт исследований, результатов экспертной деятельности.

Система доступа пользователей предназначена для ведения реестра пользователей, обеспечения интерфейса доступа к функциям системы в соответствии с полномочиями пользователей, определяемыми их ролями (поставщик научной услуги, оператор оборудования, потребитель научной услуги, эксперт, аналитик и т. д.). В системе предусматривается изменяемый перечень ролей.

Для создания единого информационного пространства цифровой платформы с высокой степенью масштабирования, эластичности и адаптируемости целесообразно ориентироваться на технологии виртуализации (контейнеризации) вычислительных ресурсов, облачных вычислений, микросервисных архитектур и интеграционных шин.

В этом случае с учетом подходов [9, 10] основные архитектурные решения системы предоставления научных сервисов формируются как сервисно-ориентированный облачный комплекс систем микросервисной архитектуры, связанных интеграционной шиной, предоставляющий услуги пользователям с использованием веб-портальных технологий (рис. 2).



**Рис. 2** Система предоставления научных сервисов цифровой платформы научных исследований

## 5 Заключение

Представленные в статье бизнес-модели организации научных исследований как сервисов цифровой платформы, основные архитектурные решения системы предоставления сервисов цифровой платформы для научных исследований служат современным подходом к организации и управлению научными исследованиями в условиях цифровой экономики.

Представленные подходы к созданию цифровой платформы научных исследований развиваются в ФИЦ ИУ РАН в рамках государственного задания и грантов.

## Литература

1. Цифровая экономика Российской Федерации: Программа, утвержденная Распоряжением Правительства РФ от 28.07.2017 № 1632-р. <http://static.government.ru/media/files/9gFM4FHj4PsB79I5v7yLVuPgu4bvR7M0.pdf>.
2. О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года: Указ Президента РФ от 7 мая 2018 г. № 204. <http://static.kremlin.ru/media/acts/files/0001201805070038.pdf>.

3. Цифровые платформы: подходы к определению и типизации. Ростелеком. [http://d-russia.ru/wp-content/uploads/2018/04/digital\\_platforms.pdf](http://d-russia.ru/wp-content/uploads/2018/04/digital_platforms.pdf).
4. Зацаринный А. А., Горшенин А. К., Волович К. И., Колин К. К., Кондрашев В. А., Степанов П. В. Управление научными сервисами как основа национальной цифровой платформы «Наука и образование» // Стратегические приоритеты, 2017. № 2(14). С. 103–113.
5. Зацаринный А. А., Горшенин А. К., Волович К. И., Кондрашев В. А. Основные направления развития информационных технологий в условиях вызовов цифровой экономики // Цифровая обработка сигналов, 2018. № 1. С. 3–7.
6. Джонсон М., Кристенсен К., Кагерманн Х. Обновление бизнес-модели // Harvard Bus. Rev., 2009. <https://hbr-russia.ru/management/strategiya/a9780>.
7. Швайцер Л. Концепция и эволюция бизнес-моделей // ЭКОВЕСТ, 2007. Т. 6. Вып. 2. С. 146–168. <http://www.research.by/webroot/delivery/files/2007n2r01.pdf>.
8. Исследование вопросов управления результатами научно-исследовательской деятельности организаций, подведомственных ФАНО России, и научными сервисами сети ЦКП ФАНО: Отчет о НИР «Сервис-У». — ФИЦ ИУ РАН, 2016. 437 с.
9. Волович К. И., Денисов С. А., Кондрашев В. А., Сучков А. П. Методология создания веб-сервисного информационного взаимодействия в системе распределенных ситуационных центров // Системы и средства информатики, 2016. Т. 26. № 4. С. 51–59.
10. Волович К. И., Зацаринный А. А., Кондрашев В. А., Шабанов А. П. О некоторых подходах к представлению научных исследований как облачного сервиса // Системы и средства информатики, 2017. Т. 27. № 1. С. 73–84.

Поступила в редакцию 18.07.18

---

---

## ARCHITECTURE OF THE SERVICE DELIVERY SYSTEM FOR THE RESEARCH SERVICES DIGITAL PLATFORM

V. A. Kondrashev

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

**Abstract:** The paper deals with providing scientific services in the digital economy using a digital platform for scientific research. The authors propose a business model of a research services digital platform. The capabilities of a digital platform as a tool for managing scientific research in the digital economy are discussed. The main architectural solutions for the system providing scientific services of the digital platform are described.

**Keywords:** digital platform; cloud service; scientific service; information technology; information support activities; research management; unified information environment

**DOI:** 10.14357/08696527180310

## Acknowledgments

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

## References

1. Tsifrovaya ekonomika Rossiskoy Federatsii: Programma, utverzhдennaya Rasporyazheniem Pravitel'stva RF ot 28.07.2017 No. 1632-r [The program "Digital Economy of the Russian Federation" (approved by the Order of the Government of the Russian Federation dated 28.07.2017 No. 1632-r)]. 2017. Available at: <http://static.government.ru/media/files/9gFM4FHj4PsB79l5v7yLVuPgu4bvR7M0.pdf> (accessed July 20, 2018).
2. O natsional'nykh tselyakh i strategicheskikh zadachakh razvitiya Rossiyskoy Federatsii na period do 2024 goda: Uzak Presidenta RF ot 7 maya 2018 g. No. 204 [Decree of the President of the Russian Federation dated May 7, 2018, No. 204 "On national goals and strategic tasks for the development of the Russian Federation for the period up to 2024"]. 2018. Available at: <http://static.kremlin.ru/media/acts/files/0001201805070038.pdf> (accessed July 20, 2018).
3. Rostelecom. 2018. Tsifrovye platformy: podkhody k opredeleniyu i tipizatsii [Digital platforms approaches to definition and typification]. Available at: [http://d-russia.ru/wp-content/uploads/2018/04/digital\\_platforms.pdf](http://d-russia.ru/wp-content/uploads/2018/04/digital_platforms.pdf) (accessed July 20, 2018).
4. Zatsarinnyy, A. A., A. K. Gorshenin, K. I. Volovich, K. K. Kolin, V. A. Kondrashev, and P. V. Stepanov. 2017. Upravlenie nauchnymi servisami kak osnova natsional'noy tsifrovoy platformy "Nauka i obrazovanie" [Management of scientific services as the basis of the national digital platform "Science and Education"]. *Strategicheskie prioritety* [Strategic Priorities] 2(14):103–113.
5. Zatsarinnyy, A. A., A. K. Gorshenin, K. I. Volovich, and V. A. Kondrashev. 2018. Osnovnye napravleniya razvitiya informatsionnykh tekhnologiy v usloviyakh vyzovov tsifrovoy ekonomiki [The main directions of the development of information technologies in the face of the challenges of the digital economy]. *Digital Signal Processing* 1:3–7.
6. Johnson, M., K. Christensen, and H. Kagermann. 2009. Updating the business model. *Harvard Bus. Rev.* Available at: <https://hbr-russia.ru/management/strategiya/a9780> (accessed July 20, 2018).
7. Schweizer, L. 2007. The concept and evolution of business models. *ECOVEST* 6(2):146–168. Available at: <http://www.research.by/webroot/delivery/files/2007n2r01.pdf> (accessed July 20, 2018).
8. FRC CSC RAS. 2016. Issledovanie voprosov upravleniya rezul'tatami nauchno-issledovatel'skoy deyatel'nosti organizatsiy, podvedomstvennykh FANO Rossii, i nauchnymi servisami seti TsKP FANO: Otchet o NIR "Servis-U" [Report on the research "Service-U." Study of the issues of managing the results of research activities of organizations subordinate to FASO of Russia and the scientific services of the FASO CKP]. 437 p.
9. Volovich, K. I., S. A. Denisov, V. A. Kondrashev, and A. P. Suchkov. 2016. Metodologiya sozdaniya web-servisnogo informatsionnogo vzaimodeystviya v sisteme raspredelennykh situatsionnykh tsentrov [Methodology of creating web-service interactions

- in the systems of distributed situational centers]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — System and Means of Informatics* 26(4):51–59.
10. Volovich, K. I., A. A. Zatsarinnyy, V. A. Kondrashev, and A. P. Shabanov. 2017. O nekotorykh podkhodakh k predstavleniyu nauchnykh issledovaniy kak oblachnogo servisa [Scientific research as a cloud service]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — System and Means of Informatics* 27(1):73–84.

*Received July 18, 2018*

## **Contributor**

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

## НАКЛАДНЫЕ РАСХОДЫ ВИРТУАЛИЗАЦИИ И ВЛИЯЮЩИЕ НА НИХ ФАКТОРЫ

*В. Б. Егоров<sup>1</sup>*

**Аннотация:** Виртуализация, все шире проникая в современные информационные и телекоммуникационные системы, обеспечивает им большую информационную безопасность благодаря более надежной изоляции пользователей виртуализированных систем и приложений друг от друга, а также дает ряд сопутствующих преимуществ, включающих повышение эффективности менеджмента и сокращение эксплуатационных затрат. Однако все эти преимущества достигаются за счет определенных накладных расходов, снижающих общую суммарную производительность виртуализированной системы по сравнению с производительностью физической машины (ФМ). Эти расходы имеют несколько составляющих и зависят от уровня и степени виртуализации, а также ряда дополнительных факторов, таких как особенности операционных систем и гипервизоров или специфика аппаратных средств поддержки виртуализации в процессорах серверов. Достижение удовлетворительной эффективности виртуализации невозможно без понимания влияющих на нее факторов и адекватной оценки степени влияния каждого из них.

**Ключевые слова:** аппаратная поддержка виртуализации; контейнеризация; накладные расходы виртуализации; виртуализация на уровне машины; виртуализация на уровне операционной системы

**DOI:** 10.14357/08696527180311

### 1 Введение

Виртуализация все шире проникает в современные информационные и телекоммуникационные системы, охватывая самый широкий спектр средств вычислительной техники от персональных компьютеров до мощных серверов и целых их агрегаций в центрах обработки данных (ЦОД). Абстрагирование программного обеспечения (ПО) от аппаратуры дает администраторам ЦОД целый ряд существенных преимуществ, включающих повышение эффективности менеджмента и сокращение эксплуатационных затрат, а также, что особенно важно не только для администрации ЦОД, но и для пользователей «облаков», большую информационную безопасность за счет более надежной изоляции абонентов и приложений друг от друга.

Однако как не бывает худа без добра, так и добра — без худа. Всякая виртуализация любой системы неизбежно требует определенных накладных расходов, которые могут рассматриваться в трех основных аспектах:

<sup>1</sup>Институт проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук, vegerov@ipiran.ru

- (1) дополнительных затрат памяти в системе, причем как оперативной, так и дисковой;
- (2) снижения суммарной производительности системы вследствие дополнительной служебной нагрузки на ее вычислительные и коммуникационные ресурсы;
- (3) ограничений по использованию и необходимости доработки конкретного системного ПО или специального оформления прикладного ПО.

Издергки виртуализации во всех перечисленных аспектах зависят от очень многих факторов: уровня, типа и степени виртуализации системы, а также наличия и особенностей аппаратных средств поддержки виртуализации в ее процессорах. Настоящая статья призвана обозначить сложности оценки накладных расходов виртуализации с учетом множественности влияющих на них факторов и по возможности дать хотя бы качественную оценку этого влияния.

## **2 Уровни, типы и степени виртуализации**

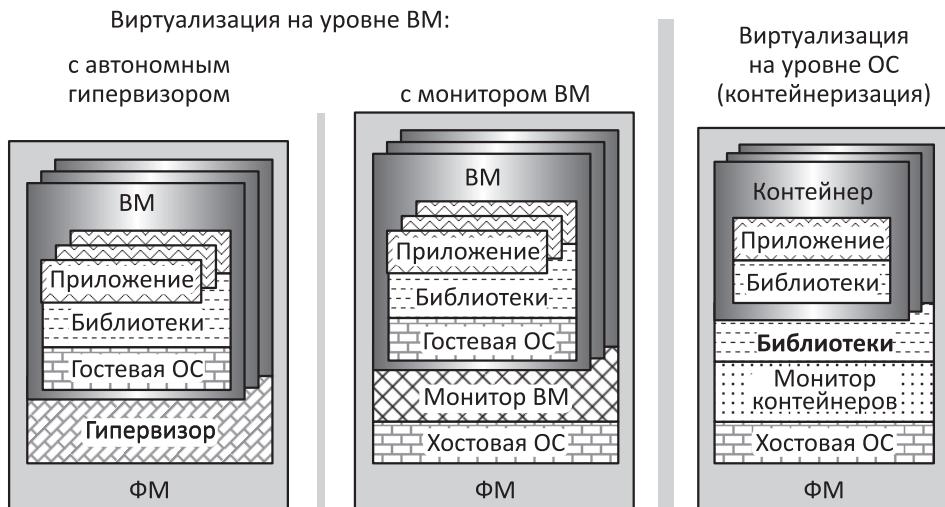
В настоящее время виртуализация находит практическое воплощение на двух уровнях:

- (1) уровне машины, предоставляющем множеству виртуальных машин (ВМ) возможность работать на одной ФМ как хосте, а отдельным ВМ мигрировать в процессе работы с одной ФМ на другую;
- (2) уровне операционной системы (ОС), позволяющем работать на ФМ под управлением одной хостовой ОС множеству изолированных приложений, оформленных специальным образом, например в виде контейнеров, и также способных к миграции на другие ФМ с аналогичной хостовой ОС.

Виртуализация на уровне ОС, часто именуемая контейнеризацией, относительно молодая, и ей еще предстоит отвоевывать свое место под солнцем, хотя даже небольшой имеющийся опыт ее применения позволяет делать весьма оптимистические прогнозы [1]. В отличие от контейнеризации, виртуализация на уровне ВМ имеет достаточно долгую историю и уже успела обзавестись двумя различающимися вариантами реализации:

- (1) с автономным гипервизором (также часто называемым гипервизором первого типа), работающим непосредственно на аппаратуре ФМ и выполняющим одновременно функции хостовой ОС и монитора ВМ (*virtual machine monitor*);
- (2) с сателлитным гипервизором (также иногда называемым гипервизором второго типа), работающим на ФМ «поверх» хостовой ОС и выполняющим только функции монитора ВМ.

Концептуальные различия виртуализации на уровне ВМ обоих типов и на уровне ОС проиллюстрированы на рис. 1.



**Рис. 1** Концепции виртуализации на уровне ВМ и ОС

При виртуализации на уровне машины необходимость в дополнительных объемах системной памяти связана с появлением гипервизора или монитора ВМ, тиражированием гостевых ОС и библиотек, а также введением некоторых дополнительных специфических структур данных, таких, например, как «теневые» таблицы страниц памяти (shadow memory page tables). Снижение общей производительности системы вызывается необходимостью эмуляции монитором ВМ некоторых системных функций гостевых ОС, в первую очередь ввода-вывода и отражения виртуальной памяти на физическую, выполняемых на ВМ не так, как они выполняются на ФМ [2]. Потери производительности при виртуализации сильно зависят от степени виртуализации и используемых специальных аппаратных средств.

В методологии виртуализации на уровне ВМ принято различать полную и частичную виртуализацию (паравиртуализацию). Полная виртуализация предполагает тотальное абстрагирование от виртуализируемой ФМ и хостовой ОС. В полностью виртуализированной среде гостевые ОС и приложения ВМ могут функционировать без каких-либо доработок и изменений так же, как они функционировали бы на ФМ. Этот подход имеет то очевидное преимущество, что полностью развязывает аппаратуру и ПО системы, давая возможность прямых миграций ВМ между различными ФМ с разными хостовыми ОС. Однако полная виртуализация дается не даром. Чтобы разные гостевые ОС работали идентичным образом под разными мониторами ВМ, эти ОС при загрузке ВМ подвергаются гипервизором так называемой двоичной трансляции. В результате такой трансляции специфические системные функции гостевой ОС подменяются инструкциями «вызыва гипервизора» (hypercalls) и в процессе работы ВМ

эмулируются гипервизором или монитором ВМ. Как и всякая эмуляция, такое вмешательство заметно снижает общую производительность виртуализируемой системы. Таким образом, за более высокую универсальность и информационную безопасность полной виртуализации приходится расплачиваться более высокими накладными расходами и по памяти, и по производительности [3].

Паравиртуализация в отличие от полной виртуализации предполагает предварительную адаптацию гостевой ОС к конкретному монитору ВМ. Например, имеется специальная версия «паравиртуализированного» гипервизора Xen и адаптированное под него ядро ОС Linux со специальным набором драйверов [4]. С точки зрения производительности паравиртуализация считается более выигрышным подходом, так как она исключает необходимость двоичной трансляции кода гостевых ОС при загрузке ВМ, а также предполагает более эффективное взаимодействие гостевых ОС с гипервизором или монитором ВМ за счет более «дружественного» вследствие предварительной адаптации интерфейса. При благоприятных обстоятельствах накладные расходы виртуализации в паравиртуализируемых системах могут стать пренебрежимо малыми. Однако это справедливо, если не включать в накладные расходы паравиртуализации одноразовые, но дорогостоящие затраты на адаптацию гостевых ОС и мониторов ВМ друг к другу.

Весьма значительную дополнительную вариативность в накладные расходы виртуализации могут привносить специальные аппаратные решения в процессорах серверов. При общих в целом целях конкретные решения по аппаратной поддержке виртуализации различаются у разных фирм. Например, компании Intel и AMD для общей базовой архитектуры x86 применяют разные фирменные технологии аппаратной виртуализации: Intel VT и AMD-SVM соответственно. Стараются не отставать и другие ведущие производители процессоров, в частности компании ARM и MIPS (приобретена компанией Imagination Technologies). Как правило, последние семейства процессоров обеих этих архитектур имеют те или иные средства аппаратной поддержки виртуализации. Однако тут ситуация усугубляется различием базовых архитектур, вследствие чего конкретные решения тоже оказываются более или менее разными. Между тем каждое из этих решений оказывает свое уникальное влияние на величину накладных расходов виртуализации, причем это влияние зависит от ее уровня и степени, а также особенностей конкретных мониторов ВМ и гостевых ОС.

Таким образом, при оценке накладных расходов виртуализации на уровне ВМ необходимо принимать во внимание целый ряд влияющих факторов:

- уровень виртуализации: ВМ или ОС (контейнеризация);
- степень виртуализации на уровне ВМ: полную или частичную;
- тип виртуализации на уровне ВМ: с автономным гипервизором (типа I) или комбинацией хостовой ОС с монитором ВМ (гипервизором типа II);
- наличие и особенности средств аппаратной поддержки виртуализации в процессоре ФМ.

### 3 Влияние виртуализации на ресурсы физической машины

И ВМ, и контейнеры физически проявляются, хранятся и мигрируют некоторыми «образами», т. е. в конечном счете блоками двоичного кода. С точки зрения размера образа ВМ, содержащая целиком всю гостевую ОС, существенно проигрывает контейнеру, который включает только приложение с некоторой конфигурационной информацией и в простейших случаях может ограничиться объемами памяти порядка 1 МБ, т. е. по качественной оценке перемещение виртуализации с уровня ВМ на уровень ОС дает радикальную экономию оперативной и дисковой памяти в виртуализируемых системах. Однако более детальное количественное рассмотрение вопроса может внести заметные корректизы.

Во-первых, согласно некоторым оценкам [5], при небольшом числе ВМ на ФМ и небольших, порядка сотен мегабайт, объемах памяти в самих ВМ накладные расходы виртуализации по памяти в зависимости от числа ВМ действительно могут достигать 40%. Однако при большом числе ВМ и больших объемах памяти в них, исчисляемых десятками гигабайт на ВМ, накладные расходы сокращаются до 0,5%...1,5%. Таким образом, в тех ситуациях, в которых накладные расходы памяти наиболее критичны, в частности на больших системах ЦОД, их относительная величина становится пренебрежимо малой. Поэтому вряд ли накладные расходы памяти могут стать решающим фактором выбора уровня виртуализации.

Во-вторых, если работающие на одном хосте ВМ используют одну и ту же ОС, то многие страницы памяти, занимаемые ВМ в оперативной памяти ФМ, оказываются одинаковыми. Это обстоятельство позволяет экономить на требуемом объеме памяти ФМ, например за счет механизма объединения одних и тех же страниц KSM (Kernel Same-page Merging), реализованного, в частности, в ядре ОС Linux. Этот механизм позволяет нескольким ВМ использовать одну и ту же страницу физической памяти и тем самым избежать дублирования страниц. Очевидно, что эффективность этого механизма тем выше, чем выше доля ВМ с одинаковыми ОС, т. е. усредненные относительные накладные расходы виртуализации по памяти уменьшаются с ростом числа ВМ, одновременно работающих на одной ФМ. При благоприятном стечении обстоятельств накладные расходы памяти при виртуализации на уровне ВМ могут стать соизмеримыми с накладными расходами при виртуализации на уровне ОС. Однако создание таких благоприятных обстоятельств может потребовать немалых усилий квалифицированного администратора по оценке реальной производительности виртуализированной системы и оптимизации ее параметров [6].

При оценке накладных расходов виртуализации ввода-вывода следует иметь в виду, что одновременно работающие на одном хосте ВМ существенно влияют друг на друга. Наиболее наглядно это влияние проявляется на устройствах ввода-вывода и сетевых адаптерах, например в «облаке» OpenStack. Существуют разные способы виртуализации дисков, сети и ввода-вывода, а также методик их оценки и сравнения. Соответственно, имеется множество оценок накладных расходов виртуализации ввода-вывода и сети. Эти оценки настолько различ-

**Таблица 1** Накладные расходы виртуализации на уровнях ВМ и ОС

Система	Усредненная пропускная способность, Мбит/с	Усредненная девиация	Накладные расходы виртуализации, Мбит/с
ФМ	29,066	1,282	—
ВМ	12,843	2,979	55,8%
Контейнер	28,484	1,978	2,0%

ны и несопоставимы, что вряд ли могут служить надежной путеводной нитью в выборе средств и методов виртуализации. Пожалуй, единственным безусловно верным утверждением относительно накладных расходов виртуализации сетевых устройств и устройств ввода-вывода будет преимущество виртуализации на уровне ОС перед виртуализацией на уровне машины. В качестве типичного примера можно привести практическую оценку зависимости величины накладных расходов от уровня виртуализации. В табл. 1 показаны результаты сравнения усредненной пропускной способности ВМ и контейнера, единственных на ФМ, на типовом бенчмарке генерации сетевого трафика IPERF [1].

Хотя к абсолютным величинам следует относиться с осторожностью, на качественном уровне тест демонстрирует абсолютное преимущество контейнеризации по сравнению с гипервизорной виртуализацией, по крайней мере в отношении сетевого трафика. Это преимущество проявляется прежде всего в существенно меньших накладных расходах, а также в заметно более узком диапазоне разброса измерений.

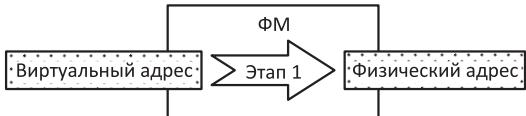
#### 4 Аппаратная поддержка виртуализации

В современных процессорах серверного класса аппаратные средства поддержки виртуализации становятся обязательным компонентом. Они включают, как правило, три составляющих:

- (1) дополнительные гостевые режимы процессора;
- (2) механизм виртуализации трансляции адресов памяти;
- (3) виртуализируемый обработчик прерываний.

Гостевые режимы процессора могут быть как пользовательскими (guest user mode), так и системными (guest kernel mode) и аппаратно гарантируют взаимную изоляцию приложений, которые могут общаться только через гипервизор или хостовую ОС, работающие в корневом режиме (root mode). Разделение корневых и гостевых режимов дает возможность диспетчеру памяти задействовать раздельные адресные таблицы для хостовых и гостевых ОС с автоматическим их переключением при передаче управления от ВМ к гипервизору и обратно,

### Традиционный режим трансляции адресов



### Дополнительный режим трансляции с поддержкой виртуализации



**Рис. 2** Двухэтапное преобразование адреса в архитектуре VMSA

что существенно ускоряет смену контекстов и тем самым сокращает накладные расходы виртуализации.

При паравиртуализации перезагрузка адресных таблиц диспетчера памяти выполняется гипервизором и заметно замедляет работу виртуализируемой системы. Чтобы избежать этого, в архитектуре виртуальной системы памяти VMSA (Virtual Memory System Architecture) компании ARM трансляция адресов памяти выполняется в два этапа. В дополнение к традиционному преобразованию виртуального адреса в физический вводится второй этап преобразования получившегося на первом этапе адреса в окончательный физический (рис. 2). Преобразование на первом этапе происходит внутри ВМ под контролем гостевой ОС, и получающийся при этом промежуточный адрес представляет собой «физический адрес ВМ». В физический адрес ФМ он превращается на втором этапе уже под контролем гипервизора. Эффект от такого механизма неоднозначен. Он сокращает число обращений к супервизору, но зато привносит свои накладные расходы в трансляцию адресов.

## 5 Особенности контейнеризации

Как отмечалось выше, виртуализация на уровне ОС имеет преимущество перед виртуализацией на уровне машины в размере образа. Однако помимо снижения накладных расходов памяти контейнеризация за счет меньшего размера образа существенно ускоряет процесс его миграции с хоста на хост.

В целом контейнеризация более «неприхотлива» и доступна даже для менее квалифицированного персонала, хотя, может быть, и не так универсальна. В частности, механизм KSM можно задействовать для контейнеров лишь с определенными ограничениями. Так, в случае файловых систем AUFS (Another Union File System) или OverlayFS (Overlay File System) для работы KSM потребуется специальный драйвер загрузки файлов из идентичных контейнеров.

А в подсистеме виртуализации блочных устройств DeviceMapper или файловой системе BTRFS (B-TRee File System) механизм KSM вообще работать не сможет, так как маркировка страниц идентификаторами устройств исключает обобществление маркированных таким образом страниц [6].

В качестве еще одного недостатка контейнеризации можно отметить отсутствие в существующих мониторах контейнеров поддержки мультиарендности (multitenancy), уже реализованной на уровне ВМ в «облачной» платформе OpenStack. Однако в ближайшее время ожидается появление поддержки мультиарендности в таком популярном мониторе контейнеров с открытым кодом, как Kubernetes [6].

Если рассматривать сетевые аспекты контейнеризации, то некоторые накладные расходы могут быть связаны с сетевой конфигурацией контейнеров. Например, общие сетевые интерфейсы для хоста и работающих на нем контейнеров уменьшили бы накладные расходы по производительности, поскольку в этом случае процессы внутри контейнеров использовали бы сеть таким же образом, как и процессы вне них. Однако такое обобщение нарушает изоляцию содержимого контейнеров, которая является принципиальным и важнейшим атрибутом контейнеризации. Альтернативным решением может выступать создание собственных сетей для каждого контейнера или группы контейнеров, работающих на одном или нескольких хостах. Однако такой подход привносит свои накладные расходы, связанные с тем, что исходящие и входящие в контейнер пакеты вынуждены проходить большее число уровней преобразования, связанных с виртуализацией. С другой стороны, то же самое справедливо и для ВМ, в которых сетевая виртуализация происходит аналогичным образом, например в виртуальных коммутаторах Open vSwitch.

## **6 Некоторые практические оценки**

С учетом множественности влияющих факторов реальные оценки накладных расходов виртуализации весьма противоречивы. Хотя имеется много частных оценок для разных ОС и гипервизоров, например [7], наиболее интересны оценки производительности, сделанные в сравнении идентичных конфигураций двух машин: физической и виртуальной. Так, в эксперименте [8] сравнивалась реакция ФМ и ВМ, работавших на одном и том же сервере, на запросы клиентской машины. В обоих случаях клиентская машина генерировала запросы обслуживания, а серверная, ФМ или ВМ, их обслуживала и возвращала результат клиентской. В табл. 2 представлена спецификация аппаратуры обеих машин.

Чтобы исключить накладные расходы, связанные с многопроцессорностью и параллельной обработкой, в обеих конфигурациях было задействовано только по одному процессору, соответственно физическому для ФМ и виртуальному для ВМ. Для генерации запросов использовались 5 разных тестовых программ. Накладные расходы определялись как разность между усредненными временами реакции виртуальной и физической конфигураций. Результаты тестов сведены в табл. 3. Из них видно, что время реакции в обеих машинах нарастает по мере

**Таблица 2** Спецификация аппаратуры машин

Аппаратура	Серверная машина	Клиентская машина
Компьютер	HP ProLiant DL380 G7	Dell PowerEdge R710
Процессор	2x Intel Xeon X5690, 3,47 ГГц, 4 ядра на сокет	2x Intel Xeon X5690, 3,40 ГГц, 4 ядра на сокет
Память	64 ГБ	48 ГБ
NIC	1 адаптер Broadcom NetXtreme II, 10 ГБ/с	1 адаптер Broadcom NetXtreme II, 10 ГБ/с

**Таблица 3** Результаты тестов на ФМ и ВМ

Тестовые программы	ФМ	ВМ	Накладные расходы
PING	26 мкс	39 мкс	13 мкс (50%)
NETPERF	38 мкс	52 мкс	14 мкс (37%)
GEMFIRE_GET	72 мкс	88 мкс	16 мкс (22%)
APACHE	88 мкс	106 мкс	18 мкс (20%)
GEMFIRE_PUT	134 мкс	157 мкс	23 мкс (17%)

усложнения тестов; параллельно нарастают и абсолютные значения накладных расходов виртуализации, однако относительные накладные расходы, наоборот, уменьшаются.

В другом эксперименте, где в аналогичных условиях оценивались, в частности, накладные расходы виртуализации на уровне машины и ОС, был сделан качественный вывод, что «контейнерная виртуализация привносит значительно меньшие накладные расходы по сравнению с виртуализацией на базе гипервизоров» [9].

## 7 Заключение

Виртуализации на уровнях ВМ и ОС — не соперники, поскольку решают разные задачи. Контейнеры эффективны там, где нужно исполнять как можно больше приложений на как можно меньшем числе серверов при относительно небольшом разнообразии ОС. Виртуальные машины незаменимы, когда приходится иметь дело сразу со многими разными ОС. В обозримом будущем в большинстве ЦОД будут использоваться и ВМ, и контейнеры, поэтому важно, чтобы появилась универсальная «облачная» платформа, желательно с открытым кодом, способная поддерживать сразу оба уровня виртуализации. На данном этапе все указывает на то, что ею будет OpenStack.

Результаты оценки накладных расходов для разных уровней и степеней виртуализации в большой степени подтверждают общий тезис: усредненные на-

кладные расходы виртуализации на уровне ОС в целом существенно ниже, чем на уровне ВМ [1, 8–10]. Например, при передаче данных в сеть накладные расходы контейнера по пропускной способности не превысили 4%. Виртуальная машина почти по всем параметрам показала худшие характеристики за исключением решения «задачи  $N$  ферзей» ( $N$ -queens problem) и записи на диск малоразмерных данных [1]. К сожалению, пока нет результатов сравнения двух типов виртуализации на уровне ВМ с гипервизорами разных типов. Тем не менее в качестве общего правила можно постулировать существенно меньшие накладные расходы виртуализации на уровне ОС по сравнению с расходами на уровне ВМ.

Также, судя по имеющимся оценкам, общим правилом является уменьшение относительных накладных расходов виртуализации на всех уровнях по мере увеличения числа ВМ и контейнеров, работающих на одной ФМ. Следовательно, можно надеяться, что у администраторов современных ЦОД, включающих все большее число высокопроизводительных серверов со все большим числом работающих на них ВМ и контейнеров, величина накладных расходов виртуализации не будет самой большой головной болью.

## Литература

1. *Li Z., Kihl M., Lu Q., Andersson J. A.* Performance overhead comparison between hypervisor and container based virtualization // IEEE Xplore. Digital Library, 2018. <https://arxiv.org/pdf/1708.01388.pdf>.
2. *Halder K.* Virtualization overhead. 2011. [https://www.cse.iitb.ac.in/synerg/lib/exe/fetch.php?media=public:students:kishaloy:virtualization\\_overhead.pdf](https://www.cse.iitb.ac.in/synerg/lib/exe/fetch.php?media=public:students:kishaloy:virtualization_overhead.pdf).
3. *Ferro G.* Intro to server virtualization: Hypervisor vs. paravirtualization // Petri IT Knowledgebase, 2012. <https://www.petri.com/hypervisor-vs-paravirtualization>.
4. *Bigelow S. J.* Full virtualization vs. paravirtualization: What are the key differences? // TechTarget, 2017. <http://searchservervirtualization.techtarget.com/answer/Full-virtualization-vs-paravirtualization-What-are-the-key-differences>.
5. Overhead memory on virtual machines. — VMware vSphere Online Library, 2016. [http://pubs.vmware.com/vsp40\\_i/wwhelp/wwhimpl/common/html/wwhelp.htm#href=resmgmt/r\\_overhead\\_memory\\_on\\_virtual\\_machines.html#1.7\\_9\\_9\\_10\\_1&single=true](http://pubs.vmware.com/vsp40_i/wwhelp/wwhimpl/common/html/wwhelp.htm#href=resmgmt/r_overhead_memory_on_virtual_machines.html#1.7_9_9_10_1&single=true).
6. *Wachowicz P., Shapovalov T.* Containers vs. VMs technology smackdown. — Bright computing, 2016. <http://www.brightcomputing.com/container-vm-ebookhsCtaTracking=3cecb294-7980-438f-a59c-6ab6328f23fe%7C6f88804e-77cd-470d-a8a7-5811d0f943b1>.
7. *Tschudin P. S.* Performance overhead and comparative performance of 4 virtualization solutions. 2012. <http://petersenna.com/files/peters-top4-virtualization-benchmark-1.29.pdf>.
8. *Heo J., Taheri R.* Virtualizing latency-sensitive applications: Where does the overhead come from? // VMTJ, 2013. <https://labs.vmware.com/vmtj/virtualizing-latency-sensitive-applications-where-does-the-overhead-come-from>.
9. *Баранов А. В., Николаев Д. С.* Использование контейнерной виртуализации в организации высокопроизводительных вычислений. — Межведомственный су-

перкомутерный центр РАН, 2015. [http://2015.nscf.ru/TesisAll/2\\_Systemnoe\\_i\\_promezhytochnoe\\_PO/07\\_481\\_BaranovAV.pdf](http://2015.nscf.ru/TesisAll/2_Systemnoe_i_promezhytochnoe_PO/07_481_BaranovAV.pdf).

10. Huber N., von Quast M., Hauck M., Kounev S. Evaluating and modeling virtualization performance overheads for cloud environments // Semantic Scholar, 2011. <https://pdfs.semanticscholar.org/0d7e/cdb820c8e0ae41bbf05eb064fd646689b065.pdf>.

Поступила в редакцию 29.03.18

---

## VIRTUALIZATION OVERHEADS AND FACTORS AFFECTING THEM

*V. B. Egorov*

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

**Abstract:** Virtualization increasingly penetrating present-day information and communication systems provides them with greater information security due to more reliable mutual isolation of multiple users and applications; it also provides system administrators' management efficiency and essential reduction of operating costs. All these advantages are achieved, however, at the expense of certain overheads that decrease the general performance of a virtualized system as compared with a physical machine. The overheads have a number of components, which depend on a level and degree of virtualization and are influenced by several factors, such as peculiarities of operating systems and hypervisors, or a specific character of the hardware virtualization support within server processors. Achieving satisfactory virtualization effectiveness is unfeasible without understanding the influencing factors and adequate estimation of the extent of influence regarding each of them.

**Keywords:** containerization; hardware virtualization support; machine level virtualization; operating system level virtualization; virtualization overheads

**DOI:** 10.14357/08696527180311

## References

1. Li, Z., M. Kihl, Q. Lu, and J. A. Andersson. 2018. Performance overhead comparison between hypervisor and container based virtualization. *IEEE Xplore. Digital Library*. Available at: <https://arxiv.org/pdf/1708.01388.pdf/> (accessed March 29, 2018).
2. Halder, K. 2011. Virtualization overhead. Available at: [https://www.cse.iitb.ac.in/synerg/lib/exe/fetch.php?media=public:students:kishaloy:virtualization\\_overhead.pdf/](https://www.cse.iitb.ac.in/synerg/lib/exe/fetch.php?media=public:students:kishaloy:virtualization_overhead.pdf/) (accessed March 29, 2018).

3. Ferro, G. 2012. Intro to server virtualization: Hypervisor vs. paravirtualization. *Petri IT Knowledgebase*. Available at: <https://www.petri.com/hypervisor-vs-paravirtualization/> (accessed March 29, 2018).
4. Bigelow, S. J. 2017. Full virtualization vs. paravirtualization: What are the key differences? *TechTarget*. Available at: <http://searchservervirtualization.techtarget.com/answer/Full-virtualization-vs-paravirtualization-What-are-the-key-differences/> (accessed March 29, 2018).
5. Overhead memory on virtual machines. 2016. VMware vSphere Online Library. Available at: [http://pubs.vmware.com/vsp40\\_1/wwhelp/wwimpl/common/html/wwhelp.htm#href=resmgmt/r\\_overhead\\_memory\\_on\\_virtual\\_machines.html#1\\_7\\_9\\_9\\_10\\_1&single=true/](http://pubs.vmware.com/vsp40_1/wwhelp/wwimpl/common/html/wwhelp.htm#href=resmgmt/r_overhead_memory_on_virtual_machines.html#1_7_9_9_10_1&single=true/) (accessed March 29, 2018).
6. Wachowicz, P., and T. Shapovalov. 2016. Containers vs. VMs technology smackdown. *Bright computing*. Available at: <http://www.brightcomputing.com/container-vm-ebook?hsCtaTracking=3cecb294-7980-438f-a59c-6ab6328f23fe%7C6f88804e-77cd-470d-a8a7-5811d0f943b1/> (accessed March 29, 2018).
7. Tschudin, P. S. 2012. Performance overhead and comparative performance of 4 virtualization solutions. Available at: <http://petersenna.com/files/peters-top4-virtualization-benchmark-1.29.pdf/> (accessed March 29, 2018).
8. Heo, J., and R. Taheri. 2013. Virtualizing latency-sensitive applications: Where does the overhead come from? *VMTJ*. Available at: <https://labs.vmware.com/vmtj/virtualizing-latency-sensitive-applications-where-does-the-overhead-come-from/> (accessed March 29, 2018).
9. Baranov, A. V., and D. S. Nikolaev. 2015. Ispol'zovanie konteynernoy virtualizatsii v organizatsii vysokoproizvoditel'nykh vychisleniy [Using container virtualization in high-performance computing organization]. Mezhvedomstvennyy superkompyuternyy tsentr RAN [Interdepartmental Supercomputer Center of the Russian Academy of Sciences]. Available at: [http://2015.nscf.ru/TesisAll/2\\_Systemnoe\\_i\\_promezhytochnoe\\_PO/07\\_481\\_BaranovAV.pdf/](http://2015.nscf.ru/TesisAll/2_Systemnoe_i_promezhytochnoe_PO/07_481_BaranovAV.pdf/) (accessed March 29, 2018).
10. Huber, N., M. von Quast, M. Hauck, and S. Kounev. 2011. Evaluating and modeling virtualization performance overheads for cloud environments. *Semantic Scholar*. Available at: [https://pdfs.semanticscholar.org/0d7e/cdb820c8e0ae41bbf05eb064fd646689b065.pdf/](https://pdfs.semanticscholar.org/0d7e/cdb820c8e0ae41bbf05eb064fd646689b065.pdf) (accessed March 29, 2018).

Received March 29, 2018

## Contributor

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

## МЕТАЯЗЫК ДЛЯ ГИБРИДНЫХ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ ВИЗУАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ СЕТЬЯМИ: РЕСУРСЫ, СВОЙСТВА И ДЕЙСТВИЯ\*

*А. В. Колесников<sup>1</sup>, С. В. Листопад<sup>2</sup>, Ф. Г. Майтаков<sup>3</sup>*

**Аннотация:** Традиционно моделирование интеллектуальных рассуждений в гибридных интеллектуальных системах основано на символично-логических моделях знаний. В то же время эксперты, решая практические задачи, оперируют преимущественно визуально-образными знаниями. Визуализация качественно меняет работу субъекта управления, позволяя ему с одного взгляда распознать проблемную ситуацию и «увидеть ее решение» без логических умозаключений. Сложность моделирования визуально-образных рассуждений в гибридных интеллектуальных системах обусловлена отсутствием формализованных моделей визуальных языков и высокой научной ценностью разработки специальных сред манипулирования и обработки визуальных моделей. В работе представлено формализованное описание двух базовых уровней метаязыка для гибридных интеллектуальных систем управления электросетями: (1) концептуального и визуального базиса; (2) ресурсов, действий и свойств.

**Ключевые слова:** поддержка принятия решений; визуальный язык; визуальные рассуждения

**DOI:** 10.14357/08696527180312

### 1 Введение

Практика применения функциональных гибридных интеллектуальных систем (ФГиИС) в биопроизводственных [1], социально-экономических [2] и медицинских диагностических системах [3] продемонстрировала их эффективность при решении проблем, требующих знаний коллективов экспертов и выявила их существенный недостаток — отображение сотрудничества посредством имитации только логико-математического интеллекта, языковой коммуникации, левосторонней составляющей рассуждений экспертов и лица, принимающего решения. В действительности взаимодействие экспертов не ограничивается исключительно общением на символьных языках. При решении проблем оперативно-технологического управления электросетями их состояние традиционно визуализируется

\*Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 16-07-00271а).

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

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

<sup>3</sup>Балтийский федеральный университет им. И. Канта, maitakov@mail.ru

мнемосхемами на диспетчерских щитах или видеостенах. Однако из инженерной психологии [4] известно, что работа оператора с образом непосредственно не воспринимаемого объекта, проектирование на этот образ информации, поступающей извне, — трудная задача, а применяемые в современных событийно-технологических и визуально-сituационных [5] подходах к поддержке решений мнемонические графические изображения не релевантны ментальному образу, на который оператор ориентируется в своей деятельности, «мешают работать», «мешают выполнять действия в уме».

Методы визуализации информации для принятия решений исследуются в визуальном управлении и контроле, визуальном мышлении, когнитивной психологии и лингвистике, инженерии образов и других научных направлениях, обобщены и развиты в работах О. С. Анисимова, Ю. Р. Валькмана, Б. А. Кобринского, О. П. Кузнецова, Г. С. Осипова, Д. А. Поспелова, В. Б. Таракова, И. Б. Фоминых, Г. П. Щедровицкого, А. Е. Янковской, Р. Арнхейма, Э. Бено, У. Боумена, М. Верхеймера, Д. Роэма, Д. Сиббета. Для снижения трудоемкости разработки визуальных языков в [6] предложена неформальная аксиоматическая теория ролевых визуальных моделей на основе принципов теории систем и системного анализа. В настоящей работе представлено формализованное описание двух базовых уровней метаязыка для ФГИС визуального управления электросетями, позволяющего диспетчеру получить целостную оперативную картину ситуации и рекомендации ФГИС.

## **2 Элементы визуального метаязыка**

В [6] показано, что визуальный метаязык — семейство из 8 уровней визуальных языков для автоматизированных рассуждений в интеллектуальных системах [7]:

- (1) концептуального и визуального базиса  $vl^1$ ;
- (2) ресурсов, действий и свойств  $vl^2$ ;
- (3) иерархий ресурсов, действий, свойств  $vl^3$ ;
- (4) пространственных и производственных структур  $vl^4$ ;
- (5) состояний, ситуаций и событий  $vl^5$ ;
- (6) задач и проблем  $vl^6$ ;
- (7) моделей рассуждений экспертов  $vl^7$ ;
- (8) интегрированных моделей рассуждений коллективного интеллекта  $vl^8$ .

При этом в зависимости от требований поставленной задачи отдельные уровни могут отсутствовать. Таким образом, визуальный метаязык представляется выражением:

$$mvl = \langle vl^1, vl^2, vl^3, vl^4, vl^5, vl^6, vl^7, vl^8, VLR \rangle,$$

где VLR — множество отношений между элементами языков  $vl^k$ ,  $k \in \mathbb{N}$ ,  $k \in [1, 8]$ . На каждом языковом уровне  $vl^1$ – $vl^8$  выделяется гетерогенное образно-визуальное ядро базовых для данного уровня знаков  $VT^k$ , т. е. алфавит языка уровня  $k$ . Визуальное ядро языков высшего уровня включает знаки ядра более низкого уровня  $VT^k \subseteq VT^{k+1}$  и может содержать знаки из словаря языка более низкого уровня  $VT^{k+1} \cap VN^k \neq \emptyset$ ,  $k \in \mathbb{N}$ ,  $k \in [1, 7]$ . На каждом уровне могут строиться графические высказывания — схематизированные изображения, составленные из знаков словаря языка данного уровня.

В первом слое расположены словари понятий и отношений — концептуально-визуальный базис языка [6]. Язык первого уровня  $vl^1$  использует эвристические правила PRU<sup>1</sup> для построения из терминальных множеств примитивов  $P^1$ , измерений  $D^1$  и отношений  $VR^1$  словаря примитивов  $p^{n1} \in P^{n1} \subseteq VN^1$ , измерений  $d^{n1} \in D^{n1} \subseteq VN^1$  и отношений  $vr^{n1} \in VR^{n1} \subseteq VN^1$ :

$$vl^1(P^1, D^1, VR^1, PRU^1) = \{p^{n1}\} \cup \{d^{n1}\} \cup \{vr^{n1}\}. \quad (1)$$

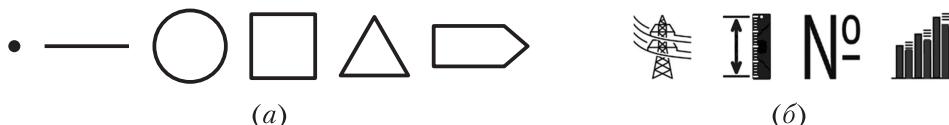
В языке второго уровня  $vl^2$  эвристики PRU<sup>2</sup> используются, чтобы сформировать образы ресурсов  $res^2 \in RES^2 \subseteq VN^2$ , отношений  $r^2 \in R^2 \subseteq VN^2$ , включая отношения-действия  $act^2 \in ACT^2 \subseteq R^2$ , и свойств  $pr^2 \in PR^2 \subseteq VN^2$  без учета их иерархичности с помощью отношений определения  $VR_1^{n1} \subseteq VR^{n1}$ :

$$vl^2(P^1, D^1, VR_1^{n1}, PRU^2) = RES^2 \cup PR^2 \cup R^2.$$

Данная работа посвящена визуальному описанию ресурсов, свойств и действий при управлении электросетями, и следующие уровни не рассматриваются.

Анализ работ по визуальному управлению, когнитивной графике, методам визуализации информации [7–11] позволил выделить основные фигуры, лежащие в основе визуального метаязыка (рис. 1, а), и набор пиктограмм [12] для конструирования высказываний о ресурсах, свойствах и действиях при управлении электросетевым хозяйством, примеры которых показаны на рис. 1, б.

Точка лежит в основе всех измерений, порождает в своем развитии линию, движение. Прямая линия — составляющая всех геометрических фигур. Круг —



**Рис. 1** Словарь базовых форм ФГИС визуального управления: (а) базовые фигуры визуального метаязыка; (б) примеры пиктограмм для конструирования высказываний о ресурсах, свойствах и действиях

универсальный символ, означающий целостность, непрерывность и первоначальное совершенство. Квадрат символизирует категорию вещи или ресурса [12], треугольник — категорию свойства, а стрелка — категорию действия. Этих форм в сочетании с плоскостью, цветом, текстурой, набором пиктограмм, представляющих визуальные «имена» концептов, а также синтаксическими правилами записи визуальных ролевых отношений VR [6] достаточно для визуального высказывания любой сложности.

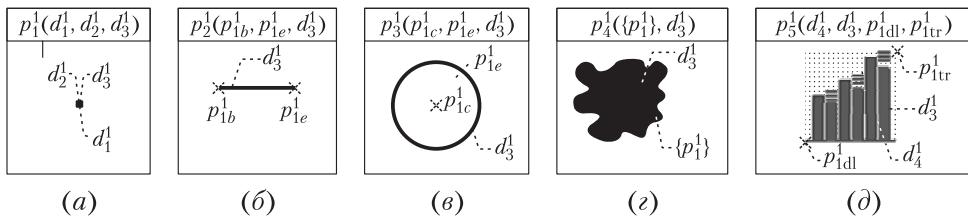
### 3 Уровень концептуально-визуального базиса метаязыка

На первом уровне  $vl^1$  (1) метаязыка с помощью эвристических правил PRU<sup>1</sup> из графических примитивов ядра строятся производные примитивы, измерения и отношения. Как видно из рис. 1, для представления основных элементов визуального метаязыка управления электросетевым хозяйством требуется ограниченный, сравнительно небольшой набор графических примитивов: отрезок прямой, окружность, пиктограмма и заливка (рис. 2), которые, в свою очередь, могут быть описаны множеством точек, составляющих эти примитивы. Отношение определения  $vr_1^1$  графически представим прямоугольником, разделенным на две части: в верхней указывается определяемый примитив, а в нижней — определение. Формально это отношение будем записывать знаком «==».

Под точкой будем понимать квадрат размером один пиксель с заданными, как в компьютерной графике, координатами на плоскости и цветом. Для изображений, нарисованных «от руки», следует перейти к нечетким точкам и методам нечеткой геометрии. Примитив «точка»  $p_1^1$  обладает визуальными измерениями: координаты на плоскости  $d_1^1 \in [0, d_{1\max}^1]$ ,  $d_2^1 \in [0, d_{2\max}^1]$  (рис. 3, a), где  $d_{1\max}^1$  и  $d_{2\max}^1$  — максимально допустимые значения координат, а цвет  $d_3^1 \in [0, 100]$  по шкале «Оттенки серого» (рис. 3, б) отображается по правилу:

$$p_1^1(d_1^1, d_2^1, d_3^1) = pru_1^1(d_1^1, d_2^1, d_3^1). \quad (2)$$

При описании графических примитивов в настоящей работе координаты  $d_1^1$  и  $d_2^1$  привязаны к локальной системе координат примитива. При построении



**Рис. 2** Графические примитивы языка первого уровня: (a) точка; (б) отрезок прямой; (в) окружность; (г) заливка; (д) пиктограмма

графических высказываний локальные координаты примитива пересчитываются в систему координат высказывания, при этом может выполняться их поворот и масштабирование. Ввиду отсутствия семантической нагрузки эти операции в настоящей работе не рассматриваются.

По правилу (2) порождения визуального примитива «точка»  $p_1^1$  можно определить примитив «отрезок прямой»:

$$\begin{aligned} p_2^1(p_{1b}^1, p_{1e}^1, d_3^1) = \left\{ p_1^1(d_1^1, d_2^1, d_3^1) | d_2^1 = \left\lfloor \frac{(d_1^1 - d_{1b}^1)(d_{2e}^1 - d_{2b}^1)}{d_{1e}^1 - d_{1b}^1} + d_{2b}^1 \right\rfloor, \right. \\ d_{1b}^1 = d_1^1(p_{1b}^1), d_{2b}^1 = d_2^1(p_{1b}^1), d_{1e}^1 = d_1^1(p_{1e}^1), d_{2e}^1 = d_2^1(p_{1e}^1), \\ d_1^1 \in [d_{1b}^1, d_{1e}^1], d_2^1 \in [d_{2b}^1, d_{2e}^1], d_2^1 \in \mathbb{Z} \left. \right\}, \end{aligned}$$

где  $\lfloor x \rfloor$  — операция округления числа  $x$  до ближайшего целого.

Примитив «окружность» определяется выражением:

$$\begin{aligned} p_3^1(p_{1c}^1, p_{1e}^1, d_3^1) = \left\{ p_1^1(\lfloor d_1^1 \rfloor, \lfloor d_2^1 \rfloor, d_3^1) | (d_1^1 - d_{1c}^1)^2 + (d_2^1 - d_{2c}^1)^2 = \right. \\ = (d_{1e}^1 - d_{1c}^1)^2 + (d_{2e}^1 - d_{2c}^1)^2, \\ \left. d_{1c}^1 = d_1^1(p_{1c}^1), d_{2c}^1 = d_2^1(p_{1c}^1), d_{1e}^1 = d_1^1(p_{1e}^1), d_{2e}^1 = d_2^1(p_{1e}^1) \right\}. \end{aligned}$$

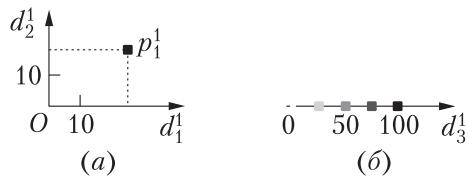
Примитив «заливка» описывается выражением:

$$\begin{aligned} p_4^1(\{p_1^1\}, d_3^1) = \\ = \{p_1^1(d_1^1, d_2^1, d_3^1) | \exists p_{1h}^1 \exists p_{1l}^1 (d_{1l}^1 \leq d_1^1 \leq d_{1h}^1) \wedge \exists p_{1h}^1 \exists p_{1l}^1 (d_{2l}^1 \leq d_2^1 \leq d_{2h}^1) \\ p_{1h}^1, p_{1l}^1 \in \{p_1^1\}, d_{1h}^1 = d_1^1(p_{1h}^1), d_{2h}^1 = d_2^1(p_{1h}^1), \\ d_{1l}^1 = d_1^1(p_{1l}^1), d_{2l}^1 = d_2^1(p_{1l}^1), d_1^1, d_2^1 \in \mathbb{Z} \}. \end{aligned}$$

Графическое представление пиктограммы — множество точек, соответствующее ее растровому изображению, которое генерируется правилом  $\text{pru}_2$ :

$$p_5^1(d_4^1, d_3^1, p_{1dl}^1, p_{1tr}^1) = \{p_1^1(d_1^1, d_2^1, d_3^1) | p_1^1(d_1^1, d_2^1, d_3^1) \in \text{pru}_2^1(d_4^1, d_3^1, p_{1dl}^1, p_{1tr}^1)\},$$

где  $d_4^1$  — растровое изображение пиктограммы;  $d_3^1$  — ее цвет;  $p_{1dl}^1$  и  $p_{1tr}^1$  — нижняя левая и верхняя правая точки.



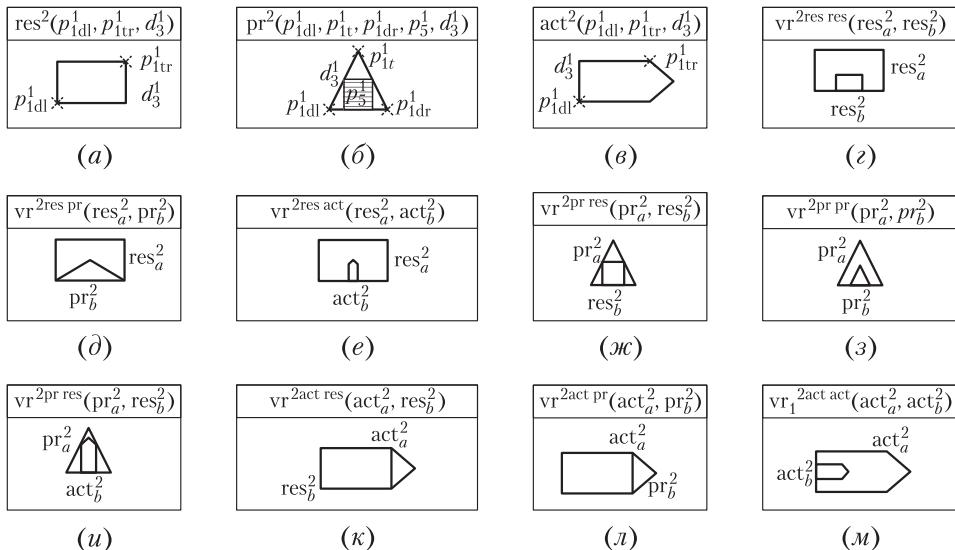
**Рис. 3** Визуальные измерения графического примитива «точка»: (а) координаты точки на плоскости; (б) цвет точки

## 4 Уровень ресурсов, действий и свойств

На втором уровне метаязыка из визуальных примитивов первого уровня формируются образы ресурсов, действий, свойств и отношений (рис. 4). Графическое представление понятия «ресурс»  $\text{res}^2 \in \text{RES}^2$  (рис. 4, a) может быть формально представлено выражениями:

$$\begin{aligned} \text{res}^2(p_{1\text{dl}}^1, p_{1\text{tr}}^1, d_3^1) &= \\ &= r_1^{2\text{res pr}}(\text{res}^2, p_{1\text{dl}}^1) \circ r_1^{2\text{res pr}}(\text{res}^2, p_{1\text{tr}}^1) \circ r_1^{2\text{res pr}}(\text{res}^2, d_3^1) = \\ &= p_2^1(p_{1\text{dl}}^1, p_{1\text{dr}}^1, d_3^1) \cup p_2^1(p_{1\text{dr}}^1, p_{1\text{tr}}^1, d_3^1) \cup p_2^1(p_{1\text{tr}}^1, p_{1\text{tl}}^1, d_3^1) \cup p_2^1(p_{1\text{tl}}^1, p_{1\text{dl}}^1, d_3^1); \\ p_{1\text{dr}}^1 &= p_1^1(d_1^1(p_{1\text{tr}}^1), d_2^1(p_{1\text{dl}}^1), d_3^1); \quad p_{1\text{tl}}^1 = p_1^1(d_1^1(p_{1\text{dl}}^1), d_2^1(p_{1\text{tr}}^1), d_3^1); \\ d_{1\text{dl}}^1 &= d_1^1(p_{1\text{dl}}^1); \quad d_{2\text{dl}}^1 = d_2^1(p_{1\text{dl}}^1); \quad d_{1\text{tr}}^1 = d_1^1(p_{1\text{tr}}^1); \quad d_{2\text{tr}}^1 = d_2^1(p_{1\text{tr}}^1), \end{aligned}$$

где  $\circ$  — операция склеивания понятий [2];  $p_{1\text{dl}}^1$  и  $p_{1\text{tr}}^1$  — координаты вершин элемента (см. рис. 4, a);  $r_1^{2\text{res pr}}$  — отношение «иметь свойство» второго уровня языка класса «ресурс–свойство» [1, 2].



**Рис. 4** Основные графические элементы второго уровня визуального метаязыка: (a) ресурс; (б) свойство; (в) действие; (г) ролевое отношение «ресурс–ресурс»; (д) ролевое отношение «ресурс–свойство»; (е) ролевое отношение «ресурс–действие»; (ж) ролевое отношение «свойство–ресурс»; (з) ролевое отношение «свойство–свойство»; (и) ролевое отношение «свойство–действие»; (к) ролевое отношение «действие–ресурс»; (л) ролевое отношение «действие–свойство»; (м) ролевое отношение «действие–действие»

Понятие «свойство»  $\text{pr}^2 \in \text{PR}^2$  (см. рис. 4, б) представляется выражениями:

$$\begin{aligned} \text{pr}^2(p_{1\text{dl}}^1, p_{1t}^1, p_{1\text{dr}}^1, p_5^1, d_3^1) = \\ = r_1^{2\text{pr pr}}(\text{pr}^2, p_{1\text{dl}}^1) \circ r_1^{2\text{pr pr}}(\text{pr}^2, p_{1t}^1) \circ r_1^{2\text{pr pr}}(\text{pr}^2, p_5^1) \circ r_1^{2\text{pr pr}}(\text{pr}^2, d_3^1) = \\ = p_2^1(p_{1\text{dl}}^1, p_{1t}^1, d_3^1) \cup p_2^1(p_{1t}^1, p_{1\text{dr}}^1, d_3^1) \cup p_2^1(p_{1\text{dr}}^1, p_{1\text{dl}}^1, d_3^1) \cup p_5^1; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} |p_2^1(p_{1\text{dl}}^1, p_{1t}^1, d_3^1) \cap p_5^1| = 1; \quad |p_2^1(p_{1t}^1, p_{1\text{dr}}^1, d_3^1) \cap p_5^1| = 1; \\ |p_2^1(p_{1\text{dr}}^1, p_{1\text{dl}}^1, d_3^1) \cap p_5^1| \geq 1, \end{aligned}$$

где  $p_{1\text{dl}}^1, p_{1t}^1$  и  $p_{1\text{dr}}^1$  — координаты вершин элемента;  $p_5^1$  — вписанная пиктограмма;  $r_1^{2\text{pr pr}}$  — отношение «иметь свойство» второго уровня языка класса «свойство—свойство».

Понятие «действие»  $\text{act}^2 \in \text{ACT}^2$  (см. рис. 4, в) представляется выражениями:

$$\begin{aligned} \text{act}^2(p_{1\text{dl}}^1, p_{1\text{tr}}^1, d_3^1) = \\ = r_1^{2\text{act pr}}(\text{act}^2, p_{1\text{dl}}^1) \circ r_1^{2\text{act pr}}(\text{act}^2, p_{1\text{tr}}^1) \circ r_1^{2\text{act pr}}(\text{act}^2, d_3^1) = p_2^1(p_{1\text{dl}}^1, p_{1\text{dr}}^1, d_3^1) \cup \\ \cup p_2^1(p_{1\text{dr}}^1, p_{1\text{cr}}^1, d_3^1) \cup p_2^1(p_{1\text{cr}}^1, p_{1\text{tr}}^1, d_3^1) \cup p_2^1(p_{1\text{tr}}^1, p_{1\text{tl}}^1, d_3^1) \cup p_2^1(p_{1\text{tl}}^1, p_{1\text{dl}}^1, d_3^1), \\ p_{1\text{dr}}^1 = p_1^1(d_1^1(p_{1\text{tr}}^1), d_2^1(p_{1\text{dl}}^1), d_3^1), \quad p_{1\text{tl}}^1 = p_1^1(d_1^1(p_{1\text{dl}}^1), d_2^1(p_{1\text{tr}}^1), d_3^1), \\ p_{1\text{cr}}^1 = p_1^1(d_1^1(p_{1\text{dr}}^1) + 0,5(d_2^1(p_{1\text{tr}}^1) - d_2^1(p_{1\text{dl}}^1))), \\ d_2^1(p_{1\text{dr}}^1) + 0,5(d_2^1(p_{1\text{tr}}^1) - d_2^1(p_{1\text{dl}}^1)), d_3^1, \end{aligned}$$

где  $p_{1\text{dl}}^1$  и  $p_{1\text{tr}}^1$  — координаты вершин элемента (см. рис. 4, в);  $r_1^{2\text{act pr}}$  — отношение «иметь свойство» второго уровня языка класса «действие—свойство».

Визуальное отношение «ресурс–ресурс»  $\text{vr}^{2\text{res res}}(\text{res}_a^2, \text{res}_b^2)$  (см. рис. 4, г) формализованно представляется выражением:

$$\begin{aligned} \text{vr}^{2\text{res res}}(\text{res}_a^2, \text{res}_b^2) = \{ (\text{res}_a^2, \text{res}_b^2) | \forall p_{1b}^1 \exists p_{1ah}^1 \exists p_{1al}^1 (d_{1al}^1 \leq d_{1b}^1 \leq d_{1ah}^1) \wedge \\ \wedge \forall p_{1b}^1 \exists p_{1ah}^1 \exists p_{1al}^1 (d_{2al}^1 \leq d_{2b}^1 \leq d_{2ah}^1), p_{1ah}^1, p_{1al}^1 \in \text{res}_a^1, d_{1ah}^1 = d_1^1(p_{1ah}^1), \\ d_{2ah}^1 = d_2^1(p_{1ah}^1), d_{1al}^1 = d_1^1(p_{1al}^1), d_{2al}^1 = d_2^1(p_{1al}^1), p_{1b}^1 \in \text{res}_b^2, d_{1b}^1 = d_1^1(p_{1b}^1), \\ d_{2b}^1 = d_2^1(p_{1b}^1), d_1^1, d_2^1 \in \mathbb{Z} \}. \quad (3) \end{aligned}$$

Формализованные описания визуальных отношений «ресурс–свойство», «ресурс–действие», «свойство–ресурс», «свойство–свойство», «свойство–действие» и «действие–действие» (см. рис. 4, д–4, и и 4, м) аналогичны выражению (3) для визуального отношения «ресурс–ресурс», поэтому здесь не приводятся. Визуальное отношение «действие–ресурс» (см. рис. 4, к) представляется выражением:

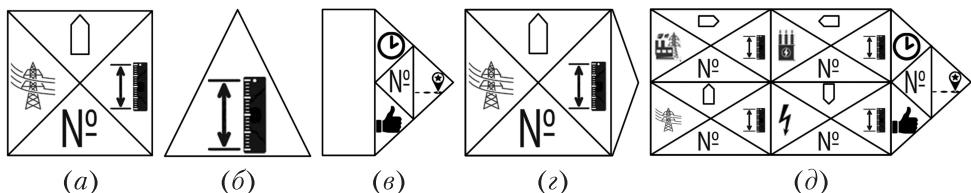
$$\begin{aligned} \text{vr}^{2\text{act res}}(\text{act}_a^2, \text{res}_b^2) &= \{ (\text{act}_a^2, \text{res}_b^2) \mid p_{1\text{adl}}^1 = p_{1\text{bdl}}^1 \wedge p_{1\text{atr}}^1 = p_{1\text{btr}}^1, \\ p_{1\text{adl}}^1 &= p_{1\text{dl}}^1(\text{act}_a^2), p_{1\text{atr}}^1 = p_{1\text{tr}}^1(\text{act}_a^2), p_{1\text{bdl}}^1 = p_{1\text{dl}}^1(\text{res}_b^2), \\ p_{1\text{btr}}^1 &= p_{1\text{tr}}^1(\text{res}_b^2) \}, \end{aligned}$$

а визуальное отношение «действие–свойство» (см. рис. 4, л) — выражением:

$$\begin{aligned} \text{vr}^{2\text{act pr}}(\text{act}_a^2, \text{pr}_b^2) &= \\ &= \{ (\text{act}_a^2, \text{pr}_b^2) \mid (p_{1\text{acr}}^1 = p_{1\text{bt}}^1) \wedge (p_{1\text{atr}}^1 = p_{1\text{bdl}}^1) \wedge (p_{1\text{adr}}^1 = p_{1\text{bdr}}^1), \\ p_{1\text{acr}}^1 &= p_1^1(d_1^1(p_{1\text{adr}}^1) + 0,5(d_2^1(p_{1\text{atr}}^1) - d_2^1(p_{1\text{adl}}^1))), \\ d_2^1(p_{1\text{adr}}^1) &+ 0,5(d_2^1(p_{1\text{atr}}^1) - d_2^1(p_{1\text{adl}}^1)), d_3^1), \\ p_{1\text{atr}}^1 &= p_{1\text{tr}}^1(\text{act}_a^2), p_{1\text{adr}}^1 = p_1^1(d_1^1(p_{1\text{atr}}^1), d_2^1(p_{1\text{adl}}^1), d_3^1), \\ p_{1\text{adl}}^1 &= p_{1\text{dl}}^1(\text{act}_a^2), p_{1\text{bdl}}^1 = p_{1\text{dl}}^1(\text{pr}_b^2), p_{1\text{bt}}^1 = p_{1t}^1(\text{pr}_b^2), p_{1\text{bdr}}^1 = p_{1\text{dr}}^1(\text{pr}_b^2) \}. \end{aligned}$$

Таким образом, формально определены визуальные примитивы (см. рис. 4), составляющие алфавит (ядро) VT<sup>2</sup> языка второго уровня метаязыка для гибридных интеллектуальных систем управления электросетями. На их основе определяется множество визуальных примитивов, примеры которых представлены на рис. 5, а–5, г, составляющее словарь VN<sup>2</sup> второго уровня языка. Из примитивов на рис. 5, а–5, г, в свою очередь, составляются графические высказывания о ресурсах, свойствах и действиях, пример которых представлен на рис. 5, д.

Данные примитивы и высказывания могут использоваться в качестве алфавита в языках более высокого уровня для организации визуальных рассуждений об иерархиях ресурсов, действий, свойств, состояниях, ситуациях и т. д.



**Рис. 5** Примеры визуальных примитивов языка второго уровня и визуального высказывания: (а) графическое высказывание, символизирующее ресурс «воздушная ЛЭП» как четырехролевое визуальное отношение; (б) свойство «мера»; (в) действие «перемещение» («передача»); (г) «средство» выполнения действия; (д) графическое высказывание, символизирующее действие «передача объекта – электроэнергии, посредством воздушной ЛЭП, с ТЭЦ, на трансформаторную подстанцию, время начала и время окончания, наименование, характеристики, оценки»

Наличие взаимосвязанных формальных и визуальных описаний одних и тех же сущностей позволяет ФГИС в зависимости от степени неопределенности ситуации принятия решений предоставлять возможность эксперту участвовать в решении проблемы, визуализируя текущую ситуацию принятия решения, и таким образом переключаться между символыми и визуальными механизмами рассуждений.

## 5 Заключение

Рассмотрены основные элементы модели визуального метаязыка, представляющего собой семейство из 8 уровней визуальных языков для автоматизированных рассуждений в интеллектуальных системах на символных и визуальных языках. Предложены визуальное и формализованное описания множества основных символов и синтаксических правил базовых уровней метаязыка: (1) концептуального и визуального базиса; (2) ресурсов, действий и свойств.

Реализация предложенных моделей в ФГИС позволит синтезировать решения проблем над гетерогенным визуальным полем, устанавливающим взаимосвязь символьных и визуальных знаков (символьных и визуальных высказываний). Таким образом, процесс решения проблем в ФГИС приобретает гетерогенный характер: когда область явлений формализована, для поиска решений применяются символные модели знаний из гетерогенного модельного поля, а когда есть существенная неопределенность, не снимаемая точным анализом и логико-математическим рассуждениями, включаются в действие механизмы визуально-пространственного, образного мышления экспертов.

## Литература

1. Колесников А. В. Гибридные интеллектуальные системы. Теория и технология разработки. — СПб.: СПбГТУ, 2001. 711 с.
2. Колесников А. В., Кириков И. А., Листопад С. В. Гибридные интеллектуальные системы с самоорганизацией: координация, согласованность, спор. — М.: ИПИ РАН, 2014. 189 с.
3. Кириков И. А., Колесников А. В., Румовская С. Б. Исследование лабораторного прототипа искусственной гетерогенной системы для диагностики артериальной гипертензии // Системы и средства информатики, 2014. Т. 24. № 3. С. 121–143.
4. Ошанин Д. А. Предметное действие и оперативный образ: выбранные психологические труды. — М., Воронеж: МПСИ, МодЭК, 1999. 508 с.
5. Штейнбок Л. С. Ситуационная технология отображения информации. — М.: Научные технологии, 2017. 250 с.
6. Колесников А. В., Листопад С. В., Румовская С. Б., Данишевский В. И. Неформальная аксиоматическая теория ролевых визуальных моделей // Информатика и её применения, 2016. Т. 10. Вып. 4. С. 114–120.
7. Колесников А. В., Листопад С. В. Концептуально-визуальные основы виртуальных гетерогенных коллективов, поддерживающих принятие решений // Гибридные

- и синергетические интеллектуальные системы: Мат-лы III Всеросс. Поспеловской конф. с международным участием. — Калининград: БФУ им. И. Канта, 2016. С. 8–56.
8. *Bowman W.J.* Graphic communication. — New York, NY, USA: John Wiley, 1968. 210 p.
  9. *Sibbet D.* Visual leaders: New tools for visioning, management, and organization change. — Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2013. 229 p.
  10. *Fitrianie S., Rothkrantz L. J. M.* Two-dimensional visual language grammar. <http://mmi.tudelft.nl/pub/siska/TSD%202DVisLangGrammar.pdf>.
  11. *Kremer R.* Visual languages for knowledge representation // 11th Workshop on Knowledge Acquisition, Modeling and Management. — Bauff, Alberta, Canada, 1998. <http://ksi.cpsc.ucalgary.ca/KAW/KAW98/kremer>.
  12. Колесников А. В. Функциональные гибридные интеллектуальные системы визуального управления // Гибридные и синергетические интеллектуальные системы: Мат-лы IV Всеросс. Поспеловской конф. с международным участием. — Калининград: БФУ им. И. Канта, 2018. С. 18–81.

Поступила в редакцию 01.08.18

---

## METALANGUAGE FOR HYBRID INTELLIGENT SYSTEMS FOR VISUAL CONTROL OF ELECTRICAL NETWORKS: RESOURCES, PROPERTIES, AND ACTIONS

*A. Kolesnikov<sup>1,2</sup>, S. Listopad<sup>2</sup>, and F. Maitakov<sup>1</sup>*

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

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

**Abstract:** Traditionally, the modeling of intelligent reasoning in hybrid intelligent systems is based on symbolic-logical models of knowledge. At the same time, experts, solving practical problems, operate mainly with visual knowledge. Visualization qualitatively changes the work of the subject of management, allowing one to recognize the problem situation at a glance and “see its solution” without logical inferences. The complexity of modeling visual reasoning in hybrid intelligent systems is due to the lack of formalized models of visual languages and high science-intensiveness of development of special environments for manipulating and processing visual models. The paper presents a formalized description of two basic levels of metalanguage for hybrid intelligent systems for managing electrical networks: (*i*) a conceptual and visual basis; and (*ii*) resources, actions, and properties.

**Keywords:** decision support; visual language; visual reasoning

**DOI:** 10.14357/08696527180312

## Acknowledgments

The research was supported by the Russian Foundation for Basic Research (project No. 16-07-00271a).

## References

1. Kolesnikov, A. V. 2001. *Gibridnye intellektual'nye sistemy. Teoriya i tekhnologiya razrabotki* [Hybrid intelligent systems: Theory and technology of development]. St. Petersburg: SPbGTU Publs. 711 p.
2. Kolesnikov, A. V., I. A. Kirikov, and S. V. Listopad. 2014. *Gibridnye intellektual'nye sistemy s samoorganizatsiey: koordinatsiya, soglasovannost', spor* [Hybrid intelligent systems with self-organization: Coordination, consistency, dispute]. Moscow: IPI RAN. 189 p.
3. Kirikov, I. A., A. V. Kolesnikov, and S. B. Rumovskaya. 2014. Issledovaniye laboratornogo prototipa iskusstvennoy heterogennoy sistemy dlya diagnostiki arterial'noy gipertenzii [Investigation of the laboratory prototype of an artificial heterogeneous system for the diagnosis of hypertension]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 24(3):121–143.
4. Oshanin, D. A. 1999. *Predmetnoe deystvie i operativnyy obraz: izbrannye psichologicheskie trudy* [Subject action and operational image: Selected psychological works]. Moscow, Voronezh: MPSI Publs., Modek. 508 p.
5. Shteynbok, L. S. 2017. *Situatsionnaya tekhnologiya otobrazheniya informatsii* [Situational technology of information display]. Moscow: Nauchnye tekhnologii. 250 p.
6. Kolesnikov, A. V., S. V. Listopad, S. B. Rumovskaya, and V. I. Danishevskiy. 2016. Neformal'naya aksiomaticeskaya teoriya rolevykh vizual'nykh modeley [Informal axiomatic theory of the role visual models]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 10(4):114–120.
7. Kolesnikov, A. V., and S. V. Listopad. 2016. Kontseptual'no-vizual'nye osnovy virtual'nykh heterogennykh kollektivov, podderzhivayushchikh prinyatiye resheniy [Conceptual and visual basics of virtual heterogeneous teams supporting decision-making]. “*Gibridnye i sinergeticheskie intellektual'nye sistemy:*” mat-ly III Vseross. Pospelovskoy konf. s mezdunarodnym uchastiem [3rd All-Russia Pospelov Conference with International Participation “Hybrid and Synergistic Intelligent Systems” Proceedings]. Kaliningrad: IKBFU Publ. 8–56.
8. Bowman, W. J. 1968. *Graphic communication*. New York, NY: John Wiley. 210 p.
9. Sibbet, D. 2013. *Visual leaders: New tools for visioning, management, and organization change*. Hoboken, NJ: Wiley. 229 p.
10. Fitrianie, S., and L. J. M. Rothkrantz. Two-dimensional visual language grammar. Available at: <http://mmi.tudelft.nl/pub/siska/TSD%202DVisLangGrammar.pdf> (accessed July 15, 2018).
11. Kremer, R. 1998. Visual languages for knowledge representation. *11th Workshop on Knowledge Acquisition, Modeling and Management*. Bauff, Alberta, Canada. Available at: <http://ksi.cpsc.ucalgary.ca/KAW/KAW98/kremer/> (accessed July 15, 2018).

12. Kolesnikov, A. V. 2018. Funktsional'nye gibrnidnye intellektual'nye sistemy vizual'nogo upravleniya [Functional hybrid intelligent visual control systems]. “*Gibrnidnye i sinergeticheskie intellektual'nye sistemy:*” mat-ly IV Vseross. Pospelovskoy konf. s mezhdunarodnym uchastiem [4th All-Russia Pospelov Conference with International Participation “Hybrid and Synergistic Intelligent Systems” Proceedings]. Kaliningrad: IKBFU Publ. 18–81.

*Received August 1, 2018*

## Contributors

**Kolesnikov Alexander V.** (b. 1948) — Doctor of Science in technology; professor, Institute of Physical and Mathematical Sciences and Information Technology, Immanuel Kant Baltic Federal University, 14 A. Nevskogo Str., Kaliningrad 236041, Russian Federation; senior scientist, Kaliningrad Branch of the Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 5 Gostinaya Str., Kaliningrad 236000, Russian Federation, avkolesnikov@yandex.ru

**Listopad Sergey V.** (b. 1984) — Candidate of Science (PhD) in technology; senior scientist, Kaliningrad Branch of the Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 5 Gostinaya Str., Kaliningrad 236000, Russian Federation, ser-list-post@yandex.ru

**Maitakov Fedor G.** (b. 1973) — PhD student, Institute of Physical and Mathematical Sciences and Information Technology, Immanuel Kant Baltic Federal University, 14 A. Nevskogo Str., Kaliningrad 236041, Russian Federation, maitakov@mail.ru

## ВИЗУАЛЬНО-ОБРАЗНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭФФЕКТА СИНЕРГИИ В ГИБРИДНЫХ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ МНОГОАГЕНТНЫХ СИСТЕМАХ

*И. А. Кириков<sup>1</sup>, А. В. Колесников<sup>2</sup>, С. В. Листопад<sup>3</sup>*

**Аннотация:** Традиционно для решения проблем в социально-технических системах применяют методы коллективного интеллекта, что позволяет справиться с разнородностью информации и динамичностью ситуаций. Принятие решений коллективом экспертов за круглым столом, гибридной интеллектуальной многоагентной системой (ГиИМАС) или виртуальным гетерогенным коллективом (ВГК) — сложный многоэтапный процесс переговоров и обмена мнениями, для эффективной организации которого необходим релевантный инструментарий. Предлагается метод визуально-образного моделирования эффекта синергии для наглядной оценки эффективности работы коллектива экспертов и/или агентов и принятия управляющих воздействий для ее повышения.

**Ключевые слова:** малый коллектив экспертов; синергия; гибридная интеллектуальная многоагентная система

**DOI:** 10.14357/08696527180313

### 1 Введение

Особенности проблем, возникающих при управлении социально-техническими системами в промышленности, логистике, медицине и других сферах экономики, во многом предопределяют использование коллективных рассуждений для их решения. Традиционно такие проблемы решаются в малых коллективах экспертов под руководством лица, принимающего решения (ЛПР): совещания, планерки, консилиумы. Кроме того, разработаны модели коллективных рассуждений экспертов: ГиИМАС [1] и ВГК [2]. Эффективность работы коллектива или моделирующей его автоматизированной системы зависит как от их состава, так и от организации взаимодействия экспертов или элементов системы.

Опытные ЛПР оценивают сложившуюся в коллективе ситуацию принятия решения, перестраивают состав и структуру системы управления, адаптируясь

<sup>1</sup> Калининградский филиал Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук, baltbipiran@mail.ru

<sup>2</sup> Балтийский федеральный университет им. И. Канта; Калининградский филиал Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук, avkolesnikov@yandex.ru

<sup>3</sup> Калининградский филиал Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук, ser-list-post@yandex.ru

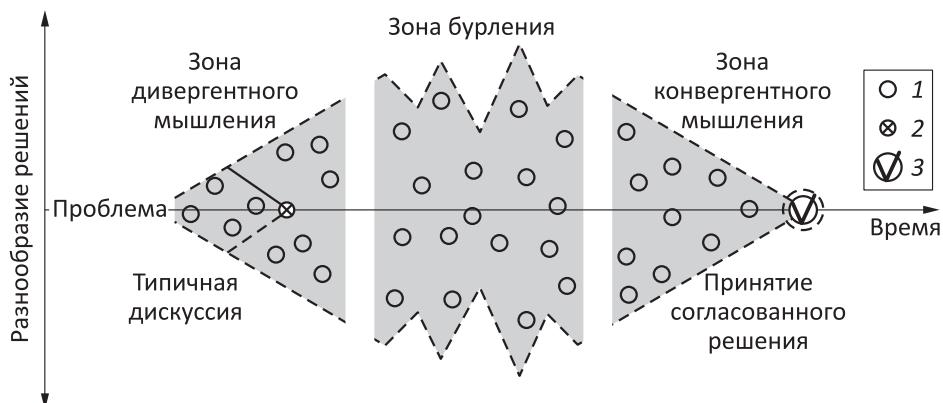
к изменениям во внешней среде, обеспечивая условия возникновения положительных групповых эффектов, сокращая отрицательные. В случае же менее опытных ЛПР или пользователей ГиИМАС и ВГК существенную помочь в организации коллективной работы экспертов или агентов обеспечивают методы визуализации коллективных процессов и рекомендации по их изменению. В работе рассматривается визуально-образное моделирование эффекта синергии в ГиИМАС как показателя успешности сложившихся взаимодействий.

## 2 Принятие коллективных решений

Согласно анализу В. Ф. Спиридонова, решение задач и проблем протекает в форме процесса в реальном времени, которым трудно управлять, а гарантировать успешную работу в ранее не встречавшей проблемной ситуации — утопия [3]. Характер этой работы — многоэтапный и включает постановку, формулирование и анализ задачи, сбор и интерпретацию данных, поиск решений, анализ эффективности решений и окончательный выбор, представление результатов, реализацию решения, мониторинг и оценку результатов [4].

Процессы разрешения проблемных ситуаций идут одновременно с формированием и развитием опыта и знаний коллектива экспертов как единой сущности, предполагающих стадии: формирования, бурления, становления норм, выполнения, принятия решений и расформирования [5, 6]. Эти стадии согласуются с моделью «ромба группового принятия решений» (рис. 1) С. Кейнера и др. [7].

На первой стадии формирования члены коллектива знакомятся, обмениваются официальной информацией друг о друге, вносят предложения о работе



**Рис. 1** Графическое представление модели ромба группового принятия решений С. Кейнера и др.: 1 — альтернатива; 2 — досрочное несогласованное решение; 3 — согласованное решение

коллектива, придерживаются общепринятых точек зрения, высказывают предложения, ведущие к очевидным решениям [6]. Если задача имеет очевидное решение, то дискуссия завершается уже на этом этапе. Однако даже в сложных проблемных ситуациях дискуссия может окончиться еще на стадии формирования без выработки удовлетворительного решения из-за неспособности членов коллектива работать совместно, конфликты-барьеры как негатив не исследуются, а перспективные нестандартные возможности отбрасываются [7].

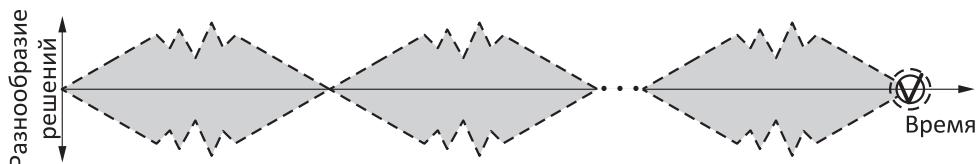
Если экспертам удалось выйти за границы устоявшихся мнений, обсуждение переходит в стадию бурления, когда участники высказывают нестандартные, часто противоречивые мнения. Здесь и возникают конфликты и конфронтации. При серьезных различиях члены покидают коллектив, в противном случае они приспосабливаются и учатся открыто обсуждать противоречия. Важную роль в разрешении конфликтов играет фасилитатор либо формальный лидер.

Стадия «бурления» приводит коллектив в состояние, когда его члены должны приложить усилия, чтобы совместить разнообразие идей со своими собственными убеждениями и ценностями. В этой зоне эксперты приспосабливаются к различиям во взглядах и сотрудничают друг с другом, разрабатывают групповые нормы поведения, что способствует возникновению чувства сплоченности.

Доработка предложений и подготовка альтернатив предполагает, что члены коллектива переформулируют ценные мысли в конкретные предложения и «шлифуют» их пока все участники дискуссии не придут к конечному решению, воплощающему разнообразие точек зрения. Эта стадия характеризуется сходящимся, конвергентным мышлением: классификацией идей, их обобщением, вынесением оценок — в противовес расходящемуся,циальному первым стадиям, в рамках которых поощряется открытая безоценочная дискуссия и генерация большого числа решений [7].

На стадии принятия решения и расформирования оно уже интегрирует мнения всех экспертов, принявших участие в обсуждении. Если коллектив собирался ради единственной задачи, он расформировывается. В случае если коллективу не удалось достичь решения в критериальных рамках останова, многостадийный процесс повторяется. Модель такого процесса может быть представлена последовательностью ромбов группового принятия решений (рис. 2).

Если за критерий останова принята оценка качества решения, то итераций может потребоваться бесконечно много, что свидетельствует об утопичности из-



**Рис. 2** Модель итерационного процесса коллективного решения проблем

бранного оценочного значения. В этом случае важно иметь дополнительный критерий гарантированного завершения процесса работы над проблемной ситуацией. Часто в качестве такого критерия используется степень согласованности мнений экспертов.

Предлагается за критерий принять уровень синергии, поскольку он позволяет ЛПР или фасilitатору — организатору коммуникационного взаимодействия экспертов в коллективе — идентифицировать сложившуюся ситуацию процесса принятия решений и направить дискуссию в требуемое русло.

Для оценки эффекта синергии в малом коллективе экспертов, решающем сложные задачи, а также в ГиИМАС, моделирующей функционирование такого коллектива, предложена адаптация доходного метода оценки синергии в результате слияния организаций [8]. По аналогии с организациями, выбирающими и реализующими альтернативные инвестиционные проекты с определенным доходом, ГиИМАС находит и рекомендует альтернативные решения проблемы. Качество результата может оцениваться по одному или нескольким параметрам. В последнем случае, чтобы упорядочить решения, требуется перейти к однокритериальной оценке решений сверткой критерии.

В итоге эффект синергии в ГиИМАС можно определить, адаптировав доходный метод измерения эффекта синергии от объединения организаций [8]:

$$C_{\text{ГиИМАС}} = \text{KKP}_2 - \text{KKP}_1, \quad (1)$$

где  $C_{\text{ГиИМАС}}$  — количественная оценка синергетического эффекта в ГиИМАС;  $\text{KKP}_1$  — критерий качества лучшего решения проблемы из найденных агентами без взаимодействия, индивидуально;  $\text{KKP}_2$  — критерий качества лучшего коллективного решения.

Если коллективное решение сложной задачи в ГиИМАС — итерационный процесс (см. рис. 2), необходимо также определять  $C_{\text{ГиИМАС}}^i$  по формуле (1) на каждой  $i$ -й итерации для идентификации ситуации принятия решений и вычисления критерия останова, а  $\text{KKP}_1^i = \text{KKP}_2^{i-1}$  при  $i > 1$ ,  $\text{KKP}_2^i$  — критерий качества лучшего решения задачи на  $i$ -й итерации.

Оценка эффекта синергии может применяться в качестве критерия останова процесса решения проблемы ГиИМАС, например при отрицательной синергии (дисергии) в течение нескольких итераций, но для пользователей и разработчиков символичное представление этой оценки ненаглядно и малоинформативно, что затрудняет отладку и настройку системы.

Эти недостатки символичного представления актуальны в качестве оценки синергии для характеристики эффективности работы коллектива экспертов или ВГК. Они не позволяют ЛПР или фасilitатору в реальном времени корректировать взаимодействия между экспертами. Для устранения указанных недостатков сконструировано визуальное высказывание об эффекте синергии.

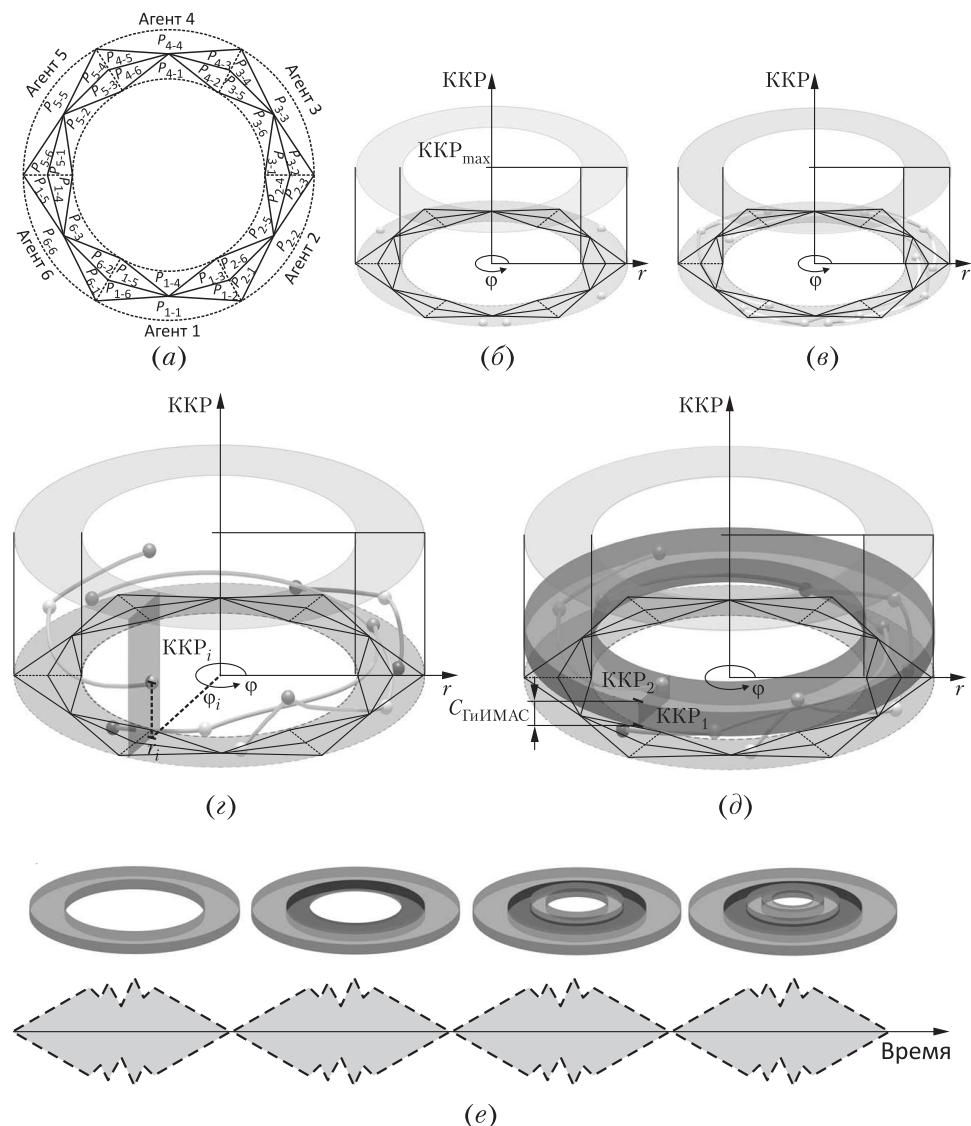
### 3 Визуальное моделирование синергии

С учетом анализа [9] визуального представления групповых процессов в коллективе экспертов, решающих проблемы, можно сформировать требования к визуализации синергии: наглядность проявления синергии в ГиИМАС; возможность визуализации итерационного процесса решения проблем (см. рис. 2); релевантность имитационных процессов в ГиИМАС метафоре процессов коллективной работы над проблемной ситуацией за круглым столом; отображение динамики компьютерной симуляции решения проблемы ГиИМАС, наглядно-обратного отображения взаимосвязей предложенных экспертами решений и вклада агентов в итоговое коллективное решение.

В соответствии с этими требованиями разработан метод визуализации эффекта синергии в ГиИМАС (рис. 3) построением и трансформацией образа геометрической фигуры «полый цилиндр», семантически аналогичного конструкции офисного круглого стола. Основание фигуры — кольцо, в плоскости которого схематизированы решения агентов. Каждому агенту на кольце отведен свой сегмент (на рис. 3, *a* таких сегментов шесть). Сегменты разделены треугольными стреловидными формами на подсегменты, визуально (по направлению стрелки) классифицирующие решение агента в зависимости от того, мнения каких агентов использованы для его нахождения. Например, если Агент 1 нашел решение с использованием решения, предложенного Агентом 3, оно попадет (по направлению стрелки-треугольника) в подсегмент  $P_{1-3}$ . Если для получения решения агент использовал несколько решений различных агентов, оно расположится на границе соответствующих подсегментов. При большом числе решений, сгенерированных агентами, на соответствующих подсегментах будут выделяться кластеры по степени и эффективности взаимодействия различных агентов.

Первоначально агенты, пытаясь решать проблему индивидуально, без взаимодействия, вырабатывают первичные решения, что соответствует ситуации, когда эксперты приступают к работе в коллективе со своим видением ее решения. Первичные решения в образе белых шаров (рис. 3, *b*) не оцениваются и располагаются на нулевой высоте ( $\text{KKP}_i = 0$ ) по оси ККР, а координаты  $\varphi_i$  и  $r_i$  центра сферы определяются на основе диаграммы распределения решений. На рис. 3, *b* полупрозрачным серым кольцом показано максимально возможное значение  $\text{KKR}_{\max}$ , определяемое ЛПР, по достижении которого продолжать решение проблемы не имеет смысла.

На стадиях дивергентного мышления и бурления агенты совместно находят альтернативные решения проблемы, которые располагаются в соответствующих секторах диаграммы (рис. 3, *c*). Качество этих решений также не оценивается, и они располагаются на нулевой высоте. Между образами-решениями изображены отношения следования «базовое решение – результирующее решение» линиями-шлейфами, цвет которых меняется от серого (от базового решения) к белому (к решению-результату).



**Рис. 3** Визуально-образное представление эффекта синергии: (а) схема распределения решений агентов,  $P_{i-j}$  — решения, найденные  $i$ -м агентом на основе решений  $j$ -го агента ( $i \neq j$ ), или решения, найденные  $i$ -м агентом независимо ( $i = j$ ),  $i, j \in [1, N]$ , где  $N$  — число агентов; (б) первичные решения проблемы, найденные агентами до начала «обсуждения»; (в) решения проблемы, найденные агентами в ходе «обсуждения» и связи между ними; (г) оцененные решения; (д) визуальное представление эффекта синергии; (е) визуальное представление эффекта синергии (диссергии) в случае итерационного процесса решения проблемы

На стадии конвергентного группового мышления вычисляются критерии качества всех решений, включая первичные, после чего соответствующие им шары поднимаются над плоскостью кольцевой схемы на высоту, пропорциональную  $KKR_i$  (рис. 3, г). При этом координаты  $\varphi_i$  и  $r_i$  центра сферы остаются неизменными. Оси, проекции на оси и обозначения на рис. 3 носят вспомогательный характер и пользователю не демонстрируются, при этом он может изменять угол обзора по трем осям для снятия неопределенности отображения трехмерного изображения в двумерном пространстве. Далее вычисляется значение  $KKP_1$ , после чего шары, отображающие решения, у которых  $KKR_i \leq KKP_1$ , окрашиваются в красный цвет (темно-серый на рис. 3, г), а те, у которых  $KKR_i > KKP_1$ , — в зеленый (серый на рис. 3, г). Соответствующие линии-шлейфы, связывающие решения, также перекрашиваются.

По результатам расчета  $KKR_i$  и  $KKP_1$  вычисляется значение оценки эффекта синергии  $C_{\text{ГиИМАС}}$  (1), и оно отображается над схемой распределения решений полупрозрачным полым цилиндром зеленого (серый на рис. 3, д), если  $C_{\text{ГиИМАС}} > 0$ , или красного (темно-серый на рис. 3, д), в противоположном случае, цвета. Одна из кольцевых граней располагается на высоте соответствующей  $KKP_1$ , а другая — на высоте, пропорциональной  $KKP_2$ , т. е. высота полого цилиндра пропорциональна  $C_{\text{ГиИМАС}}$ . Если  $KKP_1 = 0$ , а  $KKP_2 = KKP_{\max}$ , этот цилиндр займет все пространство между диаграммой распределения решений и кольцом, обозначающим  $KKP_{\max}$ , а при  $KKP_1 = KKP_2$  он преобразуется в кольцо красного (темно-серого при отображении в оттенках серого) цвета, обозначая диссергию.

Если ГиИМАС моделирует итерационный процесс решения проблем (см. рис. 2), то внутри кольца текущей схемы распределения решений отображается кольцо схемы очередной итерации процесса, после чего на ней визуализируются решения очередной итерации и строится визуально-образное представление эффекта синергии. На рис. 3, е показаны четыре итерации процесса решения проблемы, когда на второй итерации возник эффект диссергии, т. е. полученные решения оказались хуже лучшего решения предыдущей итерации.

Таким образом, пользователь ГиИМАС может наглядно и быстро оценивать эффект синергии, возникающий на итерациях процесса решения проблем ГиИМАС, по высоте полупрозрачного полого цилиндра и его цвету. За счет наличия схемы распределения решений могут быть выделены кластеры решений для распознавания и понимания эффективности работы агентов и их групп и регулирования состава или архитектуры ГиИМАС. Хранение образов-связей между решениями позволяет проследить историю формирования коллективного решения, предлагаемого ГиИМАС, что повышает доверие пользователя к рекомендациям компьютерного искусственного интеллекта.

## 4 Заключение

В работе предложены модели одноэтапного и итерационного процессов решения проблем малым коллективом экспертов, которые могут использоваться

в ГиИМАС для решения проблем с учетом разнородного характера информации и динамичности проблемной ситуации. Рассмотрено понятие эффекта синергии и метод ее расчета как один из подходов к оценке эффективности взаимодействия агентов ГиИМАС и принятия решения о необходимости его регулирования. Кроме того, оценка эффекта синергии может использоваться в качестве критерия останова процесса решения проблем ГиИМАС.

Разработан метод визуализации эффекта синергии в ГиИМАС, моделирующей субъектную составляющую коллективного управления сложными системами. Применение этого метода наглядно демонстрирует проявления синергии в ГиИМАС как для одноэтапного, так и для итерационного процесса решения проблем. Благодаря отображению динамики процесса решения проблемы ГиИМАС, взаимосвязей решений, оценки вклада отдельных агентов в итоговое коллективное решение пользователь ГиИМАС может принять решение о необходимости корректировки ее состава или архитектуры.

## Литература

1. Колесников А. В., Кириков И. А., Листопад С. В., Румовская С. Б., Доманичкий А. А. Решение сложных задач коммивояжера методами функциональных гибридных интеллектуальных систем / Под ред. А. В. Колесникова. — М.: ИПИ РАН, 2011. 295 с.
2. Кириков И. А., Колесников А. В., Румовская С. Б., Барзенков А. В., Петренко Е. В. Концептуальная модель виртуальных гетерогенных коллективов для поддержки принятия групповых решений // Системы и средства информатики, 2016. Т. 26. № 3. С. 93–105.
3. Спирidonов В. Ф. Психология мышления: Решение задач и проблем. — М.: Генезис, 2006. 319 с.
4. Самсонова М. В., Ефимов В. В. Технология и методы коллективного решения проблем. — Ульяновск: УлГТУ, 2003. 152 с.
5. Занковский А. Н. Организационная психология. — М.: Флинта, МПСИ, 2002. 648 с.
6. Организационное поведение / Под ред. Г. Р. Латфуллина, О. Н. Громовой. — СПб.: Питер, 2004. 432 с.
7. Kaner S., Lind L., Toldi C., Fisk S., Berger D. The facilitator's guide to participatory decision-making. — San Francisco, CA, USA: Jossey-Bass, 2011. 368 p.
8. Кириков И. А., Колесников А. В., Листопад С. В., Румовская С. Б. Метод измерения эффекта синергии в гибридных интеллектуальных многоагентных системах // Системы и средства информатики, 2017. Т. 27. № 3. С. 99–111.
9. Кириков И. А., Колесников А. В., Листопад С. В. Визуальное моделирование групповых процессов при принятии решений малым коллективом экспертов // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Серия: Физико-математические и технические науки, 2017. № 4. С. 80–90.

Поступила в редакцию 01.08.18

## VISUAL SIMULATION OF SYNERGY EFFECT IN HYBRID INTELLIGENT MULTIAGENT SYSTEMS

**I. Kirikov<sup>1</sup>, A. Kolesnikov<sup>1,2</sup>, and S. Listopad<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Kaliningrad Branch of the Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 5 Gostinaya Str., Kaliningrad 236000, Russian Federation

<sup>2</sup>Immanuel Kant Baltic Federal University, 14 A. Nevskogo Str., Kaliningrad 236041, Russian Federation

**Abstract:** Traditionally, to solve problems in social and technical systems, methods of collective intelligence are used, which allow coping with the heterogeneity of information and the dynamics of situations. Decision making by a team of experts at a round table, a hybrid intelligent multiagent system, or a virtual heterogeneous team is a complex multistage negotiation and exchange of solutions process, for effective organization of which a relevant tool is needed. A method for visual modeling of the synergy effect is proposed to visually assess the effectiveness of the team of experts and/or agents and to take control actions to improve it.

**Keywords:** expert team; synergy; hybrid intelligent multiagent system

**DOI:** 10.14357/08696527180313

### References

1. Kolesnikov, A. V., I. A. Kirikov, S. V. Listopad, S. B. Rumovskaya, and A. A. Domantitskiy. 2011. *Reshenie slozhnykh zadach kommivoyazhera metodami funktsional'nykh gibridnykh intellektual'nykh system* [Complex travelling salesman problems solved by the methods of the functional hybrid intelligent systems]. Moscow: IPI RAN. 295 p.
2. Kirikov, I. A., A. V. Kolesnikov, S. B. Rumovskaya, A. V. Barzenkov, and E. V. Petrenko. 2016. Kontseptual'naya model' virtual'nykh heterogennykh kollektivov dlya podderzhki prinyatiya gruppovykh resheniy [Conceptual model of virtual heterogeneous collective for supporting group decision-making]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 26(3):93–105.
3. Spiridonov, V. F. 2006. *Psikhologiya myshleniya: Resheniye zadach i problem* [Psychology of thinking: Solving tasks and problems]. Moscow: Genezis. 319 p.
4. Samsonova, M. V., and V. V. Yefimov. 2003. *Tekhnologiya i metody kollektivnogo resheniya problem* [Technology and methods of collective problem solving]. Ul'yanovsk: UIGTU. 152 p.
5. Zankovskiy, A. N. 2002. *Organizacionnaya psikhologiya* [Organizational psychology]. Moscow: Flinta, MPSI. 648 p.
6. Latfullin, G. R., and O. N. Gromova, eds. 2004. *Organizacionnoye povedeniye* [Organizational behavior]. St. Petersburg: Piter. 432 p.

7. Kaner, S., L. Lind, C. Toldi, S. Fisk, and D. Berger. 2011. *The facilitator's guide to participatory decision-making*. San Francisco, CA: Jossey-Bass. 368 p.
8. Kirikov, I. A., A. V. Kolesnikov, S. V. Listopad, and S. B. Rumovskaya. 2017. Metod izmereniya effekta sinergii v gibridnykh intellektual'nykh mnogoagentnykh sistemakh [The method of measuring the synergy effect in hybrid intelligent multiagent systems]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 27(3):99–111.
9. Kirikov, I. A., A. V. Kolesnikov, and S. V. Listopad. 2017. Vizual'noe modelirovaniye gruppovykh protsessov pri prinyatii resheniy malym kollektivom ekspertov [Visual modeling of group processes in decision-making by a small team of experts]. *Vestnik Baltiyskogo federal'nogo universiteta im. I. Kanta. Seriya: fiziko-matematicheskiye i tekhnicheskiye nauki* [Bulletin of the I. Kant Baltic Federal University. Series: Physics, Mathematics, and Engineering] 4:80–90.

Received August 1, 2018

## Contributors

**Kirikov Igor A.** (b. 1955) — Candidate of Science (PhD) in technology, director, Kaliningrad Branch of the Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 5 Gostinaya Str., Kaliningrad 236000, Russian Federation; baltipiran@mail.ru

**Kolesnikov Alexander V.** (b. 1948) — Doctor of Science in technology, professor, Institute of Physical and Mathematical Sciences and Information Technology, Immanuel Kant Baltic Federal University, 14 A. Nevskogo Str., Kaliningrad 236041, Russian Federation; senior scientist, Kaliningrad Branch of the Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 5 Gostinaya Str., Kaliningrad 236000, Russian Federation; avkolesnikov@yandex.ru

**Listopad Sergey V.** (b. 1984) — Candidate of Science (PhD) in technology, senior scientist, Kaliningrad Branch of the Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 5 Gostinaya Str., Kaliningrad 236000, Russian Federation; ser-list-post@yandex.ru

## СТАДИИ ЦЕЛЕНАПРАВЛЕННОГО ИЗВЛЕЧЕНИЯ ЗНАНИЙ, ИМПЛИЦИРОВАННЫХ В ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ТЕКСТАХ\*

*И. М. Зацман<sup>1</sup>*

**Аннотация:** Рассматриваются стадии процесса извлечения имплицированных знаний о переводных соответствиях языковых единиц (ЯЕ) в оригинале и переводе, а также технология целенаправленного формирования лингвистических типологий на основе извлеченных знаний. Речь идет не о представлениях в виде типологий конвенциональных знаний по теории и практике перевода, эксплицированных в справочниках и словарях. Предлагается подход к выявлению лакун в существующей системе знания о языке и переводе, а также средства информатики, обеспечивающие целенаправленное заполнение выявленных лакун. Описание предлагаемого подхода иллюстрируется примером разработки типологии моделей перевода немецких конструкций с модальными глаголами на русский язык, формируемой итерационно в процессе автоматизированной обработки параллельных текстов. В них встречаются случаи имплицирования субъективных знаний переводчиков, которые не представлены в системе современного знания о языке и переводе. Для обеспечения экспликации предлагается информационная технология, помогающая лингвистам обрабатывать параллельные тексты и целенаправленно извлекать имплицированные знания. Цель статьи состоит в описании стадий процесса извлечения имплицированных знаний из параллельных текстов.

**Ключевые слова:** параллельные тексты; корпусная лингвистика; имплицированные знания; извлечение знаний; информационная технология; целенаправленность; формирование типологий

**DOI:** 10.14357/08696527180314

### 1 Введение

Описание стадий процесса извлечения имплицированных знаний из параллельных текстов является одной из задач проекта по гранту РФФИ «Метод и информационная технология для целенаправленного формирования новых лингвистических типологий», который в настоящее время выполняется в Институте проблем информатики ФИЦ ИУ РАН. Существует принципиальное различие между знаниями, представленными в параллельных текстах, в которых соотнесены оригинал и его перевод на другой язык, и имплицированными в них знаниями переводчиков этих текстов.

\*Работа выполнена в Институте проблем информатики ФИЦ ИУ РАН при поддержке РФФИ (проект 18-07-00192).

<sup>1</sup>Институт проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук, izatsman@yandex.ru

В первом случае смысловое содержание оригинального и переводного текстов непосредственно передается с помощью естественных языков оригинала или перевода соответственно. Второй случай предполагает знание двух языков и переводных соответствий ЯЕ оригинального и переводного текстов. Для понимания текста перевода необходимо знание языка оригинала и переводных соответствий, но для выполнения перевода знание переводных соответствий является необходимым. При этом в процессе перевода возможны случаи имплицирования в параллельных текстах концептов субъективных знаний переводчиков, которые не представлены в системе современного знания (ССЗ) о языке и переводе. Предлагаемая технология их итерационного извлечения обеспечивает целенаправленное развитие ССЗ.

Обзор существующих качественных моделей итерационных процессов извлечения и генерации знаний, предложенных Нонака, Такеучи, Вежбицки, Накамори и другими авторами, развивающими их подходы [1–6], приведен в работе [7]. В ней показано, что эти модели не применимы для описания процессов целенаправленного извлечения имплицированных знаний. Причина в том, что имплицированные знания не включены в перечень категорий знания, рассматриваемых в рамках этих моделей. Кроме того, существующие качественные модели не позволяют оценить прирост знания на каждой итерации его извлечения, а также он не разделяется на концепты, которые можно было бы соотнести с отдельными итерациями их формирования.

Существуют количественные модели описания процессов появления новых концептов у существующих слов. Их построение основано на статистическом анализе данных исторических тезаурусов, фиксирующих моменты времени появления новых значений слов. Иначе говоря, эти модели описывают процессы спонтанного появления новых концептов у исследуемых лексических единиц [8, 9], а не целенаправленное извлечение концептов имплицированных знаний.

В заключение краткого перечисления работ по тематике моделирования процессов извлечения, генерации и представления нового знания отметим результаты конструктивистской социологии науки, которая «рассматривает производство знаний на различных его этапах, соответствующих процессу научного поиска, конечный результат которого не известен» [10, 11]. Однако и в этом направлении научных исследований также не ставится задача целенаправленного извлечения знаний, но является предметом изучения в этой статье (в части описания стадий извлечения имплицированных знаний) и в проекте РФФИ в целом.

Предложения параллельных текстов, в которых имплицированы концепты субъективных знаний переводчиков, в статье будем называть *объектами интерпретации*, которые по определению являются двуязычными [12, 13]. Информационная технология формирования (ИТФ) лингвистических типологий<sup>1</sup>,

---

<sup>1</sup> В лингвистике типологии используются, как правило, для описания сходства и различий между языками. В статье этот термин используется в другом значении: для описания сходства и различий между ЯЕ.

проектируемая в рамках проекта РФФИ, предназначена для поиска таких объектов в параллельных текстах и обеспечения целенаправленной экспликации имплицированных в них знаний в процессе семантического анализа лингвистами найденных объектов интерпретации. В работе [7] сформулированы следующие необходимые условия создания ИТФ, обеспечивающей прирост научного знания в лингвистике за счет извлечения имплицированных знаний об исследуемых ЯЕ:

- наличие информационных ресурсов как источника нового эксплицированного знания, возможность их фрагментации на объекты интерпретации, в которых имплицированы индивидуальные (субъективные) концепты знаний переводчиков, и поиска отдельных объектов, содержащих исследуемые ЯЕ;
- возможность описания потенциальных лакун в ССЗ с помощью разметки тегами найденных объектов интерпретации, сформированных в результате фрагментации;
- возможность заполнения лакун в ССЗ результатами семантического анализа размеченных объектов интерпретации в процессе извлечения имплицированных в них концептов знаний переводчиков об исследуемых ЯЕ.

Цель статьи состоит в описании стадий процесса целенаправленного извлечения имплицированных знаний и теоретических оснований создания ИТФ лингвистических типологий на основе извлеченных знаний об исследуемых ЯЕ.

## 2 Стадии процесса извлечения имплицированных знаний

Предлагаемый подход к созданию ИТФ, обеспечивающей извлечение и генерацию нового эксплицированного знания в лингвистике, включает как уже существующие, так и те методы обработки параллельных текстов, которые необходимо адаптировать к решению задач проекта РФФИ. В статье описание методов соотнесено со стадиями проведения лингвистических исследований, цель которых состоит в создании новых типологий [14, 15], формируемых на основе имплицированных знаний, извлекаемых в процессе лингвистического аннотирования исследуемых ЯЕ и их переводов [16–19]. Перечислим пять стадий, которые в совокупности образуют одну итерацию целенаправленного извлечения имплицированных знаний, используемых для создания новых типологий.

**Стадия 1.** Каждая итерация начинается с определения списка ЯЕ, исследуемых на текущей итерации, и поиска в параллельных текстах тех предложений (как объектов интерпретации), которые содержат эти ЯЕ. Примеры предложений параллельных текстов с исследуемыми немецкими модальными глаголами и их переводы приведены в табл. 1.

Для решения задач проекта РФФИ в настоящее время наиболее представительный массив немецко-русских параллельных текстов в электронной форме объемом 2,6 млн словоупотреблений хранится в Параллельном немецком корпусе (ПНК), который находится в открытом доступе [20]. Примеры в табл. 1

**Таблица 1** Примеры выровненных предложений параллельных текстов

Оригинал	Перевод
Sollte jetzt etwa eine Predigt stattfinden? [Franz Kafka. Der Prozess (1914)]	Неужели сейчас кто-то будет читать проповедь? [Франц Кафка. Процесс (Р. Райт-Ковалева, 1965)]
Warum mußte er diese Demoiselle Stüwing heiraten und den... Laden... [Thomas Mann. Buddenbrooks (1896–1900)]	Зачем ему понадобилось жениться на этой мадемуазель Штювинг с ее... лавкой? [Томас Манн. Будденброки (Н. Ман, 1953)]
Er durfte nun eine Weile lang guten Gewissens ruhen. [Patrick Süskind. Das Parfum: Die Geschichte eines Mörders (1985)]	Теперь он имел право некоторое время отдохнуть. [Патрик Зюскинд. Парфюмер: История одного убийцы (Э. Венгерова, 1992)]
«Das Kind kann nichts dafür», hörte sie die Stimme sagen, «aber du, Kassiopeia — warum hast du das nur getan?» [Michael Ende. Momo (1973)]	— Ребенок не виноват, — услышала она говорившего. — Но ты, Кассиопея, почему ты это сделала? [Михаэль Энде. Момо (Ю. И. Коринец, 1982)]
«Mag sein», sagte der Advokat, «wir wollen aber trotzdem nichts übereilen». [Franz Kafka. Der Prozess (1914)]	— Возможно, — сказал адвокат, — и все же не будем торопиться. [Франц Кафка. Процесс (Р. Райт-Ковалева, 1965)]

скопированы из этого корпуса. Его параллельные тексты являются выровненными (оригинальным предложениям поставлены в соответствие их переводы), т. е. необходимая их фрагментация на объекты интерпретации (т. е. на пары немецкого и русского предложений) уже выполнена в процессе формирования этого корпуса.

**Стадия 2.** Выполняется лингвистическое аннотирование выровненных предложений с исследуемыми ЯЕ как объектов интерпретации, найденных в параллельных текстах на стадии 1. Метод аннотирования с использованием динамических фасетных классификаций описан в работах [16–18, 21]. Этот метод допускает возможность незавершенности процесса аннотирования из-за лакун в ССЗ и включения в аннотации тегов, описывающих причины незавершенности этого процесса.

Покажем на примере, как незавершенное аннотирование найденных объектов интерпретации позволяет фиксировать лакуны в ССЗ. Предполагается, что до начала аннотирования отобраны грамматические справочники, словари и/или авторитетные издания, которые отражают современный уровень знания об исследуемых ЯЕ. Для используемого примера аннотирования ЯЕ и их контекстов был выбран немецко-русский словарь [22], который отражает современный уровень знания об исследуемых ЯЕ и их переводах на русский язык. Результатом анно-

**Таблица 2** Пример завершенной аннотации

Sie <b>sollten</b> diese ungemütliche Sache jetzt <i>lieber</i> <i>sein</i> <i>lassen.</i>	<b>sollen</b> ⟨+Inf I⟩ ⟨Sie⟩ ⟨Praet⟩ ⟨Konj II⟩ ⟨sollen-3⟩	— <b>Давай</b> оставим это де- ло в покое.	⟨1pl⟩ ⟨Imperat⟩ ⟨2sg⟩ ⟨давай⟩
---	--	---	--

**Примечания:** ⟨+Inf I⟩ — управляет глаголом в форме инфинитива I; ⟨Sie⟩ — вежливая форма обращения ко 2-му лицу; ⟨Praet⟩ — Präteritum; ⟨Konj II⟩ — Konjunktiv II; ⟨sollen-3⟩ — соответствует 3-му значению в словарной статье о модальном глаголе *sollen*; ⟨1pl⟩ — 1-е лицо, множественное число (глагола, управляемого формой *давай*); ⟨Imperat⟩ — императив (характеристика формы *давай*); ⟨2sg⟩ — характеристика формы *давай*.

**Таблица 3** Пример незавершенной аннотации

Gut, sagte ich, <b>soll</b> <i>er dich verehren</i> , aber soviel kostbare Blumen, das ist aufdringlich.	<b>Sollen</b> ⟨+Inf I⟩ ⟨3sg⟩ ⟨Praes⟩ ⟨sollen-x⟩ ⟨Verb-Initial⟩	— Очень мило, — сказал я, — <i>по- клонник поклонни- ком</i> , но дарить такой большой букет до- рогих цветов — зна- чит навязываться.	⟨xN-Nomin+xN-Instr⟩
---	---	--	---------------------

**Примечания:** ⟨sollen-x⟩ означает, что значение модального глагола в этом предложении не найдено в немецко-русском словаре, используемом в процессе лингвистического аннотирования [22]; ⟨xN-Nomin+xN-Instr⟩ — конструкция «существительное в именительном падеже + то же существительное в творительном».

тирования могут быть как завершенные (табл. 2), так и незавершенные (табл. 3) двуязычные аннотации<sup>1</sup>.

Именно незавершенные аннотации позволяют выявить лакуны в ССЗ, о чем более подробно будет сказано в следующем разделе.

**Стадия 3.** Выполняется семантический анализ языковых данных, содержащихся в аннотациях, помеченных тегами незавершенности, с целью извлечения имплицированных знаний для заполнения лакун в ССЗ.

**Стадия 4.** Формирование (пополнение) типологии, создаваемой для исследуемых ЯЕ, выполняется в том случае, если на стадии 3 текущей итерации удается извлечь имплицированные знания в процессе семантического анализа незавершенных аннотаций.

**Стадия 5.** Проводится количественная оценка изменения степени заполнения лакун в ССЗ, после завершения которой осуществляется переход к следующей

<sup>1</sup>Аннотации сформированы В. И. Карповым (см. табл. 2) и А. А. Гончаровым (см. табл. 3). Примечания к табл. 2 и 3 подготовлены Д. О. Добровольским и Анной А. Зализняк.

итерации, начиная с первой стадии, если не достигнута желаемая степень заполнения лакун.

### 3 Основания создания информационной технологии формирования

Рассмотрим существующие и адаптируемые методы и подходы, на основе которых создается ИТФ, обеспечивающая пять перечисленных стадий целенаправленного извлечения лингвистами имплицированных знаний.

**Первая стадия** каждой итерации начинается с выбора тех ЯЕ, которые лингвисты планируют анализировать на этой итерации. В используемом примере объектами интерпретации являются предложения с немецкими модальными глаголами и их переводы на русский язык. Цель исследования состоит в уточнении номенклатуры значений этих глаголов и формировании типологии моделей перевода немецких конструкций с модальными глаголами на русский язык [15]. Для проведения такого исследования необходимо извлечь из коллекции немецко-русских текстов предложения с немецкими модальными глаголами, для чего применяется известный метод поиска по леммам глаголов [20]. На первой стадии отбираются предложения с теми глаголами, которые планируется исследовать на текущей итерации.

Для более сложного поиска предложений, в переводах которых использована некоторая ЯЕ, была выполнена адаптация метода двуязычного поиска. Например, адаптированным методом двуязычного поиска могут быть найдены предложения с глаголом «*sollen*» (в любой форме) в оригинале и с частицей «путь» в их переводах (табл. 4).

**Таблица 4** Примеры предложений с глаголом «*sollen*» в оригинале и с частицей «путь» в переводе

Оригинал	Перевод
Lieber soll er mich für undankbar halten. [Gustav Meyrink. Der Golem (1914)]	Пусть он лучше считает меня неблагодарным. [Густав Майринк. Голем (Д. Выгодский, 1922)]
Dies alles solle er beschwören bei sämtlichen Heiligen, bei der armen Seele seiner Mutter und bei seiner eigenen Ehre. [Patrick Süskind. Das Parfum: Die Geschichte eines Mörders (1985)]	Пусть он поклянется в этом всеми святыми, бедной душой своей матери и собственной честью. [Патрик Зюскинд. Парфюмер: История одного убийцы (Э. Венгерова, 1992)]

**Вторая стадия** лингвистического аннотирования, нацеленного на извлечение новых знаний, обладает тремя особенностями. Во-первых, при формировании аннотаций лингвисты могут использовать не только уже имеющиеся рубрики динамических фасетных классификаций, которые применяются в процессе аннотирования (они описаны в работах [16–18, 21]), но и добавлять новые рубрики,

основания и уровни рубрицирования. Во-вторых, не меняя названия рубрики, лингвисты могут изменить ее дефиницию, основываясь на новом найденном экспериментальном материале. В-третьих, возможны ситуации, когда не получается завершить аннотирование некоторого предложения, включающего исследуемую ЯЕ (например, когда в этом предложении встретилось новое значение этой ЯЕ, которое не описано в ССЗ), и его перевода.

Например, чтобы пометить аннотации, которые содержат новые значения, отсутствующие в немецко-русском словаре [22], им может быть приписан специальный тег *<sollen-x>*, маркирующий их незавершенность и фиксирующий потенциальные лакуны в ССЗ (см. табл. 3 и примечания к ней). Это дает возможность учесть третью особенность лингвистического аннотирования, нацеленного на извлечение имплицированных знаний.

Что касается первой особенности, то в целях создания ИТФ разработан метод редактирования динамических фасетных классификаций, позволяющий в процессе формирования аннотаций добавлять рубрики, новые основания и уровни рубрицирования. Возможность включения в фасетные классификации для каждой рубрики стека ее дефиниций позволяет учесть вторую особенность лингвистического аннотирования, что дает возможность лингвистам изменять дефиницию любой рубрики, не меняя ее название, и указать ее актуальное значение. Важно отметить: так как лингвисты могут изменить актуальное значение, то для этих случаев создаваемая ИТФ будет обеспечивать переклассификацию аннотаций с измененным актуальным значением рубрики.

На **третьей стадии** для семантического анализа отбираются незавершенные аннотации, которые и являются источником знаний, извлекаемых для заполнения лакун в ССЗ. В создаваемой ИТФ предусматривается возможность кластеризации массива отобранных незавершенных аннотаций. Для этого применяется метод, основанный на двуязычном лексико-грамматическом поиске аннотаций (он уже упоминался на первой стадии, но там он используется для поиска выровненных предложений, а не сформированных на их основе аннотаций).

Поясним необходимость применения метода кластеризации на примере массива аннотаций, которые имеют тег *«sollen-x»*.

Анализ незавершенных аннотаций с одним и тем же тегом *«sollen-x»* может привести к тому, что лингвисты извлекут из них несколько новых значений глагола *«sollen»*. Таким образом, одним и тем же тегом *«sollen-x»* могут быть отмечены аннотации с несколькими разными значениями модального глагола, которые не представлены в ССЗ. Цель применения метода кластеризации состоит в группировке незавершенных аннотаций по формальным признакам с использованием метода двуязычного лексико-грамматического поиска. Использование этого метода дает возможность лингвистам интерактивно формировать подмассивы аннотаций с большей степенью однородности, чем исходный массив, а также использовать в процессе семантического анализа более обозримые по размеру подмассивы по сравнению с полным массивом незавершенных аннотаций. Отметим, что далеко не на каждой итерации в результате семантического

анализа незавершенных аннотаций происходит экспликация имплицированных знаний [7].

Если на третьей стадии некоторой итерации лингвистам удается извлечь новые знания, то на **четвертой стадии** происходит пополнение формируемой типологии с использованием извлеченных лингвистами знаний. Например, если удается определить новое значение немецкого модального глагола «*sollen*», которое до этого не было описано в немецко-русском словаре, то формируется список аннотаций, иллюстрирующих это новое значение в контексте немецких предложений и их переводов на русский язык. Одновременно в словарь включается дефиниция этого нового значения и контексты его использования из аннотаций, а в фасетную классификацию включается новая рубрика для этого значения. В аннотациях сформированного списка тег «*sollen-x*» заменяется на эту новую рубрику, а в типологию добавляются модальные конструкции с этим новым значением глагола «*sollen*» и их переводные эквиваленты. Предварительный вариант структуры разрабатываемой типологии приведен на рис. 7 в работе [23].

В процессе этой замены фиксируется отношение между каждым новым значением глагола «*sollen*» и всеми теми незавершенными аннотациями, в которых эта замена была сделана. При этом каждая аннотация связана с тем объектом интерпретации, на основе которого она была сформирована (см. табл. 1), что дает возможность зафиксировать отношение между каждой новой рубрикой лингвистической типологии и соответствующими ей объектами интерпретации в параллельных текстах. Такие отношения фиксируются не только для новых значений модальных глаголов и новых моделей их перевода, а для всех моделей перевода на русский язык немецких конструкций с известными и новыми значениями модальных глаголов. Система этих отношений, обеспечивающих связанность рубрик и объектов интерпретации, дает возможность другим лингвистам, не участвующим в проекте, верифицировать независимо от участников проекта создаваемые ими лингвистические типологии, используя те же параллельные тексты.

**Пятая стадия** количественной оценки изменения степени заполнения лакун, выявленных на первых двух стадиях, завершает каждую итерацию. Степень заполнения вычисляется на основе изменения числа незавершенных аннотаций, сформированных на текущей и предшествующих ей итерациях.

Например, после выполнения второй стадии можно определить число аннотаций с тегом «*sollen-x*». Потом на четвертой стадии этот тег может быть заменен на одну или несколько новых рубрик. Эта замена может быть сделана во всех аннотациях с тегом «*sollen-x*» или в части из них. Замен может и не быть, когда лакуны выявлены, но степень их заполнения на текущей итерации не увеличилась в процессе семантического анализа в тех случаях, когда новые значения этого немецкого модального глагола не удалось определить и описать на этой итерации.

Итерационное выполнение пяти рассмотренных стадий целенаправленного извлечения имплицированных знаний дает возможность лингвистам не только пополнять существующие лингвистические типологии, но и создавать их с по-

мощью ИТФ с нуля, как в примере формирования типологии моделей перевода на русский язык немецких конструкций с модальными глаголами.

Отметим, что разработанные ранее методы уже помогают заполнять лакуны в простых типологиях, включающих только линейные списки [24, 25], но они не обеспечивают создание иерархических типологий. Именно в этом заключается наиболее существенный пункт новизны ИТФ, обеспечивающей целенаправленное формирование лингвистических типологий, которые являются иерархическими [23].

В заключение этого раздела приведем несколько числовых параметров, иллюстрирующих степень трудоемкости процесса формирования типологий на примере извлечения новых значений модальных глаголов. Ранее отмечалось, что в примере в качестве источника новых знаний используется массив немецко-русских параллельных текстов в электронной форме объемом 2,6 млн словоупотреблений, который хранится в ПНК [20]. Для создания типологии необходимо из этих текстов сначала отобрать с помощью поиска по леммам предложения с исследуемыми немецкими модальными глаголами и одновременно переводы этих предложений на русский язык, а затем итерационно их обработать, выполняя пять перечисленных стадий. Таблица 5<sup>1</sup> содержит данные проведенного поиска: для поиска новых значений модальных глаголов и создания упомянутой типологии исследователям доступны в ПНК более 16 тыс. объектов интерпретации (в таблице они распределены по шести немецким модальным глаголам).

**Таблица 5** Число объектов интерпретации с исследуемыми ЯЕ

Модальный глагол	Число объектов интерпретации
Dürfen	758
Können	5782
Mögen	937
Müssen	3209
Sollen	2041
Wollen	3541
Всего объектов интерпретации	16 268

## 4 Заключение

Предлагаемые теоретические основания создания ИТФ обеспечивают решение трех взаимосвязанных задач:

- (1) обнаружение лакун в ССЗ относительно исследуемых ЯЕ и их переводов;
- (2) целенаправленное извлечение новых знаний для заполнения лакун в ССЗ;
- (3) формирование и развитие лингвистических типологий на основе извлеченных знаний.

Применение ИТФ в процессе лингвистического аннотирования дает возможность лингвистам сформировать массив незавершенных аннотаций. Последующий их семантический анализ позволяет выявить новые значения исследуемых ЯЕ и создать искомую типологию. В настоящее время разработан первый

<sup>1</sup>Таблица 5 сформирована М. Г. Кружковым.

компонент ИТФ, ориентированный на обнаружение лакун в ССЗ о переводах конструкций с немецкими модальными глаголами на русский язык. Первые результаты его использования позволяют говорить о возможности обеспечения целенаправленной экспликации имплицированных знаний и формирования на их основе иерархических лингвистических типологий [23].

В процессе проектирования ИТФ стала очевидной необходимость развития системы терминов, определенной ранее в работе [21]. Эти термины используются лингвистами для представления новых фундаментальных знаний, полученных ими в процессе лингвистического аннотирования исследуемых ЯЕ. Также они применяются при разработке ИТФ, включая создание информационного, лингвистического и программного видов ее обеспечения.

Основное будущее направление развития системы терминов связано с разделением моделей перевода на полисемантические, описывающие одновременно несколько значений одной исследуемой ЯЕ и их переводы, и моносемантические, описывающие одно значение и его перевод. Предлагаемое развитие системы терминов планируется выполнить в процессе решения задач данного проекта РФФИ.

## Литература

1. Nonaka I. The knowledge-creating company // Harvard Bus. Rev., 1991. Vol. 69. No. 6. P. 96–104.
2. Нонака И., Такеучи Х. Компания — создатель знания. — М.: Олимп-бизнес, 2003. 384 с. (Nonaka I., Takeuchi H. The knowledge-creating company. — Oxford, NY, USA: Oxford University Press, 1995. 284 p.).
3. Nonaka I., Toyama R. The knowledge-creating theory revisited: Knowledge creation as a synthesizing process // Knowl. Man. Res. Pract., 2003. Vol. 1. No. 1. P. 2–10.
4. Wierzbicki A. P., Nakamori Y. Basic dimensions of creative space // Creative space: Models of creative processes for knowledge civilization age / Eds. A. P. Wierzbicki, Y. Nakamori. — Berlin: Springer Verlag, 2006. P. 59–90.
5. Wierzbicki A. P., Nakamori Y. Knowledge sciences: Some new developments // Z. Betriebswirt., 2007. Vol. 77. No. 3. P. 271–295.
6. Nakamori Y. Knowledge and systems science — enabling systemic knowledge synthesis. — London, New York: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2013. 234 p.
7. Зацман И. М. Имплицированные знания: основания и технологии извлечения // Информатика и ее применения, 2018. Т. 12. Вып. 3. С. 74–82.
8. Kay C., Roberts J., Samuels M., Wotherspoon I., Alexander M. The historical thesaurus of English. Version 4.2. — Glasgow, U.K.: University of Glasgow, 2015. <https://historicalthesaurus.arts.gla.ac.uk>.
9. Ramiro C., Srinivasan M., Malt B. C., Xu Y. Algorithms in the historical emergence of word senses // P. Natl. Acad. Sci. USA, 2018. Vol. 115. No. 10. P. 2323–2328.
10. Латур Б. Наука в действии: следя за учеными и инженерами внутри сообщества / Пер. с англ. — СПб.: Изд-во Европейского университета в Санкт-Петербурге, 2013. 414 с. (Latour B. Science in action: How to follow scientists and engineers through society. — Cambridge, MA, USA: Harvard University Press, 1987. 274 p.)

11. Жэнгра И. Социология науки / Пер. с фр. — М.: ВШЭ, 2017. 112 с. (Gingras Y. Sociologie des sciences. — Paris: PUF, 2013. 128 р.)
12. Loiseau S., Sitchinava D. V., Zalizniak Anna A., Zatsman I. M. Information technologies for creating the database of equivalent verbal forms in the Russian–French multivariate parallel corpus // Информатика и её применения, 2013. Т. 7. Вып. 2. С. 100–109.
13. Инькова О. Ю., Кружков М. Г. Надкорпусные русско-французские базы данных глагольных форм и коннекторов // Lingue slave in confronto / Eds. O. Inkova, A. Trovesi. — Bergamo: Bergamo University Press, 2016. P. 365–392.
14. Zatsman I. M., Inkova O. Yu., Nuriev V. A. The construction of classification schemes: Methods and technologies of expert formation // Automatic Documentation Math. Linguistics, 2017. Vol. 51. No. 1. P. 27–41.
15. Добровольский Д. О., Зализняк Анна А. Немецкие конструкции с модальными глаголами и их русские соответствия: проект надкорпусной базы данных // Компьютерная лингвистика и интеллектуальные технологии: По мат-лам Междунар. конф. «Диалог». — М.: РГГУ, 2018. С. 172–184.
16. Дурново А. А., Зацман И. М., Лощилова Е. Ю. Кросс-лингвистическая база данных для аннотирования логико-семантических отношений в тексте // Системы и средства информатики, 2016. Т. 26. № 4. С. 124–137.
17. Зацман И. М., Мамонова О. С., Щурова А. Ю. Обратимость и альтернативность генерализации моделей перевода коннекторов в параллельных текстах // Системы и средства информатики, 2017. Т. 27. № 2. С. 125–142.
18. Зацман И. М., Кружков М. Г., Лощилова Е. Ю. Методы анализа частотности моделей перевода коннекторов и обратимость генерализации статистических данных // Системы и средства информатики, 2017. Т. 27. № 4. С. 164–176.
19. Kruzhkov M. G. Approaches to annotation of discourse relations in linguistic corpora // Информатика и её применения, 2017. Т. 11. Вып. 4. С. 118–125.
20. Параллельный немецкий корпус. <http://www.ruscorpora.ru/search-para-de.html>.
21. Зализняк Анна А., Зацман И. М., Инькова О. Ю. Надкорпусная база данных коннекторов: построение системы терминов // Информатика и её применения, 2017. Т. 11. Вып. 1. С. 100–106.
22. Немецко-русский словарь: актуальная лексика / Под ред. Д. О. Добровольского. — М.: Лексрус, 2018 (в печати).
23. Zatsman I. Goal-oriented creation of individual knowledge: Model and information technology // 19th European Conference on Knowledge Management Proceedings. — Reading, U.K.: Academic Publishing International Ltd., 2018. P. 947–956.
24. Zatsman I., Buntman N. Outlining goals for discovering new knowledge and computerised tracing of emerging meanings // 16th European Conference on Knowledge Management Proceedings. — Reading, U.K.: Academic Publishing International Ltd., 2015. P. 851–860.
25. Zatsman I., Buntman N., Coldefy-Faucard A., Nuriev V. WEB knowledge base for asynchronous brainstorming // 17th European Conference on Knowledge Management Proceedings. — Reading, U.K.: Academic Publishing International Ltd., 2016. Vol. 1. P. 976–983.

Поступила в редакцию 05.08.18

## STAGES OF GOAL-ORIENTED DISCOVERY OF KNOWLEDGE IMPLIED IN PARALLEL TEXTS

*I. M. Zatsman*

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

**Abstract:** The stages of the process of discovering implicit knowledge about the translation correspondences of linguistic units in the original and the translation as well as the technology of goal-oriented creation of linguistic typologies based on the knowledge are considered. This is not a representation of conventional knowledge on the theory and practice of translation, explicated in reference books and dictionaries. An approach is proposed to identify gaps in the existing system of the knowledge about language and translation and informatics tools that ensure the goal-oriented filling of the identified gaps are considered. The description of the proposed approach is illustrated by the example of developing a typology of models for translating German modal verbs into Russian. The typology is created iteratively in the process of automated processing of parallel texts. In them, there are instances of the implication of subjective knowledge of translators that is not represented in the existing system of modern knowledge about language and translation. To provide explication, information technology is suggested that helps linguists process parallel texts and discover implied knowledge. The purpose of the article is to describe the stages of the goal-oriented discovery of knowledge implied in parallel texts.

**Keywords:** parallel texts; corpus linguistics; implicit knowledge; knowledge discovery; information technology; goal-oriented process; creation of typologies

**DOI:** 10.14357/08696527180314

### Acknowledgments

The work was fulfilled at the Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences and supported by the Russian Foundation for Basic Research (project 18-07-00192).

### References

1. Nonaka, I. 1991. The knowledge-creating company. *Harvard Bus. Rev.* 69(6):96–104.
2. Nonaka, I., and H. Takeuchi. 1995. *The knowledge-creating company*. Oxford, NY: Oxford University Press. 284 p.
3. Nonaka, I., and R. Toyama. 2003. The knowledge-creating theory revisited: Knowledge creation as a synthesizing process. *Knowl. Man. Res.* 1(1):2–10.

4. Wierzbicki, A. P., and Y. Nakamori. 2006. Basic dimensions of creative space. *Creative space: Models of Creative Processes for Knowledge Civilization Age*. Eds. A. P. Wierzbicki, and Y. Nakamori. Berlin: Springer Verlag. 59–90.
5. Wierzbicki, A. P., and Y. Nakamori. 2007. Knowledge sciences: Some new developments. *Z. Betriebswirt.* 77(3):271–295.
6. Nakamori, Y. 2013. *Knowledge and systems science — enabling systemic knowledge synthesis*. London, New York: CRC Press, Taylor & Francis Group. 234 p.
7. Zatsman, I. 2018. Implitsirovannye znaniya: osnovaniya i tekhnologii izvlecheniya [Implied knowledge: Foundations and technologies of explication]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 12(3):74–82.
8. Kay, C., J. Roberts, M. Samuels, I. Wotherspoon, and M. Alexander. 2015. *The historical thesaurus of English*. Version 4.2. Glasgow, U.K.: University of Glasgow. Available at: <https://historicalthesaurus.arts.gla.ac.uk> (accessed May 16, 2018).
9. Ramiro, C., M. Srinivasan, B. C. Malt, and Y. Xu. 2018. Algorithms in the historical emergence of word senses. *P. Natl. Acad. Sci. USA* 115(10):2323–2328.
10. Latour, B. 1987. *Science in action: How to follow scientists and engineers through society*. Cambridge; MA: Harvard University Press. 274 p.
11. Gingras, Y. 2013. *Sociologie des sciences*. Paris: PUF. 128 p.
12. Loiseau, S., D.V. Sitchinava, Anna A. Zalizniak, and I. M. Zatsman. 2013. Information technologies for creating the database of equivalent verbal forms in the Russian-French multivariant parallel corpus. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 7(2):100–109.
13. Inkova, O., and M. Kruzhkov. 2016. Nadkorpusnye russko-frantsuzskie bazy dannykh glagol'nykh form i konnektorov [Supracorpora Russian–French databases of verb forms and connectives]. *Lingue slave in confronto*. Bergamo: Bergamo University Press. 365–392.
14. Zatsman, I., O. Inkova, and V. Nuriev. 2017. The construction of classification schemes: Methods and technologies of expert formation. *Automatic Documentation Math. Linguistics* 51(1):27–41.
15. Dobrovolskij, D.O., and Anna A. Zalizniak. 2018. Nemetskie konstruktssi s modal'nymi glagolami i ikh russkie sootvetstviya: proekt nadkorpusnoy bazy dannykh [German constructions with modal verbs and their Russian correlates: A supracorpora database project]. *Computer Linguistics and Intellectual Technologies: Conference (International) "Dialog" Proceedings*. Moscow: RGGU. 17(24):172–184.
16. Durnovo, A., I. Zatsman, and E. Loshchilova. 2016. Kross-lingvisticheskaya baza dannykh dlya annotirovaniya logiko-semanticeskikh otnosheniy v tekste [Cross-lingual database for annotating logical-semantic relations in the text]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 26(4):124–137.
17. Zatsman, I., O. Mamonova, and A. Shchurova. 2017. Obratimost' i al'ternativnost' generalizatsii modeley perevoda konnektorov v parallel'nykh tekstakh [Reversibility and alternativeness of generalization of connective translation models in parallel texts]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 27(2):125–142.
18. Zatsman, I., M. Kruzhkov, and E. Loshchilova. 2017. Metody analiza chastotnosti modeley perevoda konnektorov i obratimost' generalizatsii statisticheskikh dannykh [Methods of frequency analysis of connectives translations and reversibility of statistical data generalization]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 27(4):164–176.

19. Kruzhkov, M. 2017. Approaches to annotation of discourse relations in linguistic corpora. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 11(4):118–125.
20. Parallel'nyy nemetskiy korpus [Parallel German Corpus]. Available at: <http://www.ruscorpora.ru/search-para-de.html> (accessed May 19, 2018).
21. Zaliznyak, Anna A., I. M. Zatsman, and O. Yu. Inkova. 2017. Nadkorpusnaya baza dannykh konnektorov: postroenie sistemy terminov [Supracorpora database on connectives: Term system development]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 11(1):100–106.
22. Dobrovolskij, D. O., ed. 2018 (in press). *Nemetsko-russkiy slovar': aktual'naya leksika* [German–Russian dictionary: Actual vocabulary]. Moscow: Leksrus.
23. Zatsman, I. 2018. Goal-oriented creation of individual knowledge: Model and information technology. *19th European Conference on Knowledge Management Proceedings*. Reading, U.K.: Academic Publishing International Ltd. 947–956.
24. Zatsman, I., and N. Buntman. 2015. Outlining goals for discovering new knowledge and computerised tracing of emerging meanings discovery. *16th European Conference on Knowledge Management Proceedings*. Reading, U.K.: Academic Publishing International Ltd. 851–860.
25. Zatsman, I., N. Buntman, A. Coldefy-Faucard, and V. Nuriev. 2016. WEB knowledge base for asynchronous brainstorming. *17th European Conference on Knowledge Management Proceedings*. Reading, U.K.: Academic Publishing International Ltd. 976–983.

*Received August 5, 2018*

## **Contributor**

**Zatsman Igor M.** (b. 1952) — Doctor of Science in technology, Head of Department, Institute of Informatics Problems, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation; izatsman@yandex.ru

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИНДИКАТОРОВ ИНТЕНСИВНОСТИ ПЕРЕНОСА НАУЧНЫХ ЗНАНИЙ В СФЕРУ ТЕХНОЛОГИЙ\*

*В. А. Минин<sup>1</sup>, И. М. Зацман<sup>2</sup>, В. А. Хавансков<sup>3</sup>, С. К. Шубников<sup>4</sup>*

**Аннотация:** Приведены результаты эксперимента по вычислению значений индикаторов интенсивности процессов переноса (трансфера) научных знаний в сферу технологий. Эксперимент выполнен с использованием одиннадцатилетнего массива полнотекстовых описаний изобретений. Индикаторное оценивание процесса переноса знаний является важным элементом в исследовании взаимосвязей науки и технологической сферы, характеризующим процессы создания научно-технического задела в области перспективных технологий. В ходе исследований, проводимых в ФИЦ «Информатика и управление» РАН, созданы модель, методика и макет информационной системы, обеспечивающие вычисление значений индикаторов интенсивности переноса (ИИП) знаний. Макет системы был использован при проведении эксперимента по вычислению индикаторов для сферы информационных технологий. Основная цель проведения этого эксперимента заключается в сопоставлении смыслового содержания (семантики) индикаторов двух видов, характеризующих разные аспекты интенсивности процессов переноса. Проведено сопоставление вычисленных значений этих индикаторов и уточнено их смысловое содержание.

**Ключевые слова:** информационные взаимосвязи науки и технологий; цитирование научных работ; интенсивность процессов переноса знаний; индикаторное оценивание; информационные технологии

**DOI:** 10.14357/08696527180315

### 1 Введение

Цель данной статьи — сопоставление и уточнение смыслового содержания индикаторов двух видов, характеризующих разные аспекты интенсивности процессов переноса научных знаний в сферу информационных технологий, на основе результатов эксперимента по вычислению их значений. Эксперимент проводился в Институте проблем информатики Федерального исследовательского центра

\* Исследование выполнено в Институте проблем информатики ФИЦ ИУ РАН при финансовой поддержке РФФИ (проект 16-07-00075).

<sup>1</sup> Институт проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук, aleksiss@ya.ru

<sup>2</sup> Институт проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук, izatsman@yandex.ru

<sup>3</sup> Институт проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук, chavanskov@yandex.ru

<sup>4</sup> Институт проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук, sergeysh50@yandex.ru

«Информатика и управление» РАН в рамках проекта по гранту РФФИ «Методы и информационные технологии оценивания интенсивности переноса научных знаний в сферу разработки технологий».

Целью проекта является разработка методов и средств информатики для исследования этих процессов и оценки их интенсивности. Это исследование является развитием работ Института проблем информатики по мониторингу и оцениванию результативности научной деятельности. Индикаторы интенсивности процессов переноса научных знаний в сферу технологий предлагается использовать для оценивания «результатов влияния» научной деятельности. Эти индикаторы дают возможность определять результативность создания научно-технического задела для развития сферы технологий [1–8].

Несмотря на многолетние теоретические и эмпирические исследования, которые были нацелены на изучение процессов переноса научных знаний [9–17] задача многоаспектной оценки их интенсивности с использованием индикаторов разных видов является до сих пор актуальной, хотя первые работы по этой тематике появились около 30 лет назад. Например, Е. Мэнсфилд, проанализировав данные о взаимосвязи результатов научных исследований и технологических инноваций, пришел к выводу, что «...10% технологических новшеств не были бы изобретены или же были бы созданы с большой задержкой, если бы они были сделаны без использования результатов соответствующих академических исследований» [14].

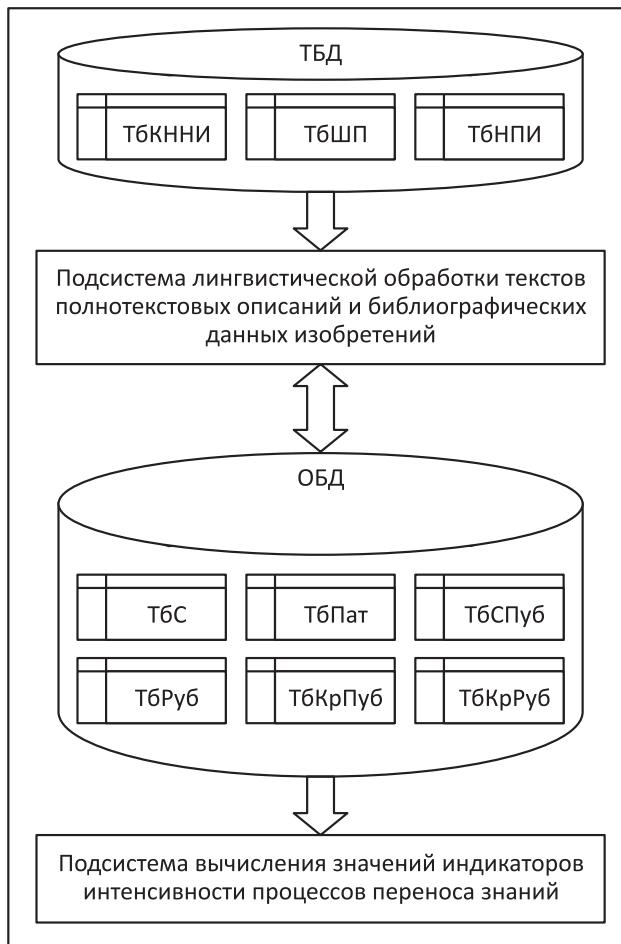
В рамках проекта разработаны модель и методология формирования системы количественных ИИП знаний из различных направлений научных исследований (ННИ) в сферу технологий. Модель и методология основаны на категоризации оснований формирования системы индикаторов, включающей 35 их видов [18, 19]. В частности, к числу этих оснований, использованных для категоризации индикаторов по видам, относятся [19]:

- характер переносимых знаний (фундаментальные и прикладные исследования);
- способ учета совпадающих рубрик классификаторов ННИ, присвоенных научным публикациям, цитируемым в изобретении (фактический учет и частотный).

Формирование ИИП научных знаний требует автоматизированной обработки больших объемов слабоструктурированных полнотекстовых описаний изобретений и сопоставления метаданных патентной информации с метаданными научных публикаций (в журналах или материалах конференций), цитируемых в описаниях изобретений, для чего необходимо было разработать аналитическую информационную систему (АИС) [20].

## **2 Порядок проведения эксперимента**

В эксперименте для вычисления значений ИИП научных знаний был разработан и использован макет АИС, описанный в [20]. Макет (см. рисунок)



Обобщенная структурная схема макета информационной системы

состоит из двух функциональных подсистем, взаимодействующих с основной базой данных (ОБД):

- (1) подсистема лингвистической обработки полнотекстовых описаний и библиографических данных изобретений;
- (2) подсистема вычисления значений ИИП научных знаний в сферу технологий.

Основная база данных состоит из следующих взаимосвязанных таблиц:

- (1) таблица сценариев<sup>1</sup>, содержащая параметры, определяющие заданный вариант исследования процессов переноса знаний (ТбС);

<sup>1</sup>Описание сценариев исследования дано в работе [19].

- (2) таблица изобретений, содержащая их библиографические данные; каждое изобретение соотнесено с некоторым сценарием<sup>2</sup> (ТбПат);
- (3) таблица ссылок на цитируемые публикации, каждая из которых привязана к определенному изобретению, из полного описания которого были извлечены ссылки (ТбСПуб);
- (4) таблица кодов рубрик НИ, которые присваиваются цитируемой в изобретении публикации (ТбРуб);
- (5) таблица кортежей вида ⟨индекс МПК, ссылка на публикацию⟩ (ТбКрПуб);
- (6) таблица кортежей вида ⟨индекс МПК, рубрика НИ⟩ (ТбКрРуб).

Описание упомянутых в списке таблиц кортежей дано в работе [19].

Кроме вышеперечисленных таблиц ОБД в состав информационной системы входит технологическая база данных (ТБД), которая содержит ряд вспомогательных данных:

- (1) рубрики классификаторов НИ, используемых в макете (ТбКНИ);
- (2) таблица шаблонов для поиска ссылок на публикации в текстах описаний изобретений (ТбШП);
- (3) таблица нормализованных названий научных периодических изданий с указанием кодов их тематических рубрик НИ (ТбНПИ).

В макете предусмотрено использование двух классификаторов НИ: классификатор Российской фонда фундаментальных исследований (РФФИ) и более прикладной Государственный рубрикатор научно-технической информации (ГРНТИ).

Эксперимент включает в себя последовательное выполнение ряда этапов обработки первичных и вторичных информационных массивов. Содержание и объем первичных массивов (включающих библиографические данные и полнотекстовые описания запатентованных изобретений) обусловлен исследуемой технологической сферой и временным периодом исследования трансфера научных знаний в данную технологическую сферу. В данном эксперименте исследуемой технологической сферой послужили информационные технологии, к которым были отнесены патенты на изобретение с классом МПК (Международной патентной классификации) G06 «Обработка данных; вычисление; счет» и двумя подклассами: G10L «Анализирование или синтезирование речи; распознавание речи; обработка речи или голоса...» и G11C «Запоминающие устройства статического типа...». Исследуемый в рамках эксперимента период времени составляет 11 лет: с 2002 по 2012 год включительно. В сценарии этот период может быть задан по дате подачи заявок на патентование или публикации патентов, относящихся к исследуемой технологической сфере.

---

<sup>2</sup> Возможна привязка одного изобретения к нескольким заданным сценариям, если исследуемые в них технологические области имеют тематическое пересечение.

На первом этапе проведения эксперимента был сформирован массив библиографических данных тех патентуемых изобретений, которые содержали ссылки на полнотекстовые описания изобретений. Следующим этапом стал поиск (в полнотекстовых описаниях изобретений) ссылок на цитируемые в них публикации, их выделение и экспертная верификация. В рамках эксперимента рассматривались ссылки на научные публикации в журналах и в трудах научных конференций.

Далее для журналов и трудов конференций, выделенных из массива ссылок на научные публикации, экспертами было проведено их (журналов и трудов конференций) рубрицирование по классификаторам НИИ РФФИ и ГРНТИ (использовалась таблица нормализованных названий научных периодических изданий). Следует отметить, что в макете принято следующее допущение: научные публикации наследуют рубрики НИИ журналов или трудов конференций, в которых они опубликованы, что обеспечивает автоматическое формирование записей в таблице кодов рубрик НИИ.

Таким образом, по завершении данного этапа в макете были сформированы таблицы двух видов кортежей: *〈индекс МПК, ссылка на публикацию〉* и *〈индекс МПК, рубрика НИИ〉*.

Макет АИС включает программу вычисления значений ИИП научных знаний. Параметрически для этой программы можно задавать тот уровень тематической иерархии МПК и классификаторов НИИ, для которого вычисляются значения ИИП. Наиболее детальная информация об интенсивности процессов переноса получается при задании самого нижнего уровня иерархии. Если задать более высокий уровень тематической иерархии, то получим (из таблицы вида *〈индекс МПК, ссылка на публикацию〉* или таблицы вида *〈индекс МПК, рубрика НИИ〉*) сгруппированные относительно нижних рубрик данные об интенсивности процессов переноса знаний. Остановимся более подробно на описании уровней тематической иерархии МПК и классификаторов НИИ и рассмотрим пример группировки данных.

Индекс МПК по своей структуре является позиционным кодом и состоит из последовательности символов, используемых для обозначения раздела, класса, подкласса, группы и подгруппы МПК [21]. В качестве примера в табл. 1 описана структура индекса G06F 3/048 «Средства взаимодействия, основанные на графических интерфейсах пользователя» в соответствии с пятью уровнями МПК.

Коды рубрик НИИ также содержат несколько уровней (как правило, три), но их структуры существенно отличаются как от структуры МПК, так и друг

**Таблица 1** Структура индекса МПК G06F 3/048

G	06	F	3	/	048
Раздел — 1-й уровень	Класс — 2-й уровень	Подкласс — 3-й уровень	Группа — 4-й уровень	Разделитель между группой и подгруппой	Подгруппа — 5-й уровень

**Таблица 2** Фрагмент массива кортежей вида  
(индекс МПК, рубрика ННИ)

Индекс МПК	Рубрика ННИ	Вес кортежа (условно)
G05B 19/18	01-215	$V_1$
G05B 19/18	07-410	$V_2$
G05B 19/18	01-217	$V_3$
G06F 11/07	01-215	$V_4$
G06F 11/07	07-410	$V_5$
G06F 11/07	01-217	$V_6$
G06F 5/00	01-215	$V_7$
G06F 5/00	07-410	$V_8$
G06F 5/00	01-217	$V_9$
G06K 9/00	01-214	$V_{10}$
G06K 9/00	01-215	$V_{11}$
G06K 9/00	01-215	$V_{12}$
G06K 9/00	07-410	$V_{13}$
G06K 9/00	01-216	$V_{14}$
G06K 9/00	01-217	$V_{15}$

от друга. Например, код рубрики классификатора ГРНТИ имеет 6 позиций, при этом три уровня рубрикации разделены точками (XX.YY.ZZ). Код рубрики классификатора РФФИ включает в себя три уровня и 5 позиций (XX-YZZ). Первый уровень (XX) отделен от второго и третьего уровней дефисом. Второй уровень определяется значением кода рубрики в первой позиции после дефиса (Y). Третий уровень определяется значениями кода рубрики в последних двух позициях кода (ZZ).

Рассмотрим фрагмент массива кортежей и их весов<sup>1</sup> (табл. 2) и результат его обработки, иллюстрирующего тематическую группировку данных об интенсивности процессов переноса. Рубрики ННИ в данном примере приведены согласно классификатору РФФИ.

Если применить к данному фрагменту массива группировку *на уровне подклассов МПК и второго уровня рубрикатора ННИ* (по классификатору РФФИ), то получим табл. 3.

В третьем столбце показаны суммарные значения весов тех кортежей, которые соответствуют следующей группировке: подкласс МПК (см. табл. 1) – второй уровень ННИ (по классификатору РФФИ).

Исходные данные о патентах на изобретения и о научных публикациях изначально (до группировки кортежей) соотнесены с библиографическими данными, относящимися и к изобретениям, и к научным публикациям. Поэтому кортежи

<sup>1</sup>Определение понятия «вес кортежа» для классификаторов РФФИ и ГРНТИ дано в работе [19].

**Таблица 3** Пример сгруппированных кортежей (подкласс МПК – второй уровень ННИ)

Индекс МПК	Рубрика ННИ	Суммарные значения весов кортежей
G05B	01-200	$V_1 + V_3$
G05B	07-400	$V_2$
G06F	01-200	$V_4 + V_6 + V_7 + V_9$
G06F	07-400	$V_5 + V_8$
G06K	01-200	$V_{10} + V_{11} + V_{12} + V_{14} + V_{15}$
G06K	07-400	$V_{13}$

**Таблица 4** Кортежи (первые два столбца), дополненные тремя полями библиографических данных (последние три столбца)

Индекс МПК	Рубрика ННИ	Год подачи заявки	Год публикации патента	Год научной публикации
G05B	01-200	1998	2000	1988
G05B	07-400	1998	2000	1991
G06F	01-200	1998	2000	1995
G06F	07-400	1998	2000	1988
G06K	01-200	2000	2001	1986
G06K	07-400	2000	2001	1986

могут быть дополнены, например, некоторыми библиографическими данными изобретений и научных публикаций (табл. 4).

С помощью SQL-запросов происходит вычисление требуемых значений для ИИП научных знаний при заданном уровне группировки. Вычисленные значения сохраняются для последующего формирования табличного и/или графического представления значений ИИП научных знаний.

### 3 Таблицы значений индикаторов

Традиции цитирования научных публикаций как в разных областях знаний, так и в разных сферах технологий заметно различаются. Например, библиографические пристатейные списки в биологии традиционно составляют в среднем не менее 25 ссылок, тогда как, например, в физике — менее 20. Поэтому было введено основание категоризации ИИП, описанное в работе [19], названное «Способ учета рубрик классификатора», которое делит все виды индикаторов на два класса (с точки зрения способа учета рубрик ННИ): фактический и частотный. Такое деление несет следующую смысловую нагрузку.

Число тех публикаций, которые цитируются в описании одного изобретения и при этом относятся к *одной и той же тематической рубрике* используемого классификатора, в изобретениях, принадлежащих к разным сферам технологий, может существенно различаться. Однако наличие в описании изобретения даже

только одной такой ссылки уже свидетельствует о возможном случае переноса знаний, относящихся к этой рубрике, в сферу технологий. Если же цитируемых публикаций, имеющих одну и ту же рубрику классификатора в одном описании изобретения, несколько, то вторую и последующие ссылки можно рассматривать как подтверждение случаев переноса знаний, относящихся к этой рубрике ННИ. Для сопоставления интенсивности цитирования в изобретениях, относящихся к *разным сферам* технологий (информационные технологии, биотехнологии и т. д.), предлагается использовать фактический учет рубрик ННИ, так как в этом случае происходит нормализация по среднему числу тех публикаций, которые цитируются в описании *одного изобретения* и при этом относятся к *одной и той же тематической сфере*. Иначе говоря, фактический учет рубрик ННИ дает возможность проводить сопоставления интенсивности в разных сферах технологий (без учета влияния среднего числа цитируемых публикаций в каждой сфере).

Таким образом, введенное в работе [19] основание категоризации индикаторов «Способ учета рубрик классификатора» состоит в учете или неучете подтверждений случаев переноса знаний, относящихся к одной рубрике ННИ, что и дает возможность определить два класса индикаторов по этому основанию: *фактический*, когда учитывается только факт наличия той или иной рубрики классификатора ННИ у одной или нескольких публикаций без учета числа повторений, а также *частотный*, когда учитывается число повторений в одном изобретении. Вычисленные значения индикаторов фактического и частотного классов, характеризующие интенсивность переноса знаний из научных дисциплин, обозначенных рубриками классификатора РФФИ, в сферу информационных технологий приведены в табл. 5.

В заключение этого раздела отметим важный терминологический аспект в названиях рубрик классификаторов. Слово «информатика» в классификаторе РФФИ и рубрикаторе ГРНТИ обозначает две разные научные дисциплины. В классификаторе РФФИ это слово обозначает компьютерную науку (computer science), а в ГРНТИ — информационную науку (information science), которая на современном этапе является профильной, но не базовой научной дисциплиной для создания информационных технологий.

#### **4 Заключение**

Проведенный эксперимент подтвердил, что разработанные в ходе выполнения проекта РФФИ 16-07-00075 и использованные в данном эксперименте концепция и архитектура информационной системы, как и проектные решения функциональных подсистем, дают возможность вычислить значения ИИП знаний из различных ННИ, что позволяет экспертам оценить количественно степень воздействия различных ННИ на развитие той или иной сферы технологий.

Введенное в работе [19] основание категоризации индикаторов «Способ учета рубрик классификатора» впервые дало возможность определить два класса

**Таблица 5** Значения ИИП для двух способов учета рубрик

Классификатор РФФИ		Способ учета рубрик классификатора РФФИ			
Код рубрики	Название рубрики	Фактический учет		Частотный учет	
		Абсолютное значение ИИП	Доля рубрики, %	Абсолютное значение ИИП	Доля рубрики, %
01-200	ИНФОРМАТИКА	146	19,05	52,66	23,47
07-500	СИСТЕМЫ ОБРАБОТКИ И АНАЛИЗА ДАННЫХ	97	12,66	30,95	13,79
07-800	ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ	89	11,61	19,14	8,54
07-700	ЭЛЕМЕНТНАЯ БАЗА ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ	33	4,30	18,49	8,24
08-600	ТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И ПРОЦЕССЫ УПРАВЛЕНИЯ	53	6,91	15,85	7,06
07-600	ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ И СЕТЕВЫЕ РЕСУРСЫ	46	6,00	13,02	5,80
07-400	ИНФОРМАЦИОННЫЕ РЕСУРСЫ И СИСТЕМЫ	58	7,57	9,92	4,42
01-100	МАТЕМАТИКА	50	6,52	9,60	4,28
02-400	РАДИОФИЗИКА, ЭЛЕКТРОНИКА, АКУСТИКА	35	4,56	9,48	4,22
02-200	ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД	34	4,43	8,87	3,95
08-300	ЭЛЕКТРОФИЗИКА, ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА	13	1,69	8,68	3,87
02-300	ОПТИКА, КВАНТОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА	27	3,52	7,05	3,14
04-300	ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ МЕДИЦИНА И ФИЗИОЛОГИЯ	10	1,30	4,90	2,18
05-700	ГЕОГРАФИЯ И ГИДРОЛОГИЯ СУШИ	12	1,56	3,47	1,55
06-200	ЭКОНОМИЧЕСКИЕ НАУКИ	4	0,52	2,10	0,94
05-400	ГЕОФИЗИКА	6	0,78	1,97	0,88
06-300	ФИЛОСОФСКИЕ И СОЦИАЛЬНЫЕ НАУКИ, ПСИХОЛОГИЯ	12	1,56	1,60	0,71

Окончание табл. 5 на с. 198

**Таблица 5** (окончание) Значения ИИП для двух способов учета рубрик

Код рубрики	Название рубрики	Способ учета рубрик классификатора РФФИ			
		Фактический учет		Частотный учет	
		Абсолютное значение ИИП	Доля рубрики, %	Абсолютное значение ИИП	Доля рубрики, %
04-200	ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКАЯ БИОЛОГИЯ	6	0,78	1,52	0,68
02-100	ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА	5	0,65	0,83	0,37
02-900	МЕДИЦИНСКАЯ ФИЗИКА	9	1,17	0,72	0,32
05-500	ОКЕАНОЛОГИЯ	2	0,26	0,62	0,27
08-100	МАШИНОВЕДЕНИЕ И ИНЖЕНЕРНАЯ МЕХАНИКА	3	0,39	0,61	0,27
02-600	ФИЗИКА ПЛАЗМЫ	2	0,26	0,57	0,25
03-200	НЕОРГАНИЧЕСКАЯ ХИМИЯ	1	0,13	0,40	0,18
04-100	ОБЩАЯ БИОЛОГИЯ	6	0,78	0,40	0,18
06-400	ФИЛОЛОГИЯ, КУЛЬТУРОЛОГИЯ, ИСКУССТВОЗНАНИЕ, ОХРАНА ПАМЯТНИКОВ ИСТОРИИ И КУЛЬТУРЫ	2	0,26	0,33	0,15
05-600	ФИЗИКА АТМОСФЕРЫ	2	0,26	0,31	0,14
02-800	АСТРОНОМИЯ	3	0,39	0,30	0,13
02-700	ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА	1	0,13	0,06	0,02

индикаторов по этому основанию: фактический, когда учитывается только факт наличия той или иной рубрики классификатора ННИ у одной или нескольких публикаций без учета числа повторений, и частотный, когда учитывается число повторений в одном изобретении.

Фактический способ учета позволяет:

- провести нормализацию по среднему числу тех публикаций, которые цитируются в описании одного изобретения и при этом относятся к одной и той же тематической рубрике ННИ;
- сопоставить интенсивности цитирования в изобретениях, относящихся к разным сферам технологий, без учета влияния среднего числа ссылок.

Частотный способ учета позволяет сопоставлять интенсивности цитирования в изобретениях с учетом влияния среднего числа ссылок. Такой учет, согласно табл. 5, для одних ННИ приводит к уменьшению относительных значений ИИП частотного класса по сравнению с ИИП фактического класса, а других ННИ — к их увеличению (см., например, рубрику 08-300, для которой частотный способ учета увеличивает долю этой рубрики более чем в 2 раза).

## Литература

1. Зацман И. М., Веревкин Г. Ф. Информационный мониторинг сферы науки в задачах программно-целевого управления // Системы и средства информатики, 2006. Т. 16. № 1. С. 185–210.
2. Зацман И. М., Шубников С. К. Принципы обработки информационных ресурсов для оценки инновационного потенциала направлений научных исследований // Электронные библиотеки: перспективные методы и технологии, электронные коллекции: Тр. IX Всеросс. научн. конф. RCDL'2007. — Переславль: Университет города Переславля, 2007. С. 35–44.
3. Зацман И. М., Кожунова О. С. Семантический словарь системы информационного мониторинга в сфере науки: задачи и функции // Системы и средства информатики, 2007. Т. 17. № 1. С. 124–141.
4. Zatsman I., Kozhunova O. Evaluating for institutional academic activities: Classification scheme for R&D indicators // 10th Conference (International) on Science and Technology Indicators: Book of Abstracts. — Vienna: ARC GmbH, 2008. P. 428–431.
5. Zatsman I., Kozhunova O. Evaluation system for the Russian Academy of Sciences: Objectives–resources–results approach and R&D indicators // Atlanta Conference on Science and Innovation Policy Proceedings / Eds. S. E. Cozzens, P. Catalan. — Atlanta, GA, USA, 2009. <http://smartech.gatech.edu/bitstream/1853/32300/1/104-674-1-PB.pdf>.
6. Zatsman I., Durnovo A. Incompleteness problem of indicators system of research programme // 11th Conference (International) on Science and Technology Indicators: Book of Abstracts. — Leiden: CWTS, 2010. P. 309–311.
7. Архипова М. Ю., Зацман И. М., Шульга С. Ю. Индикаторы патентной активности в сфере информационно-коммуникационных технологий и методика их вычисления // Экономика, статистика и информатика. Вестник УМО, 2010. № 4. С. 93–104.
8. Зацман И. М., Дурново А. А. Моделирование процессов формирования экспериментальных знаний для мониторинга программно-целевой деятельности // Информатика и её применения, 2011. Т. 5. Вып. 4. С. 84–98.
9. Narin F., Noma E. Is technology becoming science? // Scientometrics, 1985. Vol. 7. No. 3–6. P. 369–381.
10. Mansfield E. Academic research and innovation // Res. Policy, 1991. Vol. 20. No. 1. P. 1–12.
11. Schmoch U. Tracing the knowledge transfer from science to technology as reflected in patent indicators // Scientometrics, 1993. Vol. 26. P. 193–211.
12. Mansfield E. Academic research underlying industrial innovations: Sources, characteristics and financing // Rev. Econ. Statistics, 1995. Vol. 77. No. 1. P. 55–62.
13. Narin F., Olivastro D. Linkage between patents and papers: An interim EPO/US comparison // Scientometrics, 1998. Vol. 41. No. 1-2. P. 51–59.
14. Mansfield E. Academic research and industrial innovation: An update of empirical findings // Res. Policy, 1998. Vol. 26. No. 7-8. P. 773–776.
15. Tijssen R. J. W., Buter R. K., Van Leeuwen Th. N. Technological relevance of science: An assessment of citation linkages between patents and research papers // Scientometrics, 2000. Vol. 47. No. 2. P. 389–412.

16. Van Looy B., Zimmermann E., Veugelers R., Verbeek A., Mello J., Debackere K. Do science-technology interactions pay off when developing technology? An exploratory investigation of 10 science-intensive technology domains // *Scientometrics*, 2003. Vol. 57, No. 3. P. 355–367.
17. Third European Report on Science & Technology Indicators. — Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 2003. 451 p.
18. Минин В. А., Зацман И. М., Кружков М. Г., Норекян Т. П. Методологические основы создания информационных систем для вычисления индикаторов тематических взаимосвязей науки и технологий // Информатика и её применения, 2013. Т. 7. Вып. 1. С. 70–81.
19. Минин В. А., Зацман И. М., Хавансков В. А., Шубников С. К. Методы индикаторного оценивания процессов переноса знаний из области научных исследований в сферу технологического развития // Научно-техническая информация. Сер. 2, 2017. № 8. С. 1–12.
20. Минин В. А., Зацман И. М., Хавансков В. А., Шубников С. К. Макетирование информационной системы вычисления индикаторов переноса научных знаний в сферу технологий // Система и средства информатики, 2017. Т. 27. № 3. С. 171–182.
21. Архитектоника классификационных индексов. [http://www1.fips.ru/wps/wcm/connect/content\\_ru/ru/inform\\_resources/international\\_classification/inventions/mpk\\_begin/article\\_2](http://www1.fips.ru/wps/wcm/connect/content_ru/ru/inform_resources/international_classification/inventions/mpk_begin/article_2).

Поступила в редакцию 10.08.18

---

## CALCULATION OF INTENSITY INDICATORS OF SCIENCE-TECHNOLOGY LINKAGES

**V. A. Minin, I. M. Zatsman, V. A. Havanskov, and S. K. Shubnikov**

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

**Abstract:** The outcomes of the experiment on calculating the values of the intensity indicators of science-technology linkages are presented. The experiment was carried out using an eleven-year array of full-text descriptions of inventions. The indicator evaluation of the process of knowledge transfer to the sphere of technology is an important element in the study of the linkages between science and technology, characterizing the processes of creating scientific foundations for developing advanced technologies. In the course of research conducted at the Institute of Informatics Problems of the Russian Academy of Sciences, a model, a methodology, and a testbed of an information system have been created for calculation of the values of the intensity indicators of science-technology linkages. The main aim of this experiment is to compare the meanings of indicators of two types that characterize different aspects of the intensity of knowledge transfer to the sphere of technology. Comparison of the calculated values of these indicators is made and their meanings are specified.

**Keywords:** science-technology linkages; citation of publications in inventions; intensity of knowledge transfer process; indicator assessment; information technologies

**DOI:** 10.14357/08696527180315

## Acknowledgments

The research was supported by the Russian Foundation for Basic Research (project 16-07-00075).

## References

1. Zatsman, I. M., and G. F. Verevkin. 2006. Informatsionnyy monitoring sfery nauki v zadachakh programmnno-tselevogo upravleniya [Information monitoring of scientific activities in projections tasks with specific objectives]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 16(1):185–210.
2. Zatsman, I. M., and S. K. Shubnikov. 2007. Printsypr obrabotki informatsionnykh resursov dlya otsenki innovatsionnogo potentsiala napravleniy nauchnykh issledovaniy [The principles of processing of information resources for estimation of innovative potential of the directions of scientific research]. *Tr. IX Vseross. nauchn. konf. RCDL'2007 "Elektronnye biblioteki: perspektivnye metody i tekhnologii, elektronnye kollektsi"* [9th All-Russian Scientific Conference RCDL'2007 "Digital Libraries: Advanced Methods and Technologies, Digital Collections" Proceedings]. Pereslavl-Zalesky: Pereslavl University. 35–44.
3. Zatsman, I. M., and O. S. Kozhunova. 2007. Semanticcheskiy slovar' sistemy informatsionnogo monitoringa v sfere nauki: zadachi i funktsii [Semantic dictionary of information monitoring system in science: Tasks and functions]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 17(1):124–141.
4. Zatsman, I., and O. Kozhunova. 2008. Evaluating for institutional academic activities: Classification scheme for R&D indicators. *10th Conference (International) on Science and Technology Indicators: Book of Abstracts*. Vienna: ARC GmbH. 428–431.
5. Zatsman, I., and O. Kozhunova. 2009. Evaluation system for the Russian Academy of Sciences: Objectives–resources–results approach and R&D indicators. *Atlanta Conference on Science and Innovation Policy Proceedings*. Eds. S. E. Cozzens and P. Catalan. Atlanta, GA. Available at: <http://smartech.gatech.edu/bitstream/1853/32300/1/104-674-1-PB.pdf> (accessed August 10, 2018).
6. Zatsman, I., and A. Durnovo. 2010. Incompleteness problem of indicators system of research programme. *11th Conference (International) on Science and Technology Indicators: Book of Abstracts*. Leiden: CWTS. 309–311.
7. Arkhipova, M. Yu., I. M. Zatsman, and S. Yu. Shul'ga. 2010. Indikatory patentnoy aktivnosti v sfere informatsionno-kommunikatsionnykh tekhnologij i metodika ikh vychisleniya [Indicators of patent activities in the sphere of information and communication technologies and a technique of their computation]. *Ekonomika, statistika i informatika. Vestnik UMO* [Economics, Statistics, and Informatics. UMO Bull.] 4:93–104.

8. Zatsman, I. M., and A. A. Durnovo. 2011. Modelirovanie protsessov formirovaniya ekspertnykh znaniy dlya monitoringa programmno-tselevoy deyatelnosti [Modeling of processes for creation of expert knowledge for monitoring of goal-oriented programme activities]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 5(4):84–98.
9. Narin, F., and E. Noma. 1985. Is technology becoming science? *Scientometrics* 7(3–6):369–381.
10. Mansfield, E. 1991. Academic research and innovation. *Res. Policy* 20(1):1–12.
11. Schmoch, U. 1993. Tracing the knowledge transfer from science to technology as reflected in patent indicators. *Scientometrics* 26:193–211.
12. Mansfield, E. 1995. Academic research underlying industrial innovations: Sources, characteristics and financing. *Rev. Econ. Statistics* 77(1):55–62.
13. Narin, F., and D. Olivastro. 1998. Linkage between patents and papers: An interim EPO/US comparison. *Scientometrics* 41(1-2):51–59.
14. Mansfield, E. 1998. Academic research and industrial innovation: An update of empirical findings. *Res. Policy* 26(7-8):773–776.
15. Tijssen, R. J. W., R. K. Buter, and Th. N. Van Leeuwen. 2000. Technological relevance of science: An assessment of citation linkages between patents and research papers. *Scientometrics* 47(2):389–412.
16. Van Looy, B., E. Zimmermann, R. Veugelers, A. Verbeek, J. Mello, and K. Debackere. 2003. Do science-technology interactions pay off when developing technology? An exploratory investigation of 10 science-intensive technology domains. *Scientometrics* 57(3):355–367.
17. European Communities. 2003. Third European Report on Science & Technology Indicators. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities. 451 p.
18. Minin, V. A., I. M. Zatsman, M. G. Kruzhkov, and T. P. Norekyan. 2013. Metodologicheskie osnovy sozdaniya informatsionnykh sistem dlya vychisleniya indikatorov tematicheskikh vzaimosvyazey nauki i tekhnologiy [Methodological bases for creating information systems calculating indicators of thematic linkages between science and technologies]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 7(1):70–81.
19. Minin, V. A., I. M. Zatsman, V. A. Khavanskov, and S. K. Shubnikov. 2017. Methods of indicator-based assessment of knowledge transfer from science to technology. *Automatic Documentation Math. Linguistics* 51(4):180–190.
20. Minin, V. A., I. M. Zatsman, V. A. Havanskov, and S. K. Shubnikov. 2017. Make-tirovaniye informatsionnoy sistemy vychisleniya indikatorov perenosa nauchnykh znaniy v sferu tekhnologiy [Prototyping an information system for the calculation of indicators of the intensity of the transfer of scientific knowledge in the field of technology]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 27(3):171–182.
21. Arkhitektonika klassifikatsionnykh indeksov [Architectonics of classification indices]. Available at: [http://www1.fips.ru/wps/wcm/connect/content\\_ru/ru/inform-resources/international\\_classification/inventions/mpk\\_begin/article\\_2](http://www1.fips.ru/wps/wcm/connect/content_ru/ru/inform-resources/international_classification/inventions/mpk_begin/article_2) (accessed August 10, 2018).

Received August 10, 2018

## Contributors

**Minin Vladimir A.** (b. 1941) — Doctor of Science in physics and mathematics, consultant, Institute of Informatics Problems, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilova Str., Moscow 119333, Russian Federation; aleksisss@ya.ru

**Zatsman Igor M.** (b. 1952) — Doctor of Science in technology, Head of Department, Institute of Informatics Problems, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilova Str., Moscow 119333, Russian Federation; izatsman@yandex.ru

**Havanskov Valerij A.** (b. 1950) — scientist, Institute of Informatics Problems, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilova Str., Moscow 119333, Russian Federation; chavanskov@yandex.ru

**Shubnikov Sergej K.** (b. 1955) — senior scientist, Institute of Informatics Problems, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilova Str., Moscow 119333, Russian Federation; sergeysh50@yandex.ru

## ПРОЦЕССЫ ГЕНЕРАЛИЗАЦИИ В АНАЛОГОВОЙ И ЦИФРОВОЙ КАРТОГРАФИИ

Д. А. Никишин<sup>1</sup>

**Аннотация:** Представлен обзор и анализ существующих методов генерализации геоданных, выявлены их специфические особенности. Рассматриваются и сравниваются сущность, определяющие факторы и содержание процессов генерализации пространственных данных в парадигмах аналоговой и цифровой картографии. На этой основе предлагаются описание понятия свойства вариантиности процесса генерализации, которое наряду со свойствами обратимости и альтернативности позиционируется как отправная точка для создания единой методологии обратимой генерализации информационных объектов (ОГИО).

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

**DOI:** 10.14357/08696527180316

### 1 Введение

Данная работа имеет целью формирование подхода к созданию методологии ОГИО в текстовой [1–3] и пространственно-временной [4] формах в информационных системах (ИС). Для случая пространственно-временных объектов ИС приводятся результаты сравнительного анализа сущности и методов генерализации геоданных в парадигмах аналоговой и цифровой картографии и предлагается обобщение этих результатов. Рассматривается свойство *вариантности* процессов генерализации в ИС и предлагаются принципы создания методологии ОГИО, применимой как для пространственных, так и для текстовых данных.

Актуальность создания методологии ОГИО определяется необходимостью разработки моделей информатики и геоинформатики [5, 6], описывающих конкретно-абстрактные и абстрактно-конкретные преобразования данных в ИС на основе единой парадигмы информационных трансформаций полидиического компьютеринга [7].

### 2 Сущность и факторы процессов генерализации

Согласно классической монографии [8], «термин «генерализация» происходит от латинского слова *generalis*... смысловое значение этого термина означает

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

действие, направленное к отысканию и выделению *главного, общего, определяющего...* Основная задача генерализации заключается в том, чтобы из многих предметов и явлений... выявить и отобразить на карте наиболее существенные». Согласно более современному определению из [9], «*картографическая генерализация* — это отбор и обобщение изображаемых на карте объектов соответственно ее *назначению, масштабу, содержанию и особенностям* картографируемой территории... Суть процесса состоит в передаче на карте основных, *тиpических* черт объектов, их *характерных* особенностей и взаимосвязей...»<sup>1</sup>

В контексте этих определений необходимо заметить, что «*существенными*», или «*основными*», в зависимости от стоящих целей и задач могут выступать различные аспекты исходного набора данных, которые выступают *факторами генерализации*. Согласно [8, 9], к числу основных факторов, определяющих и направляющих процесс картографической генерализации, относятся:

- назначение карты;
- масштаб картографического изображения (суть его детальность);
- характерные особенности картографируемой действительности;
- средства картографического изображения;
- источники для составления карты.

*Назначение* создаваемой карты обуславливает ее содержание (в частности, тематику), оформление (тип), масштаб и, следовательно, является ведущим фактором генерализации. От целевого предназначения карты зависит, прежде всего, оценка фактов и явлений, подлежащих картографированию, и выделение из них наиболее важных и существенных для данной карты [8]. Назначение карты дает исходное направление в генерализации, т. е. предопределяет круг явлений, подлежащих отображению на карте, и преобладающую роль одних явлений над другими [10, 11].

В работах [8, 9] рассмотрены факторы аналоговой картографической генерализации. Применительно к цифровым методам их можно скорректировать следующим образом: так, безусловно, *назначение* геоданных сохраняет свою определяющую роль для всего процесса генерализации, в частности *содержание* и *степень их обобщения* (которая соответствует понятию масштаба в аналоговой картографии), а вот *оформление* [9] (или «*средства картографического изображения*» в [8]) перестает быть определяющим фактором. Это обусловлено тем, что в цифровой парадигме данные могут использоваться не столько для

---

<sup>1</sup> В этой же работе далее делается вывод о том, что «...генерализация — одно из проявлений процесса абстрагирования отображаемой на карте действительности. Именно генерализация способствует формированию и воплощению в картографической форме новых понятий и научных абстракций». В терминах информатики как полидисциплинарного компьютеринга процессы генерализации являются конкретно-абстрактными информационными трансформациями, т. е. переходом от конкретных объектов к более абстрактным. В результате подобных переходов могут определяться новые научные понятия и абстрактные информационные объекты.

целей визуализации картографического изображения, сколько для аналитического решения по ним различных расчетных и проектных задач геоинформатики, таких как определение зон видимости, расчет перемещаемых объемов и масс, проектирование сооружений и т. п. Поэтому в контексте генерализующего преобразования данных этот фактор можно сформулировать как *особенности целевого предназначения* генерализированных данных.

Сама же *визуализация геоданных* также приобрела новые возможности — так, аналитическое представление данных в цифровом виде дает возможность отображать одни и те же данные *одновременно на нескольких взаимосвязанных уровнях обобщения и в различных вариантах* оформления (например, в различных системах условных обозначений, тематических аспектах, вариантах компоновки и т. п.).

### 3 Дуализм типичного и особенного

Среди перечисленных выше факторов генерализации присутствует также фактор «характерные особенности картографируемой действительности», который в [9] упоминается как «особенности картографируемой территории». Однако этот фактор не является априорным, так как он может быть оценен и учтен лишь в самом ходе процесса генерализации после предварительного анализа всей совокупности имеющихся исходных данных.

Этот фактор обусловлен тем, что способы и приемы генерализации (включая не только картографическую) обладают характерной чертой, которую можно обозначить как *дуализм типичного и особенного*, изложенную в [8] следующим образом: «...под картографической генерализацией следует понимать процесс выявления и отображения на картах существенных, типичных свойств и характерных особенностей картографируемых предметов и явлений. Типичное и особенное находятся между собой в противоречии, преодоление которого составляет главную трудность генерализации<sup>1</sup>.

Типичное — это общее, что содержится в группе различных предметов или явлений и роднит их между собой. Выделенным, на этом основании, типам местности присущи некоторые общие свойства, закономерно повторяющиеся на данном участке земной поверхности.

Особенное — это то, что выходит за рамки типичного, то, что присуще только отдельным, единичным объектам. Конкретная действительность во всех случаях богаче ее типичных свойств. На местности всегда встречаются такие объекты, которые не являются для нее типичными, но имеют важное военное или народнохозяйственное значение».

---

<sup>1</sup>Характерным примером является учет степени обжитости местности (антропогенный фактор), так, в [8] приводится пример «отдельная постройка на Крайнем Севере — выдающийся ориентир; такое же сооружение в Подмосковье — объект третьестепенного значения» (в то же время можно отметить, что это также важный объект, например для туризма и т. п.).

Важность учета свойства дуализма определяется, например, такой специфической функцией карты, как предоставление сведений об ориентирах на местности, что обосновано в [8] следующим образом: «...чтобы показать на карте типичные свойства местности, необходимо абстрагироваться от частностей, отбросить многие особенности. Однако если эти особенности исключить вовсе, то топографическая карта превратится в абстрактную схему, по которой нельзя будет ориентироваться на местности. Поэтому, выявляя типичные свойства картографируемой действительности, необходимо в то же время отмечать такие детали, которые выходят за пределы типичного, противоречат ему. Таким образом, в выявлении и сочетании типичного и особенного заключается самый смысл картографической генерализации. Более того, выявление и выделение главного, определяющего, типичного, в сочетании с особым, составляет основную задачу не только картографической генерализации, но и любого *научного обобщения в самых различных отраслях знаний*. Научное обобщение, в свою очередь, является частью процесса познания, причем наиболее сложной и ответственной частью, требующей творческого мышления» [8, 10].

Другими словами, в методологии генерализации *типичное* образует основной фон, оно в большей степени поддается формализации на основе механизма цензов, чем *специфичное*, которое накладывается на типичное и степень генерализации которого сильно зависит от свойства *вариантности процесса генерализации*, т. е. от следующих конкретных условий:

- предназначения генерализированного продукта и степени изменения детализации (масштабного перехода);
- соотношения принятых концептуальных схем расчленения ситуации на геообъекты (геонтологии)<sup>1</sup> на исходном и генерализованном уровне;
- характерных особенностей конкретной местности;
- качественных свойств используемых исходных наборов данных: точности, полноты, достоверности и актуальности информации и т. п.

Более того, само соотнесение типичного и особенного представляет собой нетривиальную задачу, решение которой, в свою очередь, зависит от перечисленных факторов, а с другой стороны, оставляет обширное поле для субъективизма.

#### **4 Сопоставление методологий генерализации в аналоговой и в цифровой картографии**

Чтобы раскрыть сущность и особенности процессов генерализации в аналоговой и в цифровой картографии, рассмотрим основные требования и используемые ими методологии.

---

<sup>1</sup> В аналоговой картографии, использовавшей единообразную концептуальную схему описания ситуации для всего ряда топографических карт, этот фактор не был столь явен, как в современных условиях, когда возникли предпосылки для обеспечения совместного (интероперабельного) использования наборов данных, соответствующих различным концептуальным схемам.

*Основными требованиями* к результату генерализации, согласно [9], являются его геометрическая точность и содержательное подобие (правильная передача взаимного положения объектов, их характерных особенностей и соподчиненности). Необходимо отметить, что:

- в общем случае требование точности может быть распространено не только на пространственные, но и на количественные и качественные характеристики;
- требование содержательного подобия следует понимать не только как топологическую связность объектов, но также и как сохранение подобия качественного и количественного состава геообъектов на единицу площади.

Применительно к цифровым технологиям генерализации эти требования очевидно во многом сохраняют свою справедливость, но вместе с тем переход от аналогового представления геоданных к их аналитическому представлению в цифровой картографии обусловил следующие особенности:

- понятию «содержательное подобие» требуется некоторое уточнение — топологическую связность объектов геопространства теперь следует понимать не столько как визуальную, сколько как топологическую связность данных (например, векторно-топологическую модель данных) [10, 12, 13];
- существовавшее в аналоговой картографии противоречие между геометрической точностью и содержательным подобием в цифровой картографии вышло за рамки методологии генерализации, сохранившись лишь в сфере визуализации геоданных.

*Методология генерализации* в общем виде включает в себя совокупность различных операций преобразования исходных данных [5, 8, 9, 11, 12, 14, 15], которые можно обобщить в виде следующих основных преобразований [8, 9]:

- (a) *отбор* из исходного множества объектов тех, которые подлежат переносу в генерализированное множество (образно говоря, на генерализированное изображение), и исключение (фильтрацию) при этом малозначимых объектов; отвлечение от частностей и деталей ради отчетливого изображения главных черт пространственного размещения;
- (б) преобразование объектов, имеющее целью *обобщение* их пространственных характеристик, а также качественных и количественных характеристик, которое реализуется следующими методами:
  - *объединение* (слияние) нескольких малых объектов в один более крупный;
  - *упрощение* пространственных и семантических описаний объектов в рамках текущих концептуальных схем (моделей) объектов, в частности упрощение пространственной структуры (например, преобразование типа метрики «полигон  $\Rightarrow$  линия» или «полигон  $\Rightarrow$  точка»), а также огрубление (округление) точности представления численных и семантических значений и т. п.;

- (в) замена модели пространственного и/или семантического описания одного или нескольких родственных типов геообъектов на новую, более общую модель (более абстрактную сущность) суть обобщение концептуальной схемы описания геопространства, замена индивидуальных понятий собирательными — например, множества объектов типа «карстовая воронка» на объект типа «район распространения карста».

В качестве иллюстрации некоторых методов можно привести представленные на рис. 1 примеры из описания технологии генерализации [16], используемой в одной из современных геоинформационных систем (ГИС), а также из документа [17].

Все эти действия находятся в тесной взаимосвязи, могут применяться последовательно и/или циклически в рамках многоэтапного процесса генерализации на каждом уровне обобщения (т. е. преобразования между смежными уровнями детальности, характеризуемыми разными масштабами), до достижения генерализированным набором данных заданных критериев, соответствующих целям и задачам генерализации, и составляют в совокупности сложный процесс картографической генерализации. Структура этого процесса (последовательность применения методов) и конкретный алгоритм его реализации, задаваемый параметрически, определяются в соответствии с принятой технологической схемой для конкретной задачи генерализации и свойств конкретного набора данных (например, характера местности).

В аналоговой картографии технологию генерализации было трудно formalизовать до уровня алгоритма, а сам процесс выполнялся вручную, поэтому, несмотря на наличие нормативного базиса (документации) по выполнению генерализации, содержал в себе значительную долю субъективизма конкретных исполнителей.

Применительно к цифровой картографии понятие *генерализации карт* трансформировалось в понятие *генерализации пространственных данных* (англ. *spatial data generalization*), которое заключается в «автоматическом или интерактивном обобщении позиционных и атрибутивных данных о пространственных объектах в ГИС с использованием генерализационных операторов» (англ. *generalization operators*), их наборов или последовательностей; при этом лишь часть из этих операторов имеет соответствие в приемах и методах картографической генерализации... Операторы генерализации могут применяться глобально (к слову в целом) или локально — к фрагменту слова, сегменту линии и т. п.; обслуживать чисто графические (позиционные) или структурные преобразования данных» [12].

Цифровые технологии позволяют автоматизировать процесс генерализации, при этом вмешательство пользователя обычно заключается в устранении геометрических, топологических и семантических конфликтов или в минимизации возникающих из-за этого погрешностей.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что методология генерализации в целом сохраняет свою суть и содержание как в аналоговых, так и в цифро-

Операция преобразования	До генерализации	После генерализации
(а) отбор объектов: исключение малоразмерных объектов		
(б) упрощение пространственного описания объекта: уменьшение количества точек		
(в) упрощение объекта: изменение типа локализации объекта (площадной объект превратился в линейный)		
(г) замена модели описания геообъекта (дорожной развязки): замена описания конкретной развязки на обобщенный значок развязки		
(д) замена модели описания геообъекта (железнодорожная станция): замена описания конкретной станции на ее обобщенный значок		

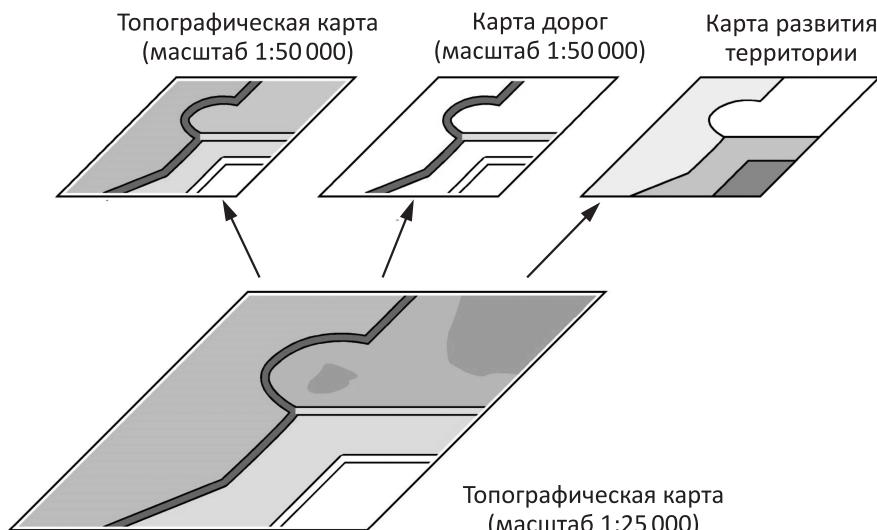
Рис. 1 Примеры применения методов генерализации [16, 17]

вых технологиях, меняются лишь требования и возможности, а также способы реализации этого процесса.

## 5 Свойство вариантности генерализации

Анализируя процессы многоуровневой генерализации, можно выделить и эксплицировать ряд особенностей, которые назовем свойствами *обратимости*, *альтернативности* и *вариантности*. Их эксплицирование в геоинформатике, т. е. описание и анализ этих свойств применительно к генерализации геоданных в рассмотренных работах по картографии и ГИС автору обнаружить не удалось. Поэтому для геоинформатики описание и анализ этих свойств обладает, скорее всего, существенным элементом новизны. В работе [4] показано, что *обратимость* генерализации проявляется в контексте многоуровневой модели данных. Отметим, что применительно к текстовым данным эти свойства уже были предметом рассмотрения [1–3, 18].

Процессы многоуровневой генерализации [4] как информационные трансформации начинаются от исходного уровня первичных геоданных и заканчиваются на верхнем уровне обобщения. При этом каждый уровень обобщения может быть обусловлен различными целями и задачами, в соответствии с которыми определяются различные *варианты* критериев и конкретных методов генерализации именно на этом уровне, что предлагается называть свойством *вариантности* генерализации пространственно-временных данных.



**Рис. 2** Пример вариантности генерализации

Примерами проявления свойства вариантности, которое имплицировано в картографии, могут служить практики создания производных продуктов различной тематической направленности, таких как составление на основе базовой топографической карты (базовой топографической основе) ее гипсометрического и бланкового вариантов (отличавшихся особенностями изображения растительности и рельефа и специальной нагрузкой) [19, 20], специализированной топографической карты шельфа и внутренних водоемов [21], а также создание универсальной и специализированных фотокарт геологического и градостроительного назначения [22].

Здесь необходимо заметить, что, хотя в этих случаях речь идет о создании вариантов картографических продуктов иногда и без изменения масштаба, в общем случае сама процедура пересоставления с целью изменения содержания карты включает в себя те же методы генерализации: исключение ненужных элементов содержания, снижение информационной нагрузки, изменение способа (модели) представления данных, т. е. по своей сути представляет собой генерализацию, обладающую свойством вариантности. Пример вариантности генерализации пространственных данных показан на рис. 2.

## 6 Заключение

Представленный в работе анализ сущности и содержания процессов генерализации в аналоговой и цифровой картографии позволяет эксплицировать свойства обратимости и вариантности, необходимые для создания методологии ОГИО в геоинформатике и ее позиционирования как частного случая общей методологии генерализации информационных объектов [3]. В таком контексте генерализация и спецификация рассматриваются соответственно как многоуровневые конкретно-абстрактные и абстрактно-конкретные преобразования данных. При этом даже при решении одной задачи могут использоваться различные критерии генерализации, что и порождает множество *вариантов* обобщения. Использование же множества разнородных источников в общем контексте генерализации обусловливает принцип *альтернативности* генерализации, который предполагается рассмотреть в последующих публикациях.

При создании методологии ОГИО в рамках геоинформатики предполагается, что этот процесс касается не только преобразования данных каждого отдельно взятого объекта, но он должен рассматриваться в контексте преобразования всей топологической структуры геопространства. При этом в рамках методологии ОГИО преодоление рассмотренных противоречий между типичным и особым может быть осуществлено, по-видимому, с использованием свойств *многоуровневости* и *вариантности* генерализации пространственно-временных данных в ГИС.

Анализ процессов генерализации и спецификации дает возможность обобщить уже используемые в ГИС методы конкретно-абстрактных и абстрактно-конкретных преобразований в рамках концептуально единой парадигмы информаци-

онных трансформаций и эксплицировать свойства обратимости и вариантности в методологии ОГИО.

## Литература

1. Зацман И. М., Мамонова О. С., Щурова А. Ю. Обратимость и альтернативность генерализации моделей перевода коннекторов в параллельных текстах // Системы и средства информатики, 2017. Т. 27. № 2. С. 125–142.
2. Зацман И. М., Кружков М. Г., Лощилова Е. Ю. Методы анализа частотности моделей перевода коннекторов и обратимость генерализации статистических данных // Системы и средства информатики, 2017. Т. 27. № 4. С. 164–176.
3. Зацман И. М. Методология обратимой генерализации в контексте классификации информационных трансформаций // Системы и средства информатики, 2018. Т. 28. № 2. С. 128–144.
4. Никишин Д. А. Сопоставление особенностей представления геоданных в картографии и геоинформатике // Системы и средства информатики, 2018. Т. 28. № 2. С. 60–74.
5. Taillandier P., Duchêne C., Drogoul A. Knowledge revision in systems based on an informed tree search strategy: Application to cartographic generalisation // 5th Conference (International) on Soft Computing as Transdisciplinary Science and Technology Proceedings. — New York, NY, USA: ACM, 2008. Р. 273–278.
6. Beard K. A semantic web based gazetteer model for VGI // 1st ACM SIGSPATIAL Workshop (International) on Crowdsourced and Volunteered Geographic Information Proceedings. — New York, NY, USA: ACM, 2012. Р. 54–61.
7. Rosenbloom P. S. On computing: The fourth great scientific domain. — Cambridge, MA, USA: MIT Press, 2013. 307 р.
8. Комков А. М., Николаев С. А., Шилов Н. И. Составление и редактирование карт. — М.: ВИА, 1958. 248 с.
9. Берлянт А. М. Картография. — М.: Аспект Пресс, 2002. 336 с.
10. Dogru A., Ulugtekin N. Junction modeling in vehicle navigation maps and multiple representations // Congress of ISPRS Proceedings, 2004. Vol. 35. Part B4. Р. 244–248.
11. Журкин И. Г., Шайтура С. В. Геоинформационные системы. — М.: КУДИЦ-Пресс, 2009. 272 с.
12. Баранов Ю. Б., Берлянт А. М., Капралов Е. Г., Кошкаджев А. В., Сераничес Б. Б., Филиппов Ю. А. Геоинформатика: Толковый словарь основных терминов. — М.: ГИС-Ассоциация, 1999. 204 с.
13. Chimani M., van Dijk T. C., Haunert J.-H. How to eat a graph: Computing selection sequences for the continuous generalization of road networks // 22nd ACM SIGSPATIAL Conference (International) on Advances in Geographic Information Systems Proceedings. — New York, NY, USA: ACM, 2014. Р. 243–252.
14. Davis C. A., Laender A. H. F. Multiple representations in GIS: Materialization through map generalization, geometric, and spatial analysis operations // 7th ACM Symposium (International) on Advances in Geographic Information Systems Proceedings. — New York, NY, USA: ACM, 1999. Р. 60–65.

15. Ware M. J., Wilson I. D., Ware J. A., Jones C. B. A tabu search approach to automated map generalisation // 10th ACM Symposium (International) on Advances in Geographic Information Systems Proceedings. — New York, NY, USA: ACM, 2002. P. 101–106.
16. Технология автоматизированной генерализации ГИС «Панорама». <https://gisinfo.ru/projects/19.htm>.
17. Условные знаки топографических карт масштабов 1:25 000, 1:50 000, 1:100 000. — М.: РИО ВТС, 1983. 90 с.
18. Codd E. F. Extending the database relational model to capture more meaning // ACM T. Database Syst., 1979. Vol. 4. Iss. 4. P. 395–434.
19. ГКИНП 05-053-79. Руководство по картографическим и картоиздательским работам. Часть 2. Составление и подготовка к изданию топографических карт масштабов 1:200 000, 1:500 000. — М.: РИО ВТС, 1980. 218 с.
20. ГКИНП 05-052-85. Руководство по картографическим и картоиздательским работам. Часть 3. Составление и подготовка к изданию топографической карты масштаба 1:1 000 000. — М.: РИО ВТС, 1985. 112 с.
21. ГКИНП 11-157-88. Руководство по топографической съемке шельфа и внутренних водоемов. — М.: ЦНИИГАиК, 1989. 280 с.
22. ГКИНП 43. Руководство по созданию топографических фотокарт. — М.: ЦНИИГАиК, 1974. 42 с.

*Поступила в редакцию 02.07.18*

---

## **PROCESSES OF GENERALIZATION IN ANALOG AND DIGITAL CARTOGRAPHY**

*D. A. Nikishin*

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

**Abstract:** The review and analysis of existing methods of geodata generalization are presented and their specific features are revealed. The essence, determining factors, and content of the processes of spatial data generalization in the paradigms of analog and digital cartography are considered and compared. On this basis, the description of the concept of the property of variability of the generalization process is proposed, which, along with the properties of reversibility and alternative, is positioned as a starting point for creation of a unified methodology for reversible generalization of information objects.

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

**DOI:** 10.14357/08696527180316

## References

1. Zatsman, I. M., O. S. Mamonova, and A. Yu. Shchurova. 2017. Obratimost' i al'ternativnost' generalizatsii modeley perevoda konnektorov v parallel'nykh tekstakh [Reversibility and alternativeness of generalization of connectives translations models in parallel texts]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 27(2):125–142.
2. Zatsman, I. M., M. G. Kruzhkov, and E. Yu. Loshchilova. 2017. Metody analiza chastotnosti modeley perevoda konnektorov i obratimost' generalizatsii statisticheskikh dannykh [Methods of frequency analysis of connectives translations and reversibility of statistical data generalization]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 27(4):164–176.
3. Zatsman, I. M. 2018. Metodologiya obratimoy generalizatsii v kontekste klassifikatsii informatsionnykh transformatsiy [Methodology of reversible generalization in the context of classification of information transformations]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 28(2):128–144.
4. Nikishin, D. A. 2018. Sopostavlenie osobennostey predstavleniya geodannyykh v kartografii i geoinformatike [Comparison of characteristics of the representation of geodata in cartography and geoinformatics]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 28(2):60–74.
5. Taillandier, P., C. Duchêne, and A. Drogoul. 2008. Knowledge revision in systems based on an informed tree search strategy: Application to cartographic generalisation. *5th Conference International) on Soft Computing as Transdisciplinary Science and Technology Proceedings*. New York, NY: ACM. 273–278.
6. Beard, K. 2012. A semantic web based gazetteer model for VGI. *1st ACM SIGSPATIAL Workshop (International) on Crowdsourced and Volunteered Geographic Information Proceedings*. New York, NY: ACM. 54–61.
7. Rosenbloom, P. S. 2013. *On computing: The fourth great scientific domain*. Cambridge, MA: MIT Press. 307 p.
8. Komkov, A. M., S. A. Nikolaev, and N. I. Shilov. 1958. *Sostavlenie i redaktirovanie kart* [Drafting and editing maps]. Moscow: VIA. 248 p.
9. Berlyant, A. M. 2002. *Kartografiya* [Cartography]. Moscow: Aspect Press. 336 p.
10. Dogru, A. and N. Ulugtekin. 2004. Junction modeling in vehicle navigation maps and multiple representations. *Congress of ISPRS Proceedings* 35(B4):244–248.
11. Zhurkin, I. G., and S. V. Shaytura. 2009. *Geoinformatsionnye sistemy* [Geoinformation systems]. Moscow: Kudits Press. 272 p.
12. Baranov, Yu. B., A. M. Berlyant, E. G. Kapralov, A. V. Koshkarev, B. B. Serapinas, and Yu. A. Filippov. 1999. Geoinformatika. *Tolkovyj slovar' osnovnykh terminov* [Geoinformatics. Explanatory dictionary of basic terms]. Moscow: GIS-Association. 204 p.
13. Chimani, M., T. C. van Dijk, and J.-H. Haunert. 2014. How to eat a graph: Computing selection sequences for the continuous generalization of road networks. *22nd ACM SIGSPATIAL Conference (International) on Advances in Geographic Information Systems Proceedings*. New York, NY: ACM. 243–252.
14. Davis, C. A., and A. H. F. Laender. 1999. Multiple representations in GIS: Materialization through map generalization, geometric, and spatial analysis operations. *7th*

- ACM Symposium (International) on Advances in Geographic Information Systems Proceedings.* New York, NY: ACM. 60–65.
15. Ware, M. J., I. D. Wilson, J. A. Ware, and C. B. Jones. 2002. A tabu search approach to automated map generalisation. *10th ACM Symposium (International) on Advances in Geographic Information Systems Proceedings.* New York, NY: ACM. 101– 106.
  16. *Tekhnologiya avtomatizirovannoy generalizatsii GIS “Panorama”* [Technology of automated generalization of GIS “Panorama”]. 2018. Available at: <https://gisinfo.ru/projects/19.htm> (accessed June 27, 2018).
  17. *Uslovnye znaki topograficheskikh kart masshtabov 1:25 000, 1:50 000, 1:100 000* [Conventional signs of topographic maps of scales 1:25 000, 1:50 000, and 1:100 000]. 1983. Moscow: RIO VTS. 90 p.
  18. Codd, E. F. 1979. Extending the database relational model to capture more meaning. *ACM T. Database Syst.* 4(4):395–434.
  19. GKINP 05-053-79. 1980. *Rukovodstvo po kartograficheskim i kartoizdatel'skim rabotam. Chast' 2. Sostavlenie i podgotovka k izdaniyu topograficheskikh kart masshtabov 1:200 000, 1:500 000* [Guide to map making and printing works. Part 2. Preparation and publication of topographic maps of scales 1:200 000 and 1:500 000]. Moscow: RIO VTS. 218 p.
  20. GKINP 05-052-85. 1985. *Rukovodstvo po kartograficheskim i kartoizdatel'skim rabotam. Chast' 3. Sostavlenie i podgotovka k izdaniyu topograficheskoy karty masshtaba 1:1000 000* [Guide to map making and printing works. Part 3. Preparation and publication of topographic map of scale 1:1 000 000]. Moscow: RIO VTS. 112 p.
  21. GKINP 11-157-88. 1989. *Rukovodstvo po topograficheskoy s'emeke shel'fa i vnutrennikh vodoemov* [Guidelines for topographic survey of the shelf and inland waters]. Moscow: TsNIIGAiK. 280 p.
  22. GKINP 43. 1974. *Rukovodstvo po sozdaniyu topograficheskikh fotokart* [Guide to the creation of topographic maps]. — Moscow: TsNIIGAiK. 42 p.

*Received July 2, 2018*

## **Contributor**

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

## ЛИНЕЙНОЕ УПОРЯДОЧЕНИЕ МНОЖЕСТВА ПРАВИЛ В СИСТЕМЕ ИЗВЛЕЧЕНИЯ БИОГРАФИЧЕСКИХ ФАКТОВ Т-ПАРСЕР

*И. М. Адамович<sup>1</sup>, О. И. Волков<sup>2</sup>*

**Аннотация:** Статья посвящена дальнейшему развитию системы автоматического извлечения фактов из текстов историко-биографической направленности Т-парсер — составной части технологии автоматизации историко-биографического исследования. Анализируются недостатки существующей реализации системы, описывается и обосновывается способ их исправления посредством исключения циклов из грамматики и ее линейного упорядочения. Приводится описание обновленного алгоритма парсинга и экспериментальной проверки его эффективности по сравнению с предыдущей версией, осуществленной на реальных текстах историко-биографической направленности. Приводятся результаты экспериментов, подтверждающие высокую эффективность обновленного алгоритма и его применимость в технологии автоматизации историко-биографического исследования, предназначенный для широкого круга не являющихся профессиональными историками и биографами пользователей, что актуально в связи со все увеличивающимся общественным интересом к семейной истории. Намечаются пути дальнейшей модификации алгоритма с целью дополнительного повышения эффективности выделения фактов.

**Ключевые слова:** извлечение фактов из текстов; GLR-алгоритм; псевдопорядок; линейное упорядочение; исключение циклов

**DOI:** 10.14357/08696527180317

### 1 Введение

В статье [1] описана технология автоматизации историко-биографического исследования. Важной составной частью данной технологии является система автоматического извлечения фактов из текстов историко-биографической направленности Т-парсер [2]. Несмотря на то что на данный момент существуют весьма развитые программные средства, предназначенные для решения задач автоматической обработки текстов и семантического анализа их смыслового содержания, примером чего может служить программно-лингвистическая платформа MetaFraz, созданная на базе оригинальных алгоритмов, разработанных научным коллективом сотрудников Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук (ФИЦ ИУ РАН) и компании

<sup>1</sup> Институт проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук, Adam@amsd.com

<sup>2</sup> Институт проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук, Volkov@amsd.com

«МетаФраз» [3], специфика историко-биографического исследования [4] потребовала создания оригинального средства извлечения биографических фактов из текстов на естественном языке (ЕЯ). Система Т-парсер была построена на базе основных принципов GLR-алгоритма [5], созданного еще в 1984 г. японским ученым Масару Томита для задач анализа текстов ЕЯ. Примером успешной реализации алгоритма GLR-парсинга является Томита-парсер [6], созданный компанией Яндекс. Идеологически рассматриваемая в данной статье система Т-парсер является ее аналогом, но в ней реализован ряд принципиально новых возможностей, позволяющих использовать ее в технологии поддержки историко-биографических исследований, таких как наличие средств разрешения анафорических связей, когда интерпретация некоторого выражения зависит от другого выражения, ранее встречавшегося в тексте, а также поддержка древовидной структуры биографического факта [7].

Т-парсер продемонстрировал высокую эффективность выделения фактов: f-мера [8] на тестовых примерах составила от 80% до 84% [2], что превосходит результаты Томита-парсера — 78,13% [9], при приемлемой скорости обработки текста.

Многообразие изучаемых аспектов жизни индивидуума, стоящего в центре историко-биографического исследования, приводит к огромному числу направлений поиска интересующей биографа информации. Следовательно, число источников, изученных в рамках даже одного исследования, весьма велико. А из многообразия источников и изучаемых аспектов вытекает необходимость объединения усилий исследователей как в создании правил, так и в обмене текстами и результатами извлечения фактов. Поэтому технология автоматизации историко-биографического исследования [1] ориентирована на многопользовательский распределенный режим работы с Т-парсером, что предусматривает одновременное независимое создание правил выделения фактов множеством не связанных между собой исследователей.

## 2 Недостатки системы Т-парсер

Тестирование Т-парсера выявило следующие недостатки.

1. GLR-алгоритм, лежащий в основе Т-парсера, некорректно обрабатывает входные цепочки, грамматика которых содержит вырожденную правую рекурсию [10]. Соответственно, и Т-парсеру присуща аналогичная проблема, а именно: возможность некорректной обработки пула правил (грамматики) при наличии в нем циклических ссылок.
2. Скорость обработки текста у Т-парсера на реалистичном по объему пуле правил (более тысячи), хоть и является приемлемой (обработка одной реальной автобиографической книги занимает от 1 до 5 ч), но не является комфортной для исследователя при проведении реального исследования, требующего обработки большого числа текстов. Данный факт объясняется

тем, что правила извлечения образуют сложный граф с неизвестными заранее взаимозависимостями и на каждом шаге парсинга Т-парсеру приходится проверять применимость всего пула правил.

3. В Т-парсере не удалось реализовать в полной мере концепцию одновременного независимого создания правил выделения фактов множеством не связанных между собой исследователей. Специфика выбора оптимального правила [2] (максимально широкое покрытие предложения) и неоднозначность ЕЯ могут привести к ситуации, когда распознавание пойдет по неверной цепочке. GLR-алгоритм предусматривает разветвление цепочек разбора с целью отбрасывания ошибочных на последующих этапах [11], но это приводит к значительному увеличению времени разбора, что на больших объемах текста, к которым относятся историко-биографические тексты, недопустимо. Поэтому был введен механизм «заглушек» и приоритетов. Под «заглушками» следует понимать поднаборы правил (далее — З-правила), не порождающих факты, но служащих для преобразования позиций предложения, которые могут быть при дальнейшем разборе неверно интерпретированы правилами, служащими для выделения фактов (далее — Ф-правила). Для этого З-правила должны выполняться до Ф-правил. С этой целью был введен механизм назначения правилам приоритетов выполнения. Но назначение приоритетов требует единого проектирования всей грамматики, что противоречит концепции одновременного независимого создания правил выделения фактов множеством не связанных между собой исследователей, т. е. концепции распределенности технологии автоматизации историко-биографического исследования.

### 3 Псевдопорядок на множества правил

Для решения этих проблем было принято решение опереться на естественный порядок выполнения правил, что требует создания алгоритма линейного упорядочения множества всех правил, которое будем обозначать как  $P$ . Широко известна проблема линейного упорядочения частично упорядоченных множеств (Linear Ordering Problem) [12]. Введем отношение псевдопорядка для элементов  $P$ : отношения  $\preceq$  — «меньше или равно»;  $\prec$  — «меньше»;  $\asymp$  — «равно».

Пусть  $F_i \in P$ . Тогда задана запись правила в форме  $Y = F_i(X_1, \dots, X_{n_i})$ , где  $Y$  — имя правила  $F_i$ , а  $X_j$  — также имена некоторых правил [2]. Для имени правила введем обозначение  $Y = N(F_i)$ . Совокупность всех правил с именем  $Y$  обозначим как  $P_Y$ . Совокупность всех имен всех правил из  $P$  обозначим как  $N_P$ .

Сначала введем отношение псевдопорядка для  $N_P$ .

Будем говорить, что

- (1)  $\forall Y_1, Y_2 \in N_P : Y_1 \prec Y_2 \Leftrightarrow \begin{cases} \exists F \in P : Y_2 = F(\dots, Y_1, \dots), \\ \exists Y_3 \in N_P : Y_1 \prec Y_3 \vee Y_3 \prec Y_2; \end{cases}$
- (2)  $\forall Y \in N_P : Y \asymp Y;$

(3)  $\forall Y \in N_P : Y \preceq Y \Leftrightarrow \exists F \in P : Y = F(\dots, Y, \dots)$ .

Теперь введем отношение псевдопорядка для  $P$ :

- (1)  $\forall F_1, F_2 \in P : F_1 \prec F_2 \Leftrightarrow N(F_1) \prec N(F_2)$ ;
- (2)  $\forall F_1, F_2 \in P : F_1 \preceq F_2 \Leftrightarrow N(F_1) \preceq N(F_2)$ ;
- (3)  $\forall F_1, F_2 \in P : F_1 \asymp F_2 \Leftrightarrow N(F_1) \asymp N(F_2)$ .

Введенное таким образом отношение псевдопорядка не является отношением порядка, поскольку не выполняется условие антисимметричности [13]:

$$\forall F_1, F_2 \in P : (F_1 \preceq F_2) \wedge (F_2 \preceq F_1) \Rightarrow F_2 = F_1.$$

В  $P$  могут существовать правила  $F_1$  и  $F_2$ , для которых одновременно выполняются условия  $F_1 \prec F_2$  и  $F_2 \prec F_1$ . Для превращения этого отношения в отношение порядка требуется наложить дополнительные условия на  $P$ , а именно: запретить циклические ссылки в правилах с размером цикла более 1. Это означает, что в  $P$  разрешены ситуации  $\exists F \in P : F \preceq F$ , но запрещены ситуации  $\exists F_1, F_2 \in P, F_1 \neq F_2 : F_1 \prec F_2 \wedge F_2 \prec F_1$ . Для реализации этого запрета необходимы:

- алгоритм выявления длинных (состоящих из более чем одного элемента) циклов;
- процедура «разрыва» выявленных циклов.

Алгоритм выявления длинных циклов строится на том факте, что циклу в  $P$  соответствует цикл в  $N_P$ . Будем говорить, что  $Y_1$  и  $Y_2$  ( $Y_1, Y_2 \in N_P$ ) связаны направленной связью  $\overrightarrow{A}_{Y_2}^{Y_1}$ , если  $\exists F \in P : Y_1 = F(\dots, Y_2, \dots)$ . Из множества связей исключаем короткие циклы, т. е. связи типа  $\overrightarrow{A}_{Y_i}^{Y_i}$ . Затем последовательно исключаем терминальные связи, т. е. связи  $\overrightarrow{A}_{Y_j}^{Y_i}$  ( $i \neq j$ ):  $\forall k (k \neq i, k \neq j)$   $\exists A_{Y_k}^{Y_i} \vee \exists A_{Y_j}^{Y_k}$ . Если после какого-то шага множество не пусто, но терминальных связей уже не содержит, то оставшиеся связи представляют собой исключительно совокупность длинных циклов.

По понятным причинам процедура «разрыва» выявленных циклов не может быть автоматизирована и выполняется пользователем. Опыт показывает, что поскольку Т-парсер построен на идеологии восходящего анализатора, строящего дерево разбора вверх, начиная с листьев, множество правил должно создаваться на принципах каскадности. Следовательно, наличие в нем больших циклов, как правило, означает наличие структурной ошибки, допущенной пользователем. После выполнения процедуры выявления циклов данная ошибка может быть легко исправлена за счет переименования одного из правил.

С данными ограничениями  $P$  превращается в частично упорядоченное множество и может быть линейно упорядочено [12].

## 4 Линейное упорядочение множества правил

После выполнения процедуры ликвидации длинных циклов множество  $N_P$  и множество направленных связей  $\{\vec{A}\}$  могут быть представлены в форме направленного ациклического графа (с разрешенными короткими циклами)  $G := (N_P, \{\vec{A}\})$ . На рисунке приведен пример такого представления для реальной грамматики, представляющей собой два независимых именованных набора правил.

Упорядочение  $P$  осуществляется посредством присвоения уровней вершинам  $G$ . Для этого вводится понятие статуса вершины. Вершины, не имеющие входящих связей (дуг графа), будем называть корневыми. Корневым вершинам, соответствующим З-правилам, присвоим статус « $Z$ ». Будем называть их  $Z$ -вершинами. Всем вершинам, лежащим ниже  $Z$ -вершин (т. е. к которым существует маршрут от  $Z$ -вершины), присвоим статус « $z$ ». Будем называть их  $z$ -вершинами. Для оставшихся вершин  $G$  аналогично определим статусы « $F$ » и « $f$ »:  $F$ -вершины — корневые вершины, порождающие факты, а  $f$ -вершины — вершины, лежащие ниже  $F$ -вершин и не являющиеся  $z$ -вершинами. Всем вершинам, имеющим связь с собой (короткий цикл), дополнительно присвоим статус « $c$ ».

Присвоение уровней осуществляется циклически в два этапа: первый этап для  $Z$ - и  $z$ -вершин; второй этап для  $F$ - и  $f$ -вершин. Начальный уровень для этапов: 0 — для первого этапа и максимальный уровень первого этапа плюс один — для второго этапа. На каждом шаге цикла уровень устанавливается для самых нижних вершин, уровень которым еще не присвоен. Значение уровня — начальный уровень для первого шага цикла и уровень предыдущего шага плюс один для последующих шагов. Таким образом:

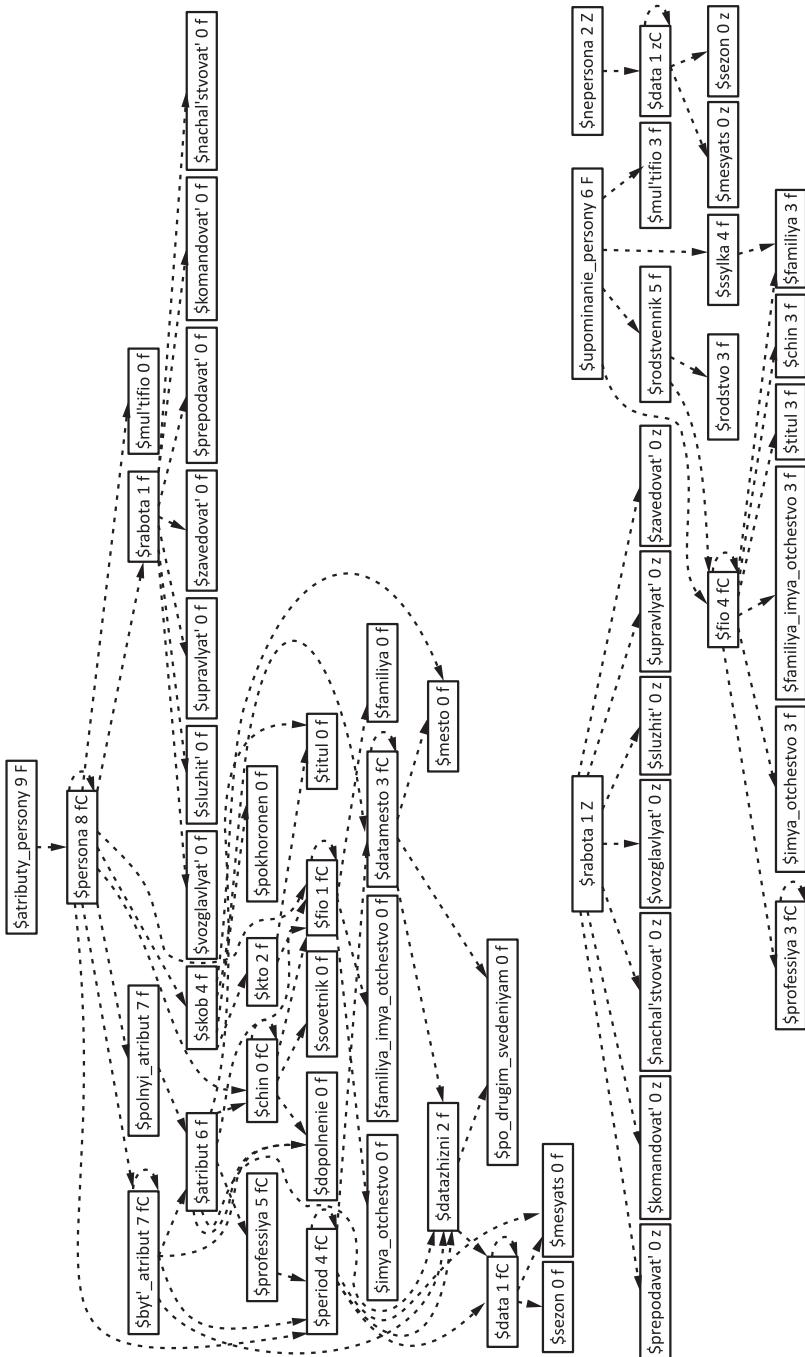
- уровень вершин, расположенных в графе ближе к корневой вершине, превышает уровень вершин, расположенных ниже;
- уровень любой  $F$ - или  $f$ -вершины выше уровня любой  $Z$ - или  $z$ -вершины.

На рисунке приведены статусы и уровни для узлов графа. Уровень вершины  $Y$  обозначим как  $L_Y$ , статус вершины  $Y$  обозначим как  $S_Y$ . После назначения вершинам  $G$  (именам правил) уровней и статусов вводится следующий порядок  $\varphi$  на множестве  $P$ :

$$\varphi := \begin{cases} L_{N(F_i)} < L_{N(F_j)} \Rightarrow \varphi(F_i) < \varphi(F_j), \\ L_{N(F_i)} = L_{N(F_j)} \wedge i < j \Rightarrow \varphi(F_i) < \varphi(F_j). \end{cases}$$

Если ранее на каждом шаге цикла парсинга применялись все правила с приоритетом не ниже текущего [2], то теперь в соответствии с порядком  $\varphi$  алгоритм применения правил модифицируется следующим образом:

- пользовательские приоритеты правил более не учитываются;
- на каждом четном шаге цикла (шаге с номером  $2i$ ) применяются все правила, имя которых имеет уровень  $i$ , т. е.  $\{F : L_{N(F)} = i\}$ ;



Пример представления структуры правил в форме графа

- на каждом нечетном шаге цикла (шаге с номером  $2i + 1$ ) применяются все правила, имя которых имеет уровень  $i$  и статус соответствует коротким циклам, т. е.  $\{F : L_{N(F)} = i \wedge 'c' \in S_{N(F)}\}$ .

## 5 Проверка эффективности алгоритма

Проверка модифицированного алгоритма была проведена на той же грамматике и на тех же текстах историко-биографической направленности, на которых тестиировалась предыдущая версия Т-парсера: воспоминания Н. Е. Врангеля (текст № 1) и воспоминания С. Ю. Витте (текст № 2) [2]. Результаты проверки:

- показатели качества распознавания (полнота, точность и  $f$ -мера [8]) не изменились;  $F$ -мера составила 80% для текста № 1 и 84% для текста № 2;
- время обработки текста значительно уменьшилось — в 1,8 раза для текста № 1 и в 1,47 раза для текста № 2.

При проведении процедуры присвоения статусов вершинам графа  $G:=(N_P, \{\vec{A}\})$  была выявлена потребность в механизме явного указания типа для З-правил. На данный момент корневые З-правила определяются системой как правила, не порождающие фактов и не имеющие входящих связей типа  $\vec{A}$ . Но реальная грамматика расширяется и модифицируется пользователями динамически, и в ней в каждый конкретный момент времени могут существовать заготовки для цепочек правил, предназначенных для выделения каких-то новых сущностей. Корневые (порождающие факты) правила этих цепочек могут быть еще не внесены в грамматику, и, следовательно, данные заготовки могут быть ошибочно приняты за З-правила, что, в свою очередь, исказит нормальный порядок выполнения правил.

## 6 Выводы

Проверка показала, что предложенная модификация алгоритма устранила выявленные недостатки системы и после внедрения в него механизма явного указания типа для З-правил система Т-парсер может быть беспрепятственно использована в технологии автоматизации историко-биографического исследования, предусматривающей одновременное независимое создание правил выделения фактов множеством не связанных между собой исследователей.

Значительное увеличение скорости обработки текстов также делает целесообразной дальнейшую модификацию алгоритма с целью внедрить в него механизм разветвления цепочек разбора и их параллельную обработку при возникновении неоднозначности с целью отбрасывания ошибочных цепочек на последующих этапах, что, в свою очередь, может дополнительно повысить эффективность выделения фактов.

## Литература

1. Адамович И. М., Волков О. И. Технология распределенного автоматизированного анализа исторических текстов // Системы и средства информатики, 2016. Т. 26. № 3. С. 148–161. doi: 10.14357/08696527160311.
2. Адамович И. М., Волков О. И. Система извлечения биографических фактов из текстов исторической направленности // Системы и средства информатики, 2015. Т. 25. № 3. С. 235–250. doi: 10.14357/08696527150315.
3. Будзко В. И., Калинин Ю. П., Козеренко Е. Б., Хорошилов Ал-др А., Хорошилов Ал-ей А. Машина грамматика русского языка // Системы высокой доступности, 2017. Т. 13. № 3. С. 19–33.
4. Адамович И. М., Волков О. И. Средства поддержки интернет-поиска при проведении биографических исследований // Системы и средства информатики, 2014. Т. 24. № 2. С. 178–192. doi: 10.14357/08696527140212.
5. Погорелов Д. А., Таразанов А. М., Волкова Л. Л. От LR к GLR: обзор синтаксических анализаторов // Новые информационные технологии в автоматизированных системах, 2017. № 20. С. 245–250.
6. Артемов М. А., Владимиров А. Н., Селезнев К. Е. Обзор систем анализа естественного текста на русском языке // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии, 2013. № 2. С. 189–194.
7. Адамович И. М., Волков О. И. Иерархическая форма представления биографического факта // Системы и средства информатики, 2016. Т. 26. № 2. С. 108–122. doi: 10.14357/08696527160207.
8. Агеев М. С., Кураленок И. Е., Некрестьянов И. С. Официальные метрики РОМИП'2010 // Российский семинар по оценке методов информационного поиска: Труды РОМИП'2010. — Казань, 2010. С. 172–187.
9. Рубайло А. В., Косенко М. Ю. Программные средства извлечения информации из текстов на естественном языке // Алманах современной науки и образования, 2016. № 12(114). С. 87–92.
10. Лапшин В. А. Обзор эволюции алгоритмов Эрли и LR( $k$ )-анализаторов // НТИ. Серия 2: Информационные процессы и системы, 2005. № 8. С. 6–18.
11. Пентус А. Е., Пентус М. Р. Математическая теория формальных языков. — М.: Интернет-университет информационных технологий; БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006. 247 с.
12. Новиков О. И., Титов Н. Г., Титов Г. Н. О нумерациях конечных частично упорядоченных множеств // Научный журнал КубГАУ, 2016. № 118(04). <http://ej.kubagro.ru/2016/04/pdf/06.pdf>.
13. Колмогоров А. Н., Фомин С. В. Элементы теории функций и функционального анализа. — 7-е изд. — М.: Физматлит, 2004. 572 с.

*Поступила в редакцию 27.03.18*

## LINEAR ORDERING OF THE RULES SET IN THE T-PARSER SYSTEM OF FACTS EXTRACTION

*I. M. Adamovich and O. I. Volkov*

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

**Abstract:** The article focuses on further development of T-parser, a system of automatic extraction of facts from historical texts, which is a component of the technology of historical and biographical research automation. The article analyses the defects of the current implementation, describes and substantiates the methods of their correction by excluding cycles from the grammar and its linear ordering. The description of the updated parsing algorithm and experimental verification of its effectiveness in comparison with the previous version carried out with real historical texts are adduced. The results of experiments which confirm the high efficiency of the updated algorithm and its applicability to the technology of historical and biographical research automation are described. The technology is intended for a broad range of nonprofessional users, which is topical as the public interest to family history is increasing. The ways of further modification of the algorithm with the purpose of increasing facts extraction efficiency are outlined.

**Keywords:** facts extraction from texts; GLR-algorithm; pseudoorder; linear ordering; excluding cycles

**DOI:** 10.14357/08696527180317

### References

1. Adamovich, I. M., and O. I. Volkov. 2016. Tekhnologiya raspredelennogo avtomatizirovannogo analiza istoricheskikh tekstov [The distributed automated technology of historical texts analysis]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 3(26):148–161. doi: 10.14357/08696527160311.
2. Adamovich, I. M., and O. I. Volkov. 2015. Sistema izvlecheniya biograficheskikh faktov iz tekstov istoricheskoy napravленности [The system of facts extraction from historical texts]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 2(25):235–250. doi: 10.14357/08696527150315.
3. Budzko V. I., Yu. P. Kalinin, E. B. Kozerenko, A. A. Khoroshilov, and A. A. Khoroshilov. 2017. Mashinnaya grammatika russkogo yazyka [Machine grammar of the Russian language]. *Sistemy vysokoy dostupnosti* [Highly Available Systems] 3(13):19–33.
4. Adamovich, I. M., and O. I. Volkov. 2014. Sredstva podderzhki internet-poiska pri provedenii biograficheskikh issledovanii [The technology of Internet search as a part of biographic investigation]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 2(24):178–192. doi: 10.14357/08696527140212.
5. Pogorelov, D. A., A. M. Tarzanov, and L. L. Volkova. 2017. Ot LR k GLR: obzor sintaksicheskikh analizatorov [From LR to GLR: Overview of parsers]. *Novye informatsionnye tekhnologii* 1(1):10–18. doi: 10.14357/08696527170101.

- tsionnye tekhnologii v avtomatizirovannykh sistemakh* [New Information Technologies in Automated Systems] 20:245–250.
6. Artemov, M. A., A. N. Vladimirov, and K. E. Seleznyov. 2013. Obzor sistem analiza estestvennogo teksta na russkom yazyke [Review on natural language analysis systems for Russian language]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Sistemnyy analiz i informatsionnye tekhnologii* [Proceedings of Voronezh State University. Ser. Systems Analysis and Information Technologies] 2:189–194.
  7. Adamovich, I. M., and O. I. Volkov. 2016. Ierarkhicheskaya forma predstavleniya biograficheskogo fakta [Hierarchical format of biographical fact]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 2(26):108–122. doi: 10.14357/08696527160207.
  8. Ageev, M. S., I. E. Kuralenok, and I. S. Nekrest'yanov. 2010. Ofitsial'nye metriki ROMIP 2010 [ROMIP'2010 official metrics]. *Rossiyskiy seminar po otsenke metodov informatsionnogo poiska. Trudy ROMIP'2010* [ROMIP: Russian Information Retrieval Evaluation Seminar Proceedings]. Kazan: Kazan University Publs. 172–187.
  9. Rubailo, A. V., and M. Y. Kosenko. 2016. Programmnye sredstva izvlecheniya informatsii iz tekstov na estestvennom yazyke [Software tools for information extraction from natural-language texts]. *Al'manakh sovremennoy nauki i obrazovaniya* [Almanac of Modern Science and Education] 12(114):87–92.
  10. Lapshin, V. A. 2005. Obzor evolyutsii algoritmov Erli i LR( $k$ )-analizatorov [Overview of Earley algorithms and LR( $k$ ) parsers evolution]. *Automatic Documentation Math. Linguistics* 8:6–18.
  11. Pentus, A. E., and M. R. Pentus. 2006. *Matematicheskaya teoriya formal'nykh yazykov* [Mathematical theory of formal languages]. Moscow: INTUIT; BINOM. Knowledge Laboratory. 247 p.
  12. Novikov, O. I., N. G. Titov, and G. N. Titov. 2016. O numeratsiyakh konechnykh chastichno uporyadochennykh mnozhestv [On the numerations of the finite partially ordered sets]. *Nauchnyy zhurnal KubGAU* [Scientific J. KubSAU] 118(04). Available at: <http://ej.kubagro.ru/2016/04/pdf/06.pdf> (accessed March 19, 2018).
  13. Kolmogorov, A. N., and S. V. Fomin. 2004. *Elementy teorii funktsiy i funktsional'nogo analiza* [Elements of the theory of functions and functional analysis]. 7th ed. Moscow: Fizmatlit. 572 p.

Received March 27, 2018

## Contributors

**Adamovich Igor M.** (b. 1934) — Candidate of Science (PhD) in technology, leading scientist, Institute of Informatics Problems, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119133, Russian Federation; Adam@amsd.com

**Volkov Oleg I.** (b. 1964) — leading programmer, Institute of Informatics Problems, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119133, Russian Federation; Volkov@amsd.com

## ТЕХНОЛОГИЯ НАЗНАЧЕННЫХ ПЛАТЕЖЕЙ В СРЕДЕ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ

*В. Д. Ильин<sup>1</sup>*

**Аннотация:** В технологии назначенных платежей, реализуемой в среде цифровых двойников (digital twins), правила исполнения заказа и платежа жестко связаны. Каждый платеж удостоверяется специальным сервисом банка-регулятора. Состояние платежной системы и оплаченных заказов непрерывно моделируется их цифровыми двойниками. Наиболее полная реализация предложенной технологии рассчитана на онлайн-сервисы банковской системы нормализованного экономического механизма, в состав которой входит банк-регулятор, банки-провайдеры, корпоративные банки и персональные электронные банки.

**Ключевые слова:** платежные системы; технология назначенных платежей; цифровые двойники (digital twins); банк-регулятор; банк-провайдер; корпоративный электронный банк; персональный электронный банк; банковский онлайн-сервис

**DOI:** 10.14357/08696527180318

### 1 Введение

В первых рассуждениях о цифровизации экономики [1, 2] и в реализуемой в наши дни программе «Цифровая экономика Российской Федерации» [3] предполагается, что роботизация и перевод в цифровую форму документов, отражающих экономические отношения физических и юридических лиц, должны усовершенствовать экономический механизм [4].

Какие усовершенствования наиболее актуальны на нынешнем этапе развития банковской системы и технологий платежей? Формально участвуя в реализации программы «Цифровая экономика Российской Федерации», банки по-прежнему стремятся сохранить возможность слабо ограниченного распоряжения денежными средствами клиентов, торговли кредитами, валютной спекуляции и другой деятельности, уменьшающей товарную емкость денег [4]. Чтобы избежать упреков в саботаже программы цифровизации экономики, банки с помощью системы межведомственного электронного взаимодействия налаживают взаимодействие с Федеральной налоговой службой, Федеральной антимонопольной службой и др. Реализуют взаимодействие с сервисами Росреестра. При этом в банковской

<sup>1</sup>Вычислительный центр им. А. А. Дородницына Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук, vdilyin@yandex.ru

практике продолжается способствующее банковскому мошенничеству выполнение операций над банковскими счетами без обязательных онлайн-подтверждений допустимости операций, предварительно полученных от владельцев счетов.

## 1.1 Выделение фрагментов текста статьи

Для выделения определений, замечаний и примеров используются следующие средства:

- ⟨фрагмент описания⟩ □ ≈ утверждение (определение, аксиома и др.) (здесь и далее символ ≈ заменяет слово «означает»);
- ◊ ⟨фрагмент описания⟩ ◊ ≈ замечание;
- ⟨фрагмент описания⟩ ○ ≈ пример.

Курсивом выделены первые вхождения названий понятий и фрагменты описания, к которым автор хочет привлечь внимание.

## 1.2 Цифровые двойники и унификация технологий платежных систем на основе онлайн-сервисов

С развитием информационных технологий изменяется концептуальное наполнение понятия Digital Twins («цифровые двойники», «цифровые близнецы»), впервые определенного в начале 2000-х гг. [5].

□ *Цифровые двойники* — это самообучающиеся *символьные модели* объектов проектирования, производства, торговли и др., реализованные в *человеко-машинной среде решения задач* (s-среде) [6]. Они позволяют осуществлять мониторинг моделируемого объекта (○ платежной системы ○) на основе обмена данными между объектом и его цифровым двойником. □

Различают *цифровые двойники-прототипы* (Digital Twin Prototype, DTP), *цифровые двойники-экземпляры* (Digital Twin Instance, DTI) и *цифровые агрегированные двойники* (Digital Twin Aggregate, DTA). DTP предназначен для создания физической версии объекта (○ онлайн-сервиса платежной системы ○); DTI — модель существующего объекта, с которым DTI предназначен взаимодействовать (○ модель мобильного терминала платежной системы ○); DTA — комплекс средств обработки данных, предназначенный для взаимодействия с заданной совокупностью DTI (○ являющейся моделью платежной системы ○).

Реализации современных платежных систем [7, 8] можно рассматривать как воплощения концепции Интернета вещей [9, 10]. Объекты, встроенные в чипы, магнитные полосы, сканеры и др., взаимодействуют между собой по правилам, реализованным в сетевых протоколах, которые спроектированы так, чтобы обеспечить перемещение сумм платежей со счетов плательщиков на счета получателей платежей.

Унификация технологий платежных систем на основе онлайн-сервисов предполагает поэтапную унификацию банковской инфраструктуры (ее властно-координационной составляющей, онлайн-сервисов, банковских сетей и др.).

Предложенная технология назначенных платежей в среде цифровых двойников позволит исключить возможность получения платежа не тем, кто указан в спецификации сделки. Кроме того, назначенный платеж может быть получен только при выполнении правил, определяющих исполнение заказа.

## 2 Технология назначенных платежей и онлайн-сервисы нормализованной банковской системы

□ *Назначенный платеж* — технологически гарантированная оплата заказа (товаров, услуг или их совокупности), правила реализации которой жестко связаны с правилами исполнения заказа. Спецификация назначенного платежа включает данные получателя платежа и плательщика, данные заказа (○ унифицированные описания заказанных товаров и услуг ○) и правила реализации заказа и платежа. □

□ *Технология назначенных платежей* — совокупность методов, средств и правил реализации назначенных платежей в среде цифровых двойников. □

Ключевые события, отслеживаемые цифровыми двойниками: «заказ сформирован», «готовность выполнить заказ и получить оплату», «готовность принять и оплатить заказ», «назначенный платеж сформирован», «заказ исполнен» («заказ отменен»), «назначенный платеж отправлен» («назначенный платеж отменен»), «назначенный платеж получен» («ожидание назначенного платежа прекращено»).

Назначенный платеж не может быть сформирован, если заказ содержит товары (и/или услуги), не отнесенные к допустимым. Контроль осуществляется цифровыми двойниками, обеспечивающими функционирование сервисов контроля допустимости заказа.

Сумма назначенного платежа переводится на счет получателя сразу после того, как заказчик подтвердил исполнение заказа. В случае неисполнения заказа назначенный платеж отменяется.

Реализация технологии обеспечивается онлайн-сервисами банков платежной системы, функционирующими в среде цифровых двойников, которые моделируют состояние платежной системы и процесса исполнения заказа.

◊ Технология назначенных платежей исключает возможность использования банками денежных средств, определенных как назначенные платежи (○ нереализуемы хищения, приводящие к ситуациям типа «обманутые дольщики» ○). ◊

Наиболее полная реализация технологии назначенных платежей возможна в платежных системах, функционирующих на основе онлайн-сервисов банковской системы *нормализованного экономического механизма (НЭМ)* [4, 11], которая включает *персональные электронные банки физических лиц (ПЭБы)*, *корпоративные электронные банки (КЭБы)*, *банки-провайдеры* и *банк-регулятор*.

Ядром нормализованной банковской системы является *система имущественных статусов (ис-система)* — программно реализуемая в s-среде [6] система

документального представления денежной и неденежной составляющих имущественных статусов участников экономической деятельности (эд-участников). Денежная составляющая выражена значениями сумм денег в разделах уникальных глобальных счетов эд-участников (ис-счетов). Неденежная составляющая имущественного статуса эд-участника представлена документами, подтверждающими право собственности на недвижимость, транспорт и другое имущество, которое при необходимости может рассматриваться как залоговое.

□ *Ис-счет* — уникальный поливалютный банковский счет эд-участника (физического или юридического лица). Представляет собой унифицированный электронный документ, состоящий из валютных частей (активируемых банком-регулятором). Каждая из них имеет разделы: «Располагаю», «Назначенные платежи», «Кредитование», «Инвестирование», «Налоги и сборы», «Дарение», «Пожертвование». Совокупность допустимых операций (при документировании сделок) определяется принадлежностью суммы к подразделу счета (○ сумма из подраздела «Получено» раздела «Инвестирование» может использоваться только для оплаты товаров, типы которых перечислены в инвестиционных договорах ○). Поскольку ис-счет имеет поливалютную структуру, он применим для документирования результатов внутренней и внешней экономической деятельности. Существование ис-счета предполагает, что его владелец имеет *уникальный глобальный идентификатор*. □

Изменение состояния ис-счета может быть реализовано только после получения государственного удостоверения допустимости операции над ис-счетом. Удостоверение выдает специальный онлайн-сервис банка-регулятора. Основанием для получения удостоверения служат данные спецификации совершаемой операции (○ платеж при сделке купли-продажи, уплате государственного сбора и др. ○). Таким способом исключаются возможности нарушения установленных законом правил товарно-денежного обращения (недопустимые экономические сделки, неуплата установленных законом государственных сборов и др.).

Суммы назначенных платежей могут использоваться только в соответствии со спецификациями этих платежей [○ для оплаты заказов — в соответствии со спецификациями, определенными в правилах исполнения заказов; полученные от инвесторов — в соответствии с инвестиционными договорами (закупка нового оборудования и т. д.) ○].

## 2.1 Онлайн-сервисы банка-регулятора

Задачи банка-регулятора, реализуемые посредством онлайн-сервисов:

- выдача и отзыв лицензий на право банковской деятельности (владельцам ПЭБов, КЭБов и банков-провайдеров);
- активация и деактивация валютных частей ис-счетов;
- государственное удостоверение операций над ис-счетами эд-участников;

- обслуживание запросов на досрочный возврат долгов и выполнение долговой денежной эмиссии (при реализации технологии долговой торговли) [12];
- контроль выполнения эд-участниками правил банковской деятельности;
- анализ финансовой составляющей экономической деятельности и предоставление результатов в порядке, установленном законом;
- разработка, модификация и утверждение прошедших тестирование унифицированных форм банковских документов (включая ис-счета);
- контроль эффективности размещения средств *государственного денежного резерва, фондов государственной социальной защиты, других государственных фондов и фондов с государственным участием.* □

Правила возврата долга покупателя продавцу (при долговой торговой сделке) определяются соответствующей спецификацией в составе договора. Применительно к долгам, образовавшимся в результате продажи приоритетных жизненно необходимых товаров, могут действовать правила досрочного возврата долгов продавцам из средств банка-регулятора. Эти правила определяются банком-регулятором и действуют применительно к продавцам товаров, входящих в утвержденный законом приоритетный список. Продавцам таких товаров долговая часть стоимости покупки может быть возвращена в относительно короткие сроки (раньше, чем предусмотрено договорным графиком возврата долга). Делается это по запросам продавцов в *долговой отдел банка-регулятора*, направляемым с использованием соответствующего онлайн-сервиса. При положительном решении банк-регулятор переводит на ис-счет продавца сумму долга, а покупатель после этого выплачивает долг не продавцу, а долговому отделу банка-регулятора.

*Долговая денежная эмиссия* выполняется банком-регулятором только тогда, когда сумма возвращенных покупателями долгов меньше очередной долговой суммы, запрошенной для возврата продавцу. Эмитируемая сумма равна разности запрошенной долговой суммы и суммы на счету долгового отдела [12].

## 2.2 Онлайн-сервисы банков-провайдеров

□ *Банки-провайдеры* — коммерческие предприятия, учрежденные юридическими лицами (или объединениями юридических лиц, объединениями физических лиц, объединениями юридических и физических лиц), занимающимися производством товаров или их реализацией.

Банк-провайдер располагает объединенными в сеть серверами, предназначеными для обслуживания запросов от ПЭБов и КЭБов клиентов и взаимодействия с серверами банка-регулятора.

*Онлайн-сервисы банка-провайдера* предназначены:

- для обслуживания запросов владельцев ис-счетов, направляемых посредством ПЭБов и КЭБов при совершении сделок (включая запросы на удостоверение состояния ис-счетов партнеров по сделкам, направляемые с их разрешения);

- хранения и обновления зашифрованных копий ис-счетов клиентов банка-провайдера;
- анализа инвестиционных запросов клиентов (потенциальных инвесторов и получателей инвестиций); банки-провайдеры могут выполнять заказы получателей инвестиций на консолидацию заявок инвесторов, чтобы комплексировать заказанную сумму инвестиции;
- регистрации заключенных договоров (с контролем допустимости сделок) и ведения баз данных таких договоров;
- юридического сопровождения реализуемых сделок. □

В базах данных банков-провайдеров в зашифрованной форме хранятся копии документов по всем обслуженным сделкам (за период времени, установленный законом).

### 2.3 Персональные и корпоративные электронные банки

Персональные и корпоративные электронные банки (как программно-аппаратные средства) — это, как правило, переносные *s-машины* [6] (○ смартфоны, планшеты ○). В ПЭБах и КЭБах в зашифрованной форме хранятся оригиналы ис-счетов и документов по сделкам. Зашифрованная база данных ис-счета хранится в памяти устройства, а ее копия — на карте памяти. Программно реализуемые записи в файлах ис-счетов имеют право инициировать только владельцы ис-счетов, совершающие сделку. Запросы на обслуживание сделки (удостоверение состояния ис-счета и сохранение обновленной копии ис-счета) получают банки-провайдеры, сервисами которых пользуются совершающие сделку эд-участники.

### 2.4 Онлайн-сервис подтверждения операций над ис-счетами

*Онлайн-сервис подтверждения операций над ис-счетами* реализует проверку выполнения аксиомы допустимости операций над ис-счетами [4]:

□ никакое изменение сумм ис-счета не может быть осуществлено без документируемого зашифрованного подтверждения владельца ис-счета (а в неординарных ситуациях — после документируемого зашифрованного подтверждения определенного законом государственного органа). □

В НЭМ этот сервис предоставляется всеми банками (ПЭБами, КЭБами, банками-провайдерами и банком-регулятором). Операция над ис-счетом становится допустимой (при сделках купли-продажи, инвестирования и др.) только тогда, когда от владельца каждого ис-счета, вовлеченного в операцию, получено зашифрованное согласие. Каждое такое подтверждение входит в состав документа, отражающего операцию над ис-счетом. Документ получают банки владельцев ис-счетов; его копия хранится установленное время на серверах банков-провайдеров [и при совершении ряда операций (○ в частности, досрочного возврата долгов ○) — на серверах банка-регулятора].

### 3 Заключение

Технология назначенных платежей, реализуемая в среде цифровых двойников (digital twins), позволяет исключить попадание платежа не на счет получателя, указанного в правилах исполнения заказа. Выполнение правил реализуется совокупностью банковских онлайн-сервисов, реализующих предложенную технологию. Каждый назначенный платеж удостоверяется специальным сервисом банка-регулятора, а состояние элементов платежной системы и исполнение заказа отслеживается соответствующими цифровыми двойниками.

Наиболее полная реализация предложенной технологии рассчитана на онлайн-сервисы банковской системы нормализованного экономического механизма, в состав которой входит банк-регулятор, банки-провайдеры, КЭБы и ПЭБы.

### Литература

1. *Tapscott D.* The digital economy: Promise and peril in the age of networked intelligence. — New York, NY, USA: McGraw-Hill, 1996. 342 p.
2. *Christensen C. M.* The innovator's dilemma: When new technologies cause great firms to fail. — Boston, MA, USA: Harvard Business School Press, 1997. 256 p.
3. Цифровая экономика Российской Федерации: Программа, утвержденная распоряжением Правительства Российской Федерации от 28 июля 2017 г. № 1632-р. 87 с. <http://d-russia.ru/wp-content/uploads/2017/07/programma-tsifrov-econ.pdf>.
4. *Ильин А. В., Ильин В. Д.* Информатизация экономического механизма. — М.: ИПИ РАН, 2015. 130 с. doi: 10.13140/RG.2.1.2003.8167.
5. The digital twin. — General Electric, 2018. [https://www.ge.com/digital/sites/default/files/The-Digital-Twin\\_Compressing-Time-to-Value-for-Digital-Industrial-Companies.pdf](https://www.ge.com/digital/sites/default/files/The-Digital-Twin_Compressing-Time-to-Value-for-Digital-Industrial-Companies.pdf).
6. *Ильин В. Д.* Символьное моделирование // Большая российская энциклопедия, 2018. [http://dev.bigenc.ru/technology\\_and\\_technique/text/4010980](http://dev.bigenc.ru/technology_and_technique/text/4010980).
7. *Lamb K.* Inside national payment systems, 2018. <https://www.investopedia.com/articles/economics/08/nps.asp>.
8. Национальная система платежных карт. Словарь терминов, используемых в платежных и расчетных системах, 2018. [https://www.nspk.ru/about/glossariy-terminov/#dic\\_17](https://www.nspk.ru/about/glossariy-terminov/#dic_17).
9. *Perera C., Liu C. H., Jayawardena S.* The emerging Internet of Things marketplace from an industrial perspective: A survey // IEEE T. Emerging Topics Computing, 2015. Vol. 3. No. 4. P. 585–598.
10. «Интернет вещей» (IoT) в России. Технология будущего, доступная уже сейчас. — PWC, 2017. [https://www.pwc.ru/ru/publications/iot/IoT-inRussia-research\\_rus.pdf](https://www.pwc.ru/ru/publications/iot/IoT-inRussia-research_rus.pdf).
11. *Ilyin A. V., Ilyin V. D.* Towards a normalized economic mechanism based on E-services // Agris on-line Papers in Economics and Informatics, 2014. Vol. 6. No. 3. P. 39–49. [http://online.agris.cz/files/2014/agris\\_on-line\\_2014\\_3\\_iljin\\_iljin.pdf](http://online.agris.cz/files/2014/agris_on-line_2014_3_iljin_iljin.pdf).

12. Ilyin A. V., Ilyin V. D. E-trade with direct lending and normalized money // Agris on-line Papers in Economics and Informatics, 2015. Vol. 7. No. 4. P. 57–64. [http://online.agris.cz/files/2015/agris\\_on-line\\_2015\\_4\\_Ilyin\\_Ilyin.pdf](http://online.agris.cz/files/2015/agris_on-line_2015_4_Ilyin_Ilyin.pdf).

Поступила в редакцию 15.08.18

---

## DESIGNATED PAYMENTS TECHNOLOGY IN DIGITAL TWINS ENVIRONMENT

V. D. Ilyin

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

**Abstract:** In the technology of designated payments, which is to be implemented in the digital twins environment, the rules of order execution and payment are rigidly linked. Each payment is certified by the special service of the bank-regulator. The state of the payment system and the paid orders is continuously modeled by their digital twins. The most complete implementation of the proposed technology should be done in online services of the banking system in the normalized economic mechanism. Such system includes bank-regulator, banks-providers, and corporate and personal electronic banks.

**Keywords:** payment system; technology of designated payments; digital twin; bank-regulator; bank-provider; corporate electronic bank; personal electronic bank; banking online service

**DOI:** 10.14357/08696527180318

## References

1. Tapscott, D. 1996. *The digital economy: Promise and peril in the age of networked intelligence*. New York, NY: McGraw-Hill. 342 p.
2. Christensen, C. M. 1997. *The innovator's dilemma: When new technologies cause great firms to fail*. Boston, MA: Harvard Business School Press. 256 p.
3. Government of the Russian Federation. 2017. Tsifrovaya ekonomika Rossiyskoy Federatsii: Programma, utverzhдennaya rasporyazheniem Pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii ot 28 iyulya 2017 g. No. 1632-r [The program “Digital Economy of the Russian Federation” approved by Government Order No. 1632-r dated July 28, 2017]. 87 p. Available at: <http://d-russia.ru/wp-content/uploads/2017/07/programma-tsifrov-econ.pdf> (accessed July 10, 2018).
4. Ilyin, A. V., and V. D. Ilyin. 2015. *Informatizatsiya ekonomicheskogo mehanizma* [Informatization of economic mechanism]. Moscow: Institute of Informatics Problems of RAS. 130 p. doi: 10.13140/RG.2.1.2003.8167.
5. General Electric. 2018. The digital twin. Available at: [https://www.ge.com/digital/sites/default/files/The-Digital-Twin\\_Compressing-Time-to-Value-for-Digital-Industrial-Companies.pdf](https://www.ge.com/digital/sites/default/files/The-Digital-Twin_Compressing-Time-to-Value-for-Digital-Industrial-Companies.pdf) (accessed July 10, 2018).

6. Ilyin, V. D. 2018. Simvol'noe modelirovanie [Symbolic modeling]. *Bol'shaya rossiyskaya entsiklopediya* [Great Russian encyclopedia]. Available at: [http://dev.bigenr.ru/technology\\_and\\_technique/text/4010980](http://dev.bigenr.ru/technology_and_technique/text/4010980) (accessed July 10, 2018).
7. Lamb, K. 2018. Inside national payment systems. Available at: <https://www.investopedia.com/articles/economics/08/nps.asp> (accessed July 10, 2018).
8. National payment card system. 2018. *Slovar' terminov, ispol'zuemykh v platezhnykh i raschetnykh sistemakh* [Glossary for payment and settlement systems]. Available at: [https://www.nspk.ru/about/glossary-terminov/#dic\\_17](https://www.nspk.ru/about/glossary-terminov/#dic_17) (accessed July 10, 2018).
9. Perera, C., C. H. Liu, and S. Jayawardena. 2015. The emerging Internet of Things marketplace from an industrial perspective: A survey. *IEEE T. Emerging Topics Computing* 3(4):585–598. doi: 10.1109/TETC.2015.2390034.
10. PWC. 2017. “Internet veshchey” (IoT) v Rossii. Tekhnologiya budushchego, dostupnaya u zhe seychas [“Internet of Things” (IoT) in Russia. Technology of the future, available now]. Available at: [https://www.pwc.ru/ru/publications/iot/IoT-inRussia-research\\_rus.pdf](https://www.pwc.ru/ru/publications/iot/IoT-inRussia-research_rus.pdf) (accessed July 10, 2018).
11. Ilyin, A. V., and V. D. Ilyin. 2014. Towards a normalized economic mechanism based on E-services. *Agris on-line Papers in Economics and Informatics* 6(3):39–49. Available at: [http://online.agris.cz/files/2014/agris.on-line\\_2014\\_3\\_ilyin\\_ilyin.pdf](http://online.agris.cz/files/2014/agris.on-line_2014_3_ilyin_ilyin.pdf) (accessed July 10, 2018).
12. Ilyin, A. V., and V. D. Ilyin. 2015. E-trade with direct lending and normalized money. *Agris on-line Papers in Economics and Informatics* 7(4):57–64. Available at: [http://online.agris.cz/files/2015/agris.on-line\\_2015\\_4\\_ilyin\\_ilyin.pdf](http://online.agris.cz/files/2015/agris.on-line_2015_4_ilyin_ilyin.pdf) (accessed July 10, 2018).

Received August 15, 2018

## Contributor

**Ilyin Vladimir D.** (b. 1937) — Doctor of Science in technology, professor, leading scientist, Dorodnicyn Computing Center of the Russian Academy of Sciences, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 40 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation; vdilyin@yandex.ru

## НЕКОТОРЫЕ ОЦЕНКИ ПОИСКОВЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ИНТЕРНЕТ-КАТАЛОГОВ РОССИЙСКИХ БИБЛИОТЕК

*H. E. Калёнов<sup>1</sup>*

**Аннотация:** Рассматриваются вопросы организации поиска информации в библиотечных каталогах как в «историческом» аспекте (применительно к традиционным карточным и печатным каталогам), так и в современном, обусловленном развитием информационных технологий, Интернета и универсальных поисковых машин. Проведен анализ и выявлены недостатки существующих интернет-каталогов ряда российских научных библиотек. Рассмотрен ряд примеров некорректной обработки запросов каталогами ведущих библиотек России. Сделан вывод о необходимости нового подхода к проектированию интернет-каталогов научных библиотек, которые должны выдавать пользователю всю ту и только ту информацию, которая его интересует. При создании программных оболочек интернет-каталогов необходимо, с одной стороны, отойти от традиционных библиотечных представлений о каталогах, существенно ограничивающих их поисковые возможности, с другой стороны — от логики работы универсальных поисковых машин Интернета, выдающих пользователю тысячи процентов информационного шума.

**Ключевые слова:** электронные каталоги; Интернет; качество информационного поиска; библиографические описания; сетевые технологии; поисковые запросы

**DOI:** 10.14357/08696527180319

Одним из основных атрибутов любой библиотеки являются каталоги, отражающие ее фонды. До наступления «эры компьютеризации» в библиотеках формировались в основном карточные, реже печатные каталоги. Преимущества карточных каталогов для посетителей библиотек очевидны — карточные каталоги легко актуализировать, добавляя и изымая карточки по мере поступления или исключения из фондов конкретных изданий, поэтому (при четко действующем библиотечном персонале) карточные каталоги в любой момент времени отражают состояние фондов библиотеки. Печатные каталоги не обеспечивали оперативность отражения фондов, однако они могли рассыпаться по почте заинтересованным пользователям, которые, не приходя в библиотеку, могли получать информацию о ее фондах. В этой связи печатные каталоги обычно отражали либо часть фондов, относящуюся к определенному событию (например, содержали перечень изданий, представленных на тематической или персональной выставке), либо содержали перечень изданий, поступивших за определенный промежуток времени.

---

<sup>1</sup>Библиотека по естественным наукам Российской академии наук, nek@benran.ru

Традиционные карточные каталоги подразделяются на два вида — алфавитные и систематические (существуют также предметные каталоги, но принцип их построения не отличается от систематических). Первые служат для поиска конкретного издания, про которое известны фамилия автора или название; вторые позволяют найти издания по определенной тематике. Информация об издании выводится на карточку в виде стандартизированного библиографического описания [1]. Карточки в алфавитных каталогах упорядочиваются по заголовкам библиографических описаний. В заголовки «основных» описаний выводятся фамилии авторов либо названия изданий (для сборников, не имеющих индивидуальных авторов). Наряду с основными карточками для обеспечения более полного поиска в каталогах на одно издание могут формироваться добавочные карточки, в заголовки которых выводятся фамилии дополнительных авторов, редакторов, составителей и т. п. Кроме карточек с библиографическими описаниями в алфавитных каталогах могут присутствовать также «ссылочные» и «справочные» карточки. Первые используются, в частности, при наличии у авторов псевдонимов и дают ссылки на используемые в алфавитном ряду данного каталога варианты имени автора (например, «Клеменс Сэмуэл см. Марк Твен»); вторые раскрывают аббревиатуры названий изданий или организаций (например, «МТТ — Механика твердого тела» или «ВИНИТИ — Всероссийский институт научной и технической информации»). Карточки для систематических каталогов имеют своими заголовками индексы той или иной системы классификации (УДК, ББК и пр.), принятой в данной библиотеке; в заголовки карточек предметных каталогов выносятся наименования предметных рубрик.

Развитие вычислительной техники и сетевых технологий обусловило возможности формирования в библиотеках электронных каталогов. Сегодня трудно найти научную библиотеку, которая бы не имела своего электронного каталога, представленного в Интернете. Однако в подавляющем большинстве случаев эти каталоги (особенно на этапах их «становления») строились исходя из принципов, заложенных в традиционных карточных каталогах, и были ориентированы на поиск изданий по ограниченному числу элементов библиографических описаний, соответственно, не использовались в полной мере возможности автоматизированных информационно-поисковых систем. В качестве примера подобного подхода можно привести электронный каталог ГПНТБ России «WEB ИРБИС». Пользователю, обратившемуся к каталогу (<http://www.gpntb.ru/>, переход по ссылке «Электронный каталог») предлагается ввести в строку интересующий его термин, выбрав предварительно «область поиска» (варианты: «ключевые слова», «Автор», «Заглавие», «Год издания») (рис. 1).

Предположим, пользователя интересуют издания, связанные с протоколом z39.50.

Если выбрать область поиска «Ключевые слова», система сообщает:  
«По Вашему запросу: (. )**K = Z39\$**(.) ничего не найдено, уточните запрос».

Если искать в области поиска «Заглавие», система выдает две записи, заглавие которых начинается с z39.50 (рис. 2).

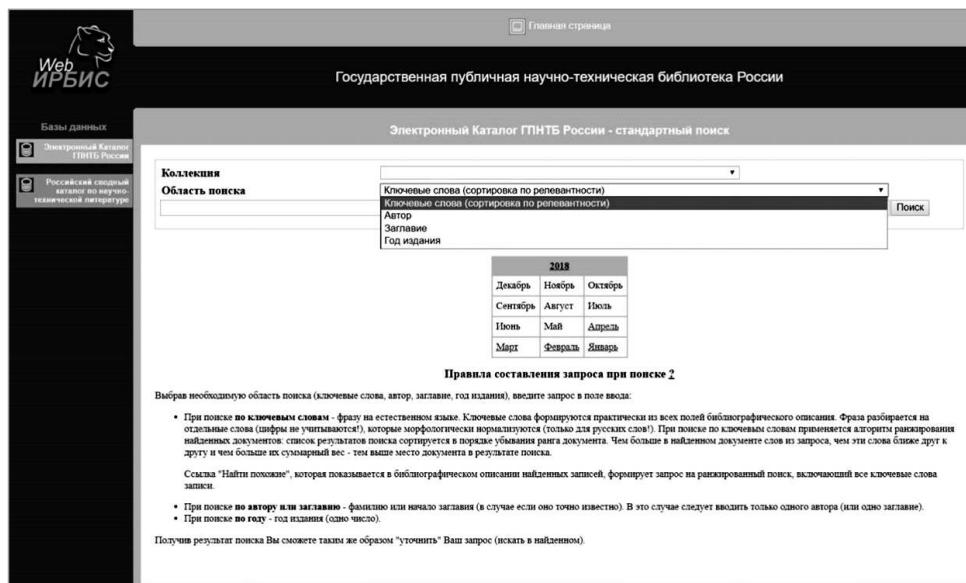


Рис. 1 Поисковая страница электронного каталога ГПНТБ России

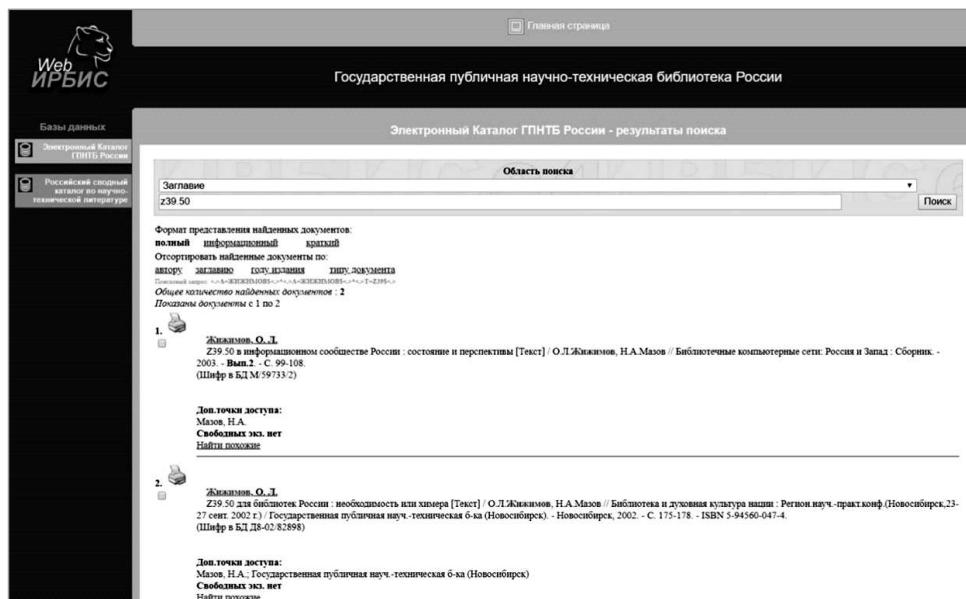


Рис. 2 Поисковый запрос в электронном каталоге ГПНТБ России

По запросу «Жижимов» в области поиска «Автор» система выдает 17 документов, первый же из которых — «Жижимов, О. Л. Построение распределенных информационных систем на основе протокола Z39.50 [Текст]: автореф. дис. . . . д-ра техн. наук: 05.25.05 / О. Л. Жижимов. — Новосибирск, 2004. — 31 с.: ил. — Библиогр.: с. 25–31 (37 назв.)» — не выдается при поиске ни по ключевым словам, ни по заглавию.

Проявлением «библиотечного подхода» к организации электронного каталога ГПНТБ является также текст «доп. точки доступа» в нижней части записи, относящейся к изданиям, и вывод значения, по которому возможен поиск этой записи (см. обе записи на рис. 2).

К сожалению, WEB-ИРБИС является одной из самых распространенных в стране программных оболочек, поддерживающих интернет-каталоги библиотек. Автор неоднократно указывал в профессиональной библиотечной печати на недостатки и ошибки этих каталогов [2–4], однако многие академические библиотеки продолжают их поддерживать. В результате пользователи, обращаясь к таким крупнейшим академическим библиотекам, как ГПНТБ СО РАН, ЦНБ УрО РАН, БАН, не всегда могут получить полную и достоверную информацию о наличии в их фондах тех или иных изданий. Например, на запрос «Экологические угрозы» в области поиска «Заглавие» каталоги всех этих библиотек выдают сообщение:

«По Вашему запросу: “((.)**T=Экологические угрозы\$**(.))” (на естественном языке: **ЗАГЛАВИЕ:** «Экологические угрозы») ничего не найдено. Убедитесь в корректности запроса».

В то же время во всех каталогах имеется книга, в заглавие которой входит фрагмент «Экологические угрозы»: «Тетельмин, Владимир Владимирович. Сланцевые углеводороды. Технологии добычи. Экологические угрозы: учеб. пособие для вузов / В. В. Тетельмин, В. А. Язев, А. А. Соловьев. — Долгопрудный : Интеллект, 2014. — 295 с.».

Справедливости ради надо отметить, что при вводе запроса «Экологические угрозы» в область поиска «ключевые слова» эта книга выдается каталогами ГПНТБ СО РАН и ЦНБ УрО РАН, но ее нет среди 14 книг, выдаваемых на этот запрос каталогом БАН.

Случаи, когда электронный каталог сообщает об отсутствии той или иной книги в библиотеке, несмотря на то что она есть, недопустимы. При работе с каталогом в «традиционной» ситуации, когда читатель приходит в библиотеку, такие случаи почти исключены, поскольку в поиске нужной книги читателю помогают находящиеся рядом библиотечные специалисты. С интернет-каталогом пользователь остается один на один, и задача разработчиков — предоставить ему сервис, который в максимальной степени должен исключить возможность выдачи неверных сведений, поэтому к разработке интернет-каталогов необходимо подходить с учетом этих требований.

В последнее время многие библиотеки стали впадать в другую крайность — вместо расширения возможностей традиционного поиска пошли по пути копиро-

**Рис. 3** Поисковый запрос в электронном каталоге РГБ

вания пользовательского интерфейса, принятого в поисковых машинах общего назначения (Yandex, Google, Rambler и т. п.), предоставляя для ввода запроса одну строку, внутри которой подразумевается связка «И» между терминами. Такой подход приводит к получению значительного «шума», из которого пользователю приходится выбирать нужную ему информацию, затрачивая значительное время, или уходить с сайта библиотеки и больше туда не возвращаться. В качестве иллюстрации такого подхода можно привести каталог Российской государственной библиотеки (РГБ), представленный на сайте <https://www.rsl.ru>. При попытке узнать, есть ли в фондах РГБ журнал «Программные продукты и системы» за 2017 г., пользователь, введя в строку запроса «журнал программные продукты и системы 2017 год» получит 12 830 ссылок на различные издания, в которых в разных комбинациях встречаются эти слова (рис. 3).

Очевидно, что искать в этом неупорядоченном массиве нужный журнал ни один пользователь не станет. Положение не спасает и появляющаяся после первой выдачи результатов поиска левая часть экрана (см. рис. 3), в которой можно указать год издания и отметить специальность ВАК (Технические науки) — число выданных документов уменьшается до 611, но в обозримом начале списка нужный журнал отсутствует. В то же время РГБ должна иметь этот журнал,

поскольку получает обязательный экземпляр всех изданий, выходящих в России.

Подобные библиотечные каталоги дискредитируют библиотеки, не представляя пользователям ничего нового по сравнению с поисковыми машинами Интернета.

Автор считает, что интернет-каталог научной библиотеки должен: (а) в отличие от общих поисковых машин (Yandex, Google, Rambler и т. п.), выдавать ВСЮ ту и ТОЛЬКО ту информацию, которая соответствует запросу, сформированному пользователем; (б) обладать свойствами развитой информационно-поисковой системы, обеспечивающей обработку сложных запросов, включающих операторы булевой логики; (в) предоставлять возможность поиска материалов в фонде библиотеки как по всем элементам расширенного библиографического описания, так и по тематике изданий; (г) обладать прозрачным пользовательским интерфейсом, не требующим знания библиотечной терминологии.

Именно исходя из этих принципов специалистами БЕН РАН разрабатываются интернет-каталоги Библиотеки. Развернутую информацию о поисковых возможностях сводного каталога книг и продолжающихся изданий БЕН РАН предполагается опубликовать в одном из ближайших номеров журнала.

## Литература

1. ГОСТ 7.1-2003 Библиографическая запись. Библиографическое описание. [http://diss.rsl.ru/datadocs/doc\\_291wu.pdf](http://diss.rsl.ru/datadocs/doc_291wu.pdf).
2. Каленов Н. Е. Электронные каталоги академических библиотек: какими им быть? // Теория и практика общественно-научной информации, 2014. Вып. 22. С. 54–63.
3. Власова С. А., Каленов Н. Е. Роль каталогов научных библиотек в задачах информационного сопровождения научных исследований // Информационные процессы, 2014. Т. 14. № 3. С. 232–241. <http://www.jip.ru/2014/232-241-2014.htm>.
4. Каленов Н. Е. Библиотечные интернет-каталоги и пользователи // Научная периодика: проблемы и решения, 2015. Т. 5. № 6. С. 265–272.

Поступила в редакцию 24.04.18

---

## SOME EVALUATION OF THE RUSSIAN LIBRARIES ONLINE CATALOGS SEARCH CAPABILITIES

*N. E. Kalenov*

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

**Abstract:** The problems of organizing the information retrieval in library catalogs both in the “historical” aspect (with reference to traditional card catalogs and printed catalogs) and in the modern aspect, conditioned by the development of

information technologies, Internet, and universal search engines, are under consideration. The analysis is made and the shortcomings of the existing online catalogs of various scientific libraries of the country are revealed. A number of examples of incorrect query processing by catalogs of leading libraries of Russia are considered. The conclusion is made about the necessity of a new approach to the design of scientific libraries online catalogs. These catalogs should give the user all the information he/she needs without information noise. When creating software shells of modern online catalogs, on the one hand, it is necessary to move away from the traditional library ideas about catalogs, significantly limiting their search capabilities, and on the other hand — from the logic of the universal Internet search engines, giving the user thousands of percent of information noise.

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

**DOI:** 10.14357/08696527180319

## References

1. GOST 7.1-2003 Bibliograficheskaya zapis'. Bibliograficheskoe opisanie [Bibliographic record. Bibliographic description]. Available at: [http://diss.rsl.ru/datadocs/doc\\_291wu.pdf](http://diss.rsl.ru/datadocs/doc_291wu.pdf) (accessed August 28, 2018).
2. Kalenov, N. E. 2014. Elektronnnye katalogi akademicheskikh bibliotek: kakimi im byt'? [Electronic catalogs of academic libraries: What should they be?]. *Teoriya i praktika obshchestvenno-nauchnoy informatsii* [Theory and Practice of Social and Scientific Information] 22:54–63.
3. Vlasova, S. A., and N. E. Kalenov. 2014. Rol' katalogov nauchnykh bibliotek v zadachakh informatsionnogo soprovozhdeniya nauchnykh issledovaniy [The role of academic libraries catalogues for the scientific research information support]. *Information Processes* 14(3):232–241. Available at: <http://www.jip.ru/2014/232-241-2014.htm> (accessed August 28, 2018).
4. Kalenov, N. E. 2015. Bibliotechnye internet-katalogi i pol'zovateli [Online library catalogs and users]. *Scientific Periodicals: Problems and Solutions* 5(6):265–272.

Received April 24, 2018

## Contributor

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

---

## О Б А В Т О Р АХ

---

**Адамович Игорь Михайлович** (р. 1934) — кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник Института проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

**Борисов Андрей Владимирович** (р. 1965) — доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник Института проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

**Босов Алексей Вячеславович** (р. 1969) — доктор технических наук, главный научный сотрудник Института проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

**Волков Олег Игоревич** (р. 1964) — ведущий программист Института проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

**Гершельман Андрей Фердинандович** (р. 1959) — консультант в области ИТ стратегии и ИТ экономики компании IBM East Europe/Asia

**Гончаренко Мирослав Богданович** (р. 1991) — аспирант кафедры математической статистики факультета вычислительной математики и кибернетики Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова

**Горшенин Андрей Константинович** (р. 1986) — кандидат физико-математических наук, доцент, ведущий научный сотрудник Института проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук; ведущий научный сотрудник факультета вычислительной математики и кибернетики МГУ им. М. В. Ломоносова

**Егоров Владимир Борисович** (р. 1948) — кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник Института проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

**Замковой Алексей Анатольевич** (р. 1978) — кандидат экономических наук, начальник отделения Института экономики и развития транспорта (АО «ИЭРТ»)

**Зацаринный Александр Алексеевич** (р. 1951) — доктор технических наук, заместитель директора Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук (ФИЦ ИУ РАН); главный научный сотрудник Института проблем информатики ФИЦ ИУ РАН

**Зацман Игорь Моисеевич** (р. 1952) — доктор технических наук, заведующий отделом Института проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

**Иванов Алексей Владимирович** (р. 1976) — научный сотрудник Института проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

**Ильин Владимир Дмитриевич** (р. 1937) — доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник Вычислительного центра им. А. А. Дородницына Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

**Ионенков Юрий Сергеевич** (р. 1956) — старший научный сотрудник Института проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

**Калёнов Николай Евгеньевич** (р. 1945) — доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Библиотеки по естественным наукам Российской академии наук

**Кириков Игорь Александрович** (р. 1955) — кандидат технических наук, директор Калининградского филиала Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

**Клюбина Катерина Владимировна** (р. 1994) — технический консультант компании IBM East Europe/Asia

**Колесников Александр Васильевич** (р. 1948) — доктор технических наук, профессор Института физико-математических наук и информационных технологий Балтийского федерального университета имени Иммануила Канта; старший научный сотрудник Калининградского филиала Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

**Кондрашев Вадим Адольфович** (р. 1963) — старший научный сотрудник Института проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

**Кудияров Сергей Петрович** (р. 1988) — старший специалист Института экономики и развития транспорта (АО «ИЭРТ»)

**Кудрявцев Алексей Андреевич** (р. 1978) — кандидат физико-математических наук, доцент кафедры математической статистики факультета вычислительной математики и кибернетики Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова

**Кузьмин Виктор Юрьевич** (р. 1986) — руководитель Департамента разработки ООО «Вай2Гео»

**Листопад Сергей Викторович** (р. 1984) — кандидат технических наук, старший научный сотрудник Калининградского филиала Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

**Майтаков Федор Георгиевич** (р. 1973) — аспирант Института физико-математических наук и информационных технологий Балтийского федерального университета имени Иммануила Канта

**Мартышкин Роман Викторович** (р. 1987) — кандидат психологических наук, начальник сектора Института экономики и развития транспорта (АО «ИЭРТ»)

**Минин Владимир Александрович** (р. 1941) — доктор физико-математических наук, консультант Института проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

**Никишин Дмитрий Александрович** (р. 1976) — кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник Института проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

**Палиониная Софья Игоревна** (р. 1995) — студент факультета вычислительной математики и кибернетики Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова

**Синицын Владимир Игоревич** (р. 1968) — доктор физико-математических наук, доцент, главный научный сотрудник Института проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

**Синицын Игорь Николаевич** (р. 1940) — доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, главный научный сотрудник Института проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

**Степанович Алексей Игоревич** (р. 1983) — младший научный сотрудник Института проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

**Стрижов Вадим Викторович** (р. 1967) — доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Вычислительного центра им. А. А. Дородницына Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

**Сучков Александр Павлович** (р. 1954) — доктор технических наук, ведущий научный сотрудник Института проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

**Тихомиров Илья Александрович** (р. 1980) — кандидат технических наук, доцент, заведующий лабораторией Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

**Усманова Карина Равилевна** (р. 1996) — студент Московского физико-технического института

**Хавансков Валерий Александрович** (р. 1950) — научный сотрудник Института проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

**Шоргин Сергей Яковлевич** (р. 1952) — доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник Института проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

**Шубников Сергей Константинович** (р. 1955) — старший научный сотрудник Института проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

**Ядринцев Василий Владимирович** (р. 1993) — инженер-исследователь Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук; аспирант кафедры информационных технологий Российского университета дружбы народов

---

## **Правила подготовки рукописей статей для публикации в журнале «Системы и средства информатики»**

---

Журнал «Системы и средства информатики» публикует теоретические, обзорные и дискуссионные статьи, посвященные научным исследованиям и разработкам в области информационных технологий.

Журнал издается на русском языке. По специальному решению редколлегии отдельные статьи могут печататься на английском языке.

Тематика журнала охватывает следующие направления:

- информационно-телекоммуникационные системы и средства их построения;
- архитектура и программное обеспечение вычислительных машин, комплексов и сетей;
- методы и средства защиты информации.

1. В журнале печатаются статьи, содержащие результаты, ранее не опубликованные и не предназначенные к одновременной публикации в других изданиях.

Публикация предоставленной автором(ами) рукописи не должна нарушать положений глав 69, 70 раздела VII части IV Гражданского кодекса, которые определяют права на результаты интеллектуальной деятельности и средства индивидуализации, в том числе авторские права, в РФ.

Ответственность за нарушение авторских прав, в случае предъявления претензий к редакции журнала, несут авторы статей.

Направляя рукопись в редакцию, авторы сохраняют свои права на данную рукопись и при этом передают учредителям и редколлегии журнала неисключительные права на издание статьи на русском языке (или на языке статьи, если он отличен от русского) и на перевод ее на английский язык, а также на ее распространение в России и за рубежом. Каждый автор должен представить в редакцию подписанный с его стороны «Лицензионный договор о передаче неисключительных прав на использование произведения», текст которого размещен по адресу <http://www.ipiran.ru/publications/licence.doc>. Этот договор может быть представлен в бумажном (в 2-х экз.) или в электронном виде (отсканированная копия заполненного и подписанного документа).

Редколлегия вправе запросить у авторов экспертное заключение о возможности публикации представленной статьи в открытой печати.

2. К статье прилагаются данные автора (авторов) (см. п. 8). При наличии нескольких авторов указывается фамилия автора, ответственного за переписку с редакцией.

3. Редакция журнала осуществляет экспертизу присланных статей в соответствии с принятой в журнале процедурой рецензирования.

Возвращение рукописи на доработку не означает ее принятия к печати.

Доработанный вариант с ответом на замечания рецензента необходимо прислать в редакцию.

4. Решение редколлегии о публикации статьи или ее отклонении сообщается авторам.

Редколлегия может также направить авторам текст рецензии на их статью. Дискуссия по поводу отклоненных статей не ведется.

5. Редактура статей высылается авторам для просмотра. Замечания к редактуре должны быть присланы авторами в кратчайшие сроки.
6. Рукопись предоставляется в электронном виде в форматах MS WORD (.doc или .docx) или L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X (.tex), дополнительно — в формате .pdf, на дискете, лазерном диске или электронной почтой. Предоставление бумажной рукописи необязательно.
7. При подготовке рукописи в MS Word рекомендуется использовать следующие настройки.

Параметры страницы: формат — А4; ориентация — книжная; поля (см): внутри — 2,5, снаружи — 1,5, сверху и снизу — 2, от края до нижнего колонтитула — 1,3.

Основной текст: стиль — «Обычный», шрифт — Times New Roman, размер — 14 пунктов, абзацный отступ — 0,5 см, 1,5 интервала, выравнивание — по ширине.

Рекомендуемый объем рукописи — не свыше 15 страниц указанного формата. При превышении указанного объема редколлегия вправе потребовать от автора сокращения объема рукописи.

Сокращения слов, помимо стандартных, не допускаются. Допускается минимальное количество аббревиатур.

Все страницы рукописи нумеруются.

Шаблоны примеров оформления представлены в Интернете:

<http://www.ipiran.ru/publications/collected/template.doc>

8. Статья должна содержать следующую информацию на **русском и английском языках**:

- название статьи;
- Ф.И.О. авторов, на английском можно только имя и фамилию;
- место работы, с указанием города и страны и электронного адреса каждого автора;
- сведения об авторах, в соответствии с форматом, образцы которого представлены на страницах:  
[http://www.ipiran.ru/journal/collected/2012\\_22\\_02\\_rus/authors.asp](http://www.ipiran.ru/journal/collected/2012_22_02_rus/authors.asp) и  
[http://www.ipiran.ru/journal/collected/2012\\_22\\_02\\_eng/authors.asp](http://www.ipiran.ru/journal/collected/2012_22_02_eng/authors.asp);
- аннотация (не менее 100 слов на каждом из языков). Аннотация — это краткое резюме работы, которое может публиковаться отдельно. Она является основным источником информации в информационных системах и базах данных. Английская аннотация должна быть оригинальной, может не быть дословным переводом русского текста и должна быть написана хорошим английским языком. В аннотации не должно быть ссылок на литературу и, по возможности, формул;
- ключевые слова — желательно из принятых в мировой научно-технической литературе тематических тезаурусов. Предложения не могут быть ключевыми словами.
- источники финансирования работы (ссылки на гранты, проекты, поддерживающие организации и т. п.).

9. Требования к спискам литературы.

Ссылки на литературу в тексте статьи нумеруются (в квадратных скобках) и располагаются в каждом из списков литературы в порядке первых упоминаний.

Списки литературы представляются в двух вариантах:

- (1) **Список литературы к русскоязычной части.** Русские и английские работы — на языке и в алфавите оригинала.
- (2) **References.** Русские работы и работы на других языках — в латинской транслитерации с переводом на английский язык; английские работы и работы на других языках — на языке оригинала.

Необходимо для составления списка “References” пользоваться размещенной на сайте <http://www.translit.net/ru/bgn/> бесплатной программой транслитерации русского текста в латиницу.

Список литературы “References” приводится полностью отдельным блоком, повторяя все позиции из списка литературы к русскоязычной части, независимо от того, имеются или нет в нем иностранные источники. Если в списке литературы к русскоязычной части есть ссылки на иностранные публикации, набранные латиницей, они полностью повторяются в списке “References”.

Примеры ссылок на различные виды публикаций в списке “References”:

**Описание статьи из журнала:**

Zhang, Z., and D. Zhu. 2008. Experimental research on the localized electrochemical micromachining. *Rus. J. Electrochem.* 44(8):926–930. doi:10.1134/S1023193508080077.

**Описание статьи из электронного журнала:**

Swaminathan, V., E. Lepkoswka-White, and B. P. Rao. 1999. Browsers or buyers in cyberspace? An investigation of electronic factors influencing electronic exchange. *JCMC* 5(2). Available at: <http://www.ascusc.org/jcmc/vol5/issue2/> (accessed April 28, 2011).

**Описание материалов конференций:**

Usmanov, T. S., A. A. Gusmanov, I. Z. Mullagalin, R. Ju. Muhametshina, A. N. Chervyakova, and A. V. Sveshnikov. 2007. Особенности проектирования разработки месторождений с применением гидравлического трещинообразования [Features of the design of field development with the use of hydraulic fracturing]. *Trudy 6-go Mezhdunarodnogo Simpoziuma “Novye resursosberegayushchie tekhnologii nedropol’zovaniya i povышeniya neftegazootdachi”* [6th Symposium (International) “New Energy Saving Subsoil Technologies and the Increasing of the Oil and Gas Impact” Proceedings]. Moscow. 267–272.

**Описание книги (монографии, сборники):**

Lindorf, L. S., and L. G. Mamikonants, eds. 1972. *Ekspluatatsiya turbogeneratorov s neposredstvennym okhlazhdeniem* [Operation of turbine generators with direct cooling]. Moscow: Energy Publs. 352 p.

**Описание переводной книги** (в списке литературы к русскоязычной части необходимо указать: / Пер. с англ. — после названия книги, а в конце ссылки указать оригинал книги в круглых скобках):

1. В русскоязычной части:

Тимошенко С. П., Янг Д. Х., Уивер У. Колебания в инженерном деле / Пер. с англ. — М.: Машиностроение, 1985. 472 с. (Timoshenko S. P., Young D. H., Weaver W. Vibration problems in engineering. — 4th ed. — N.Y.: Wiley, 1974. 521 p.)

2. В англоязычной части:

Timoshenko, S. P., D. H. Young, and W. Weaver. 1974. *Vibration problems in engineering*. 4th ed. N.Y.: Wiley. 521 p.

**Описание неопубликованного документа:**

Latypov, A. R., M. M. Khasanov, and V. A. Baikov. 2004. Geology and production (NGT GiD). Certificate on official registration of the computer program No. 2004611198. (In Russian, unpubl.)

**Описание интернет-ресурса:**

Pravila tsitirovaniya istochnikov [Rules for the citing of sources]. Available at: <http://www.scribd.com/doc/1034528/> (accessed February 7, 2011).

**Описание диссертации или автореферата диссертации:**

Semenov, V. I. 2003. Matematicheskoe modelirovanie plazmy v sisteme kompaktnyy tor [Mathematical modeling of the plasma in the compact torus]. D.Sc. Diss. Moscow. 272 p.

Kozhunova, O. S. 2009. Tekhnologiya razrabotki semanticheskogo slovarya informacionnogo monitoringa [Technology of development of semantic dictionary of information monitoring system]. PhD Thesis. Moscow: IPI RAN. 23 p.

**Описание ГОСТа:**

GOST 8.586.5-2005. 2007. Metodika vypolneniya izmereniy. Izmerenie raskhoda i kolichestva zhidkostey i gazov s pomoshch'yu standartnykh suzhayushchikh ustroystv [Method of measurement. Measurement of flow rate and volume of liquids and gases by means of orifice devices]. Moscow: Standardinform Publs. 10 p.

**Описание патента:**

Bolshakov, M. V., A. V. Kulakov, A. N. Lavrenov, and M. V. Palkin. 2006. Sposob orientirovaniya po krenu letatel'nogo apparata s opticheskoy golovkoj samonavedeniya [The way to orient on the roll of aircraft with optical homing head]. Patent RF No. 2280590.

10. Присланные в редакцию материалы авторам не возвращаются.
11. При отправке файлов по электронной почте просим придерживаться следующих правил:
  - указывать в поле subject (тема) название журнала и фамилию автора;
  - использовать attach (присоединение);
  - в состав электронной версии статьи должны входить: файл, содержащий текст статьи, и файл(ы), содержащий(е) иллюстрации.
12. Журнал «Системы и средства информатики» является некоммерческим изданием. Плата за публикацию не взимается, гонорар авторам не выплачивается.

**Адрес редакции журнала «Системы и средства информатики»:**

Москва 119333, ул. Вавилова, д. 44, корп. 2, ФИЦ ИУ РАН

Тел.: +7 (499) 135-86-92 Факс: +7 (495) 930-45-05

e-mail: [rust@ipiran.ru](mailto:rust@ipiran.ru) (Сейфулль-Мулюков Рустем Бадриевич)

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

---

## Requirements for manuscripts submitted to Journal “Systems and Means of Informatics”

---

Journal “Systems and Means of Informatics” publishes theoretical, review, and discussion articles on the research and development in the field of information technology.

The journal is published in Russian. By a special decision of the editorial board, some articles can be published in English.

Topics covered include the following areas:

- information and communication systems and tools of their design;
- architecture and software of computational complexes and networks; and
- methods and tools of information protection.

1. The Journal publishes original articles which have not been published before and are not intended for simultaneous publication in other editions. An article submitted to the Journal must not violate the Copyright law. Sending the manuscript to the Editorial Board, the authors retain all rights of the owners of the manuscript and transfer the nonexclusive rights to publish the article in Russian (or the language of the article, if not Russian) and its distribution in Russia and abroad to the Founders and the Editorial Board. Authors should submit a letter to the Editorial Board in the following form:

***Agreement on the transfer of rights to publish:***

*“We, the undersigned authors of the manuscript “. . .,” pass to the Founder and the Editorial Board of the Journal “Systems and Means of Informatics” the nonexclusive right to publish the manuscript of the article in Russian (or in English) in both print and electronic versions of the Journal. We affirm that this publication does not violate the Copyright of other persons or organizations.”*

*Author(s) signature(s): (name(s), address(es), date).”*

This agreement should be submitted in paper form or in the form of a scanned copy (signed by the authors).

The Editorial Board has the right to request from the authors an official expert conclusion that the submitted article has no classified data prohibited for publication.

2. A submitted article should be attached with **the data on the author(s)** (see item 8). If there are several authors, the contact person should be indicated who is responsible for correspondence with the Editorial Board and other authors about revisions and final approval of the proofs.
3. The Editorial Board of the Journal examines the article according to the established reviewing procedure. If authors receive their article for correction after reviewing, it does not mean that the article is approved to be published. The corrected article should be sent to the Editorial Board for the subsequent review and approval.
4. The decision on the article publication or its rejection is communicated to the authors. The Editorial Board may also send the reviews on the submitted articles to the authors. Any discussion upon the rejected articles is not possible.
5. The edited articles will be sent to the authors for proofread. The comments of the authors to the edited text of the article should be sent to the Editorial Board as soon as possible.
6. The manuscript of the article should be presented electronically in the MS WORD (.doc or .docx) or L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X (.tex) formats, and additionally in the .pdf format. All documents

may be sent by e-mail or provided on a CD or diskette. A hard copy submission is not necessary.

7. The recommended typesetting instructions for manuscript.

Pages parameters: format A4, portrait orientation, document margins (cm): left — 2.5, right — 1.5, above — 2.0, below — 2.0, footer 1.3.

Text: font —Times New Roman, font size — 14, paragraph indent — 0.5, line spacing — 1.5, justified alignment.

The recommended manuscript size: not more than 15 pages of the specified format. If the specified size exceeded, the editorial board is entitled to require the author to reduce the manuscript.

Use only standard abbreviations. Avoid abbreviations in the title and abstract. The full term for which an abbreviation stands should precede its first use in the text unless it is a standard unit of measurement.

All pages of the manuscript should be numbered.

The templates for the manuscript typesetting are presented on site:

<http://www.ipiran.ru/publication/collected/template.doc>

8. Articles should enclose data both in **Russian and English**:

- title;
- author's name and surname;
- affiliation — organization, its address with ZIP code, city, country, and official e-mail address;
- data on authors according to the format (see site):  
[http://www.ipiran.ru/journal/collected/2012\\_22\\_02\\_rus/authors.asp](http://www.ipiran.ru/journal/collected/2012_22_02_rus/authors.asp) and  
[http://www.ipiran.ru/journal/collected/2012\\_22\\_02\\_eng/authors.asp](http://www.ipiran.ru/journal/collected/2012_22_02_eng/authors.asp);
- abstract (not less than 100 words) both in Russian and in English. Abstract is a short summary of the article that can be published separately. The abstract is the main source of information on the article and it could be included in leading information systems and data bases. The abstract in English has to be an original text and should not be an exact translation of the Russian one. Good English is required. In abstracts, avoid references and formulae.
- Indexing is performed on the basis of keywords. The use of keywords from the internationally accepted thematic Thesauri is recommended.  
Important! Keywords must not be sentences.
- Acknowledgments.

9. References. Russian references have to be presented both in English translation and in Latin transliteration (refer <http://www.translit.net/ru/bgn/>).

Please take into account the following examples of Russian references appearance:

**Article in journal:**

Zhang, Z., and D. Zhu. 2008. Experimental research on the localized electrochemical micromachining. *Rus. J. Electrochem.* 44(8):926–930. doi:10.1134/S1023193508080077.

**Journal article in electronic format:**

Swaminathan, V., E. Lepkoswka-White, and B. P. Rao. 1999. Browsers or buyers in cyberspace? An investigation of electronic factors influencing electronic

exchange. *JCMC* 5(2). Available at: <http://www.ascusc.org/jcmc/vol5/issue2/> (accessed April 28, 2011).

**Conference proceedings:**

Usmanov, T. S., A. A. Gusmanov, I. Z. Mullagalin, R. Ju. Muhametshina, A. N. Chervyakova, and A. V. Sveshnikov. 2007. Osobennosti proektirovaniya razrabotki mestorozhdeniy s primeneniem gidrorazryva plasta [Features of the design of field development with the use of hydraulic fracturing]. *Trudy 6-go Mezhdunarodnogo Simpoziuma "Novye resursosberegayushchie tekhnologii nedropol'zovaniya i povышeniya neftegazootdachi"* [6th Symposium (International) "New Energy Saving Subsoil Technologies and the Increasing of the Oil and Gas Impact" Proceedings]. Moscow. 267–272.

**Books and other monographs:**

Lindorf, L. S., and L. G. Mamikonants, eds. 1972. *Ekspluatatsiya turbogeneratorov s neposredstvennym okhlazhdeniem* [Operation of turbine generators with direct cooling]. Moscow: Energy Publs. 352 p.

**Dissertation and Thesis:**

Kozhunova, O. S. 2009. Tekhnologiya razrabotki semanticheskogo slovarya informatsionnogo monitoringa [Technology of development of semantic dictionary of information monitoring system]. PhD Thesis. Moscow: IPI RAN. 23 p.

**State standards and patents:**

GOST 8.586.5-2005. 2007. Metodika vypolneniya izmereniy. Izmerenie raskhoda i kolichestva zhidkostey i gazov s pomoshch'yu standartnykh suzhayushchikh ustroystv [Method of measurement. Measurement of flow rate and volume of liquids and gases by means of orifice devices]. M.: Standardinform Publs. 10 p.

Bolshakov, M. V., A. V. Kulakov, A. N. Lavrenov, and M. V. Palkin. 2006. Sposob orientirovaniya po krenu letatel'nogo apparata s opticheskoy golovkoj samonavedeniya [The way to orient on the roll of aircraft with optical homing head]. Patent RF No. 2280590.

References in Latin transcription are presented in the original language.

References in the text are numbered according to the order of their first appearance; the number is placed in square brackets. All items from the reference list should be cited.

10. Manuscripts and additional materials are not returned to Authors by the Editorial Board.
11. Submissions of files by e-mail must include:
  - the journal title and author's name in the "Subject" field;
  - an article and additional materials have to be attached using the "attach" function;
  - an electronic version of the article should contain the file with the text and a separate file with figures.
12. "System and Means of Informatics" journal is not a profit publication. There are no charges for the authors as well as there are no royalties.

**Editorial Board address:**

FRC CSC RAS, 44, block 2, Vavilov Str., Moscow 119333, Russia

Ph.: +7 (499)135 86 92, Fax: +7 (495)930 45 05

e-mail: [rust@ipiran.ru](mailto:rust@ipiran.ru) (to Prof. Rustem Seyful-Mulyukov)

[http://www.ipiran.ru/english/journal\\_systems.asp](http://www.ipiran.ru/english/journal_systems.asp)

# **SYSTEMS AND MEANS OF INFORMATICS (СИСТЕМЫ И СРЕДСТВА ИНФОРМАТИКИ)**

**SCIENTIFIC JOURNAL**

**Volume 28 No.3 Year 2018**

**Editor-in-Chief and Chair of Editorial Council**  
Academician I. A. Sokolov

## **I N T H I S I S S U E:**

ANALYTICAL MODELING OF DISTRIBUTIONS WITH INVARIANT MEASURE  
IN VOLTERRA STOCHASTIC SYSTEMS

**I. N. Sinitsyn and V. I. Sinitsyn**

4

CHOOSING SERVER SOLUTION FOR DIGITAL PLATFORM  
OF TEXT SEARCH AND ANALYSIS

**V. Yadrintsev, K. Klyubina, I. Tikhomirov, and A. Gershel'man**

26

ANALYTICAL INFORMATION SYSTEMS PERFORMANCE ANALYSIS:  
METHODOLOGY FOR TIMETABLE AND STAFF QUANTITY EVALUATION

**A. V. Borisov, A. V. Bosov, A. V. Ivanov, and A. I. Stefanovich**

39

BETA-POLYNOMIAL *A PRIORI* DENSITIES IN BAYESIAN RELIABILITY MODELS  
**A. A. Kudryavtsev, S. I. Palionnaia, and S. Ya. Shorgin**

54

FORECASTING MOMENTS OF FINITE NORMAL MIXTURES  
USING FEEDFORWARD NEURAL NETWORKS

**A. K. Gorshenin and V. Yu. Kuzmin**

62

EVALUATION OF THE WAVEFORM IN THE MAGNETOENCEPHALOGRAPHIC  
SIGNALS WITH NOISE IN THE FORM OF A FINITE NORMAL MIXTURE

**M. B. Goncharenko**

72

ANALYSIS OF RELATIONSHIPS BETWEEN INDICATORS  
IN FORECASTING CARGO TRANSPORTATION

**K. R. Usmanova, S. P. Kudiyarov, R. V. Martyshkin,  
A. A. Zamkovoy, and V. V. Strijov**

86

SOME ASPECTS OF CLOUD COMPUTING EFFICIENCY ESTIMATION  
**A. A. Zatsarinny, Yu. S. Ionenkov, and A. P. Suchkov**

104

ANALYSIS OF THE INTERDEPARTMENTAL INFORMATION  
EXCHANGE PROCESSES

**A. P. Suchkov**

118

ARCHITECTURE OF THE SERVICE DELIVERY SYSTEM  
FOR THE RESEARCH SERVICES DIGITAL PLATFORM

**V. A. Kondrashev**

131