

# **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

## **Учредители:**

**Российская академия наук**

**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, Rostok, Germany)

## **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.т.н. В. Д. Ильин д.ф.-м.н. В. И. Синицын

проф., д.ф.-м.н. Л. А. Калиниченко проф., д.т.н. И. Н. Синицын

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

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 (ответственный секретарь)

© Федеральный исследовательский центр «Информатика  
и управление» Российской академии наук, 2017

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 27 № 1 Год 2017**

## **СОДЕРЖАНИЕ**

Аналитическое моделирование нормальных процессов  
в стохастических системах с эллиптическими нелинейностями

**И. Н. Синицын** 3

Параметрическое аналитическое моделирование процессов  
в стохастических системах, не разрешенных относительно  
производных

**И. Н. Синицын** 20

Макет интероперабельной информационно-аналитической системы  
для обеспечения пространственного и семантического поиска  
и анализа геоданных

**С. К. Дулин, Н. Г. Дулина, В. В. Косарик, Д. А. Никишин** 46

Портал MSM Tools как гетерогенный вычислительный сервис  
**А. К. Горшенин, В. Ю. Кузьмин** 60

О некоторых подходах к представлению научных исследований  
как облачного сервиса

**К. И. Волович, А. А. Зацаринный, В. А. Кондрашев,  
А. П. Шабанов** 73

Полнофункциональный процессный подход к реализации систем  
ситуационного управления

**А. П. Сучков** 85

Об основных типах связности между текстовыми документами  
**М. М. Шарнин, Н. В. Сомин** 100

Способ организации обработки пакетов в интегрированных сетевых  
процессорах

**В. Б. Егоров** 108

Оказание медицинской помощи населению с использованием  
мобильных телемедицинских систем

**Г. Я. Илюшин, В. И. Лиманский** 122

Прикладные аспекты когнитивного моделирования  
при проектировании сложных информационных систем

**Г. В. Лукьянов, Д. А. Никишин** 134

Облачный сервис решения задач химической кинетики  
с использованием параллельных вычислений

**М. В. Сахибгареева, Е. И. Глущенко, Л. В. Еникеева,  
Г. М. Шарипова** 155

Информатика: предмет и области исследований  
**В. Д. Ильин** 167

Об авторах 178

Правила подготовки рукописей статей 180

Requirements for manuscripts 184

## АНАЛИТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НОРМАЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ В СТОХАСТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ С ЭЛЛИПТИЧЕСКИМИ НЕЛИНЕЙНОСТЯМИ\*

*И. Н. Синицын<sup>1</sup>*

**Аннотация:** На основе приближенных методов статистической линеаризации (МСЛ) и нормальной аппроксимации (МНА) разработано методическое и алгоритмическое обеспечение аналитического моделирования нормальных (гауссовских) процессов в дифференциальных стохастических системах (СтС) с нелинейностями, описываемыми эллиптическими функциями Якоби. Алгоритмы положены в основу разрабатываемого инструментального программного обеспечения и комплекса тестовых примеров. В качестве тестового примера рассмотрена динамика осциллятора Якоби в стохастической среде. Приведены необходимые сведения из теории эллиптических интегралов и эллиптических функций Якоби, а также коэффициенты МСЛ и МНА при  $m \neq 0$  и  $m = 0$ . Результаты допускают обобщения на СтС с другими типами эллиптических нелинейностей, описываемых функциями Вейерштрасса, этата-функциями и др.

**Ключевые слова:** аналитическое моделирование; метод нормальной аппроксимации (МНА); метод статистической линеаризации (МСЛ); стохастическая система (СтС); эллиптическая нелинейность Якоби (ЭНЯ); эллиптический осциллятор Якоби (ЭОЯ)

**DOI:** 10.14357/08696527170101

### 1 Введение

В [1–3] начат цикл статей по методам и инструментальным программным средствам аналитического моделирования процессов в СтС со сложными нелинейностями, описываемыми такими специальными функциями, как Бесселевы целого и дробного порядка, а также связанными с ними функциями.

Продолжим [1–3] и рассмотрим типовые эллиптические нелинейности Якоби (ЭНЯ); МСЛ ЭНЯ (см. разд. 2 и приложения П1 и П2); МНА и МСЛ для сложных СтС с ЭНЯ (см. разд. 3). В качестве тестового примера рассмотрим динамику эллиптического осциллятора Якоби (ЭОЯ) в стохастической среде

\*Работа выполнена при финансовой поддержке Программы III.3 «Отделения нанотехнологий и информационных технологий РАН» (№ 0063-2016-0018).

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

(см. разд. 4). В заключении сформулированы основные выводы и возможные обобщения.

## 2 Эллиптические нелинейности Якоби и их статистическая линеаризация

Как известно [4, 5], эллиптическая функция Якоби  $\mathcal{E}(u) = pqu$  определяется через эллиптический интеграл первого рода (см. приложение П1):

$$F(\varphi, k^2) = \int_0^\varphi \frac{dt}{\sqrt{1 - k^2 \sin^2 t}},$$

где  $k$  — модуль интеграла;  $\varphi$  — амплитуда. Пусть

$$u = \int_0^\varphi \sqrt{1 - k^2 \sin^2 t} dt, \quad \varphi = am u.$$

Тогда 12 эллиптических функций Якоби определяются следующими формулами:

$$\begin{aligned} \text{snu} &= \sin \varphi; \quad \text{cnu} = \cos \varphi; \quad \text{dnu} = \Delta(\varphi) = \sqrt{1 - k^2 \sin^2 t}; \\ \text{cd}u &= \frac{\text{cnu}}{\text{dnu}}; \quad \text{dc}u = \frac{\text{dnu}}{\text{cnu}}; \quad \text{ns}u = \frac{1}{\text{snu}}; \quad \text{sd}u = \frac{\text{snu}}{\text{dnu}}; \quad \text{nc}u = \frac{1}{\text{cnu}}; \\ \text{ds}u &= \frac{\text{dnu}}{\text{snu}}; \quad \text{nd}u = \frac{1}{\text{dnu}}; \quad \text{sc}u = \frac{\text{snu}}{\text{cnu}}; \quad \text{cs}u = \frac{\text{cnu}}{\text{snu}}. \end{aligned}$$

В общем случае, если  $p, q, r$  являются любыми тремя буквами из четырех букв  $s, c, d, u$ , то  $pqu/qru$  ( $pr u \equiv 1$ ),  $pqu = 1/qru$ .

Обозначим через  $\mathbf{K}$  и  $\mathbf{K}'$  полные эллиптические интегралы, когда  $\varphi = \pi/2$ :

$$\mathbf{K}(k) = F\left(\frac{\pi}{2}, k\right) = \mathbf{K}'(k'); \quad k' = \sqrt{1 - k^2}; \quad \mathbf{K}'(k) = F\left(\frac{\pi}{2}, k'\right) = \mathbf{K}(k')$$

и дополнительные параметры Якоби  $q$  и  $q'$ :

$$q = q(k^2) = \exp\left(-\frac{\pi \mathbf{K}'}{\mathbf{K}}\right); \quad q' = q'(k^2) = \exp\left(-\frac{\pi \mathbf{K}}{\mathbf{K}'}\right).$$

Тогда разложение в ряд по параметру Якоби и аргументу  $v$  ( $v = \pi u / (2\mathbf{K})$ ) имеет следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{sn}(u | k^2) &= \frac{2\pi}{k\mathbf{K}} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{q^{n+1/2}}{1 - q^{2n+1}} \sin[(2n+1)v] ; \\ \operatorname{cn}(u | k^2) &= \frac{2\pi}{k\mathbf{K}} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{q^{n+1/2}}{1 + q^{2n+1}} \cos[(2n+1)v] ; \\ \operatorname{dn}(u | k^2) &= \frac{\pi}{2\mathbf{K}} + \frac{2\pi}{\mathbf{K}} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{q^n}{1 + q^{2n}} \cos(2nv) ; \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \operatorname{cd}(u | k^2) &= \frac{2\pi}{k\mathbf{K}} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n q^{n+1/2}}{1 - q^{2n+1}} \cos[(2n+1)v] ; \\ \operatorname{sd}(u | k^2) &= \frac{2\pi}{\sqrt{k^2(1-k^2)}\mathbf{K}} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n q^{n+1/2}}{1 + q^{2n+1}} \sin[(2n+1)v] ; \\ \operatorname{nd}(u | k^2) &= \frac{\pi}{2\sqrt{1-k^2}\mathbf{K}} + \frac{2\pi}{\sqrt{1-k^2}\mathbf{K}} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n q^n}{1 + q^{2n}} \cos(2nv) ; \\ \operatorname{dc}(u | k^2) &= \frac{\pi}{k\mathbf{K}} \sec v + \frac{2\pi}{\mathbf{K}} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n q^{2n+1}}{1 - q^{2n+1}} \cos[(2n+1)v] ; \\ \operatorname{nc}(u | k^2) &= \frac{\pi}{\sqrt{1-k^2}\mathbf{K}} \sec v - \frac{2\pi}{\sqrt{1-k^2}\mathbf{K}} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n q^{2n+1}}{1 + q^{2n+1}} \cos[(2n+1)v] ; \\ \operatorname{sc}(u | k^2) &= \frac{\pi}{2\sqrt{1-k^2}\mathbf{K}} \operatorname{tg} v + \frac{2\pi}{\sqrt{1-k^2}\mathbf{K}} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n q^{2n}}{1 + q^{2n}} \sin(2nv) ; \\ \operatorname{ns}(u | k^2) &= \frac{\pi}{2\mathbf{K}} \operatorname{cosec} v - \frac{2\pi}{\mathbf{K}} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{q^{2n+1}}{1 - q^{2n+1}} \sin[(2n+1)v] ; \\ \operatorname{ds}(u | k^2) &= \frac{\pi}{2\mathbf{K}} \operatorname{cosec} v - \frac{2\pi}{\mathbf{K}} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{q^{2n+1}}{1 + q^{2n+1}} \sin[(2n+1)v] ; \\ \operatorname{cs}(u | k^2) &= \frac{\pi}{2\mathbf{K}} \operatorname{ctg} v - \frac{2\pi}{\mathbf{K}} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{q^{2n+1}}{1 + q^{2n}} \sin(2nv) . \end{aligned}$$

Теоремы сложения, удвоения для половинных аргументов, а также формулы для производных и интегралов даны в приложении П2.

Рассмотрим скалярную ЭНЯ следующего вида:

$$Z = \Theta(Y, t). \quad (2)$$

Применим статистическую линеаризацию ЭНЯ по Казакову [6–8] при действительном несимметричном ( $m_y \neq 0$ ) гауссовском (нормальном) входном сигнале  $Y_t$ :

$$Y_t = Y(t) = m_y + Y_t^0, \quad Y_t^0 = Y_t - m_y,$$

где  $m_y = \mathbf{M}Y_t$  — математическое ожидание;  $D_y = \mathbf{M}(Y_t^0)^2$  — дисперсия;  $Y_t^0$  — центрированная составляющая. В соответствии с МСЛ зависимость (2) аппроксимируется следующим выражением:

$$Z_t = \Theta_0(m_y, D_y, t) + k_1^{\vartheta}(m_y, D_y, t) Y_t^0.$$

Здесь  $\Theta_0 = \Theta_0(m_y, D_y, t)$  и  $k_1^{\vartheta} = k_1^{\vartheta}(m_y, D_y, t)$  — коэффициенты МСЛ для (2), определяемые по формулам:

$$\left. \begin{aligned} \Theta_0 &= \frac{1}{\sqrt{2\pi D_y}} \int_{-\infty}^{\infty} \Theta(\eta, t) \exp \left[ -\frac{(\eta - m_y)^2}{2D_y} \right] d\eta; \\ k_1^{\vartheta} &= \frac{1}{\sqrt{2\pi D_y}} \int_{-\infty}^{\infty} (\eta - m_y) \Theta(\eta, t) \exp \left[ -\frac{(\eta - m_y)^2}{2D_y} \right] d\eta. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Для нечетных ЭНЯ первая формула (3) принимает вид:

$$\Theta_0 = k_0^{\vartheta} m_y, \quad k_0^{\vartheta} = \frac{1}{m_y \sqrt{2\pi D_y}} \int_{-\infty}^{\infty} \Theta(\eta, t) \exp \left[ -\frac{(\eta - m_y)^2}{2D_y} \right] d\eta.$$

В случае векторных и матричных ЭНЯ полученные формулы имеют место для соответствующих компонент.

В приложении П3 приведены выражения для коэффициентов статистической линеаризации ЭНЯ, полученные на основе (1) при  $m_y = 0$  и  $m_y \neq 0$ .

### 3 Алгоритмы аналитического моделирования нормальных процессов в стохастических системах с эллиптическими нелинейностями Якоби

Уравнения конечномерных непрерывных нелинейных систем со стохастическими возмущениями путем расширения вектора состояния СтС могут быть

записаны в виде следующего векторного стохастического дифференциального уравнения Ито [6–8]:

$$dY_t = a^0(Y_t, t) dt + b^0(Y_t, t) dW_0 + \int_{R_0} c^0(Y_t, t, v) P^0(dt, dv), \quad Y(t_0) = Y_0. \quad (4)$$

Здесь  $Y_t$  —  $(p \times 1)$ -мерный вектор состояния,  $Y_t \in \Delta_y$  ( $\Delta_y$  — многообразие состояний);  $a^0 = a^0(Y_t, t)$  и  $b^0 = b^0(Y_t, t)$  — известные  $(p \times 1)$ -мерная и  $(p \times m)$ -мерная функции  $Y_t$  и  $t$ ;  $W_0 = W_0(t)$  —  $(r \times 1)$ -мерный винеровский стохастический процесс (СтП) интенсивности  $\nu_0 = \nu_0(t)$ ;  $c^0 = c^0(Y_t, t, v)$  —  $(p \times 1)$ -мерная функция  $Y_t$ ,  $t$  и вспомогательного  $(q \times 1)$ -мерного параметра  $v$ ;  $\int_{\Delta} dP^0(t, A)$  — центрированная пуассоновская мера, определяемая следующим образом:

$$\int_{\Delta} dP^0(t, A) = \int_{\Delta} dP(t, A) = \int_{\Delta} \nu_P(t, A) dt.$$

При этом принято:  $\int_{\Delta}$  — число скачков пуассоновского СтП в интервале времени  $\Delta = (t_1, t_2]$ ;  $\nu_P(t, A)$  — интенсивность пуассоновского СтП  $P(t, A)$ ;  $A$  — некоторое борелевское множество пространства  $R_0^q$  с выколотым началом. Начальное значение  $Y_0$  представляет собой случайную величину, не зависящую от приращений  $W_0(t)$  и  $P(t, A)$  на интервалах времени, следующих за  $t_0$ ,  $t_0 \leq t_1 \leq t_2$ , для любого множества  $A$ . Элементы векторно-матричных функций  $a(Y_t, t)$ ,  $b(Y_t, t)$  и  $c(Y_t, t, v)$  являются сложные бесселевые нелинейности дробного порядка.

В случае аддитивных гауссовских (нормальных) и обобщенных пуассоновских возмущений уравнение (4) принимает вид [6–8]:

$$\dot{Y} = a^0(Y_t, t) + b_0(t)V, \quad V = \dot{W}, \quad Y(t_0) = Y_0. \quad (5)$$

Здесь  $W$  — СтП с независимыми приращениями, представляющий собой смесь нормального и обобщенного пуассоновского СтП.

Если существуют конечные вероятностные моменты второго порядка для моментов времени  $t_1$  и  $t_2$ , то уравнения МНА примут следующий вид [6–8]:

— для характеристических функций:

$$\left. \begin{aligned} g_1^N(\lambda; t) &= \exp \left[ i\lambda^T m_t - \frac{1}{2} \lambda^T K_t \lambda \right]; \\ g_{t_1, t_2}^N(\lambda_1, \lambda_2; t_1, t_2) &= \exp \left[ i\bar{\lambda}^T \bar{m}_2 - \frac{1}{2} \bar{\lambda}^T \bar{K}_2 \bar{\lambda} \right], \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

где

$$\bar{\lambda} = [\lambda_1^T \lambda_2^T]^T; \quad \bar{m}_2 = [m_{t_1}^T m_{t_2}^T]^T; \quad \bar{K}_2 = \begin{bmatrix} K(t_1, t_1) & K(t_1, t_2) \\ K(t_2, t_1) & K(t_2, t_2) \end{bmatrix};$$

- для математических ожиданий  $m_t$ , ковариационной матрицы  $K_t$  и матрицы ковариационных функций  $K(t_1, t_2)$ :

$$\left. \begin{aligned} \dot{m}_t &= a_1^{\circ}(m_t, K_t, t), & m_0 &= m(t_0); \\ \dot{K}_t &= a_2^{\circ}(m_t, K_t, t), & K_0 &= K(t_0); \\ \frac{\partial K(t_1, t_2)}{\partial t_2} &= K(t_1, t_2) a_{21}(m_{t_2}, K_{t_2}, t_2)^T, & K(t_1, t_1) &= K_{t_1}. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Здесь приняты следующие обозначения:

$$\left. \begin{aligned} m_t &= M_{\Delta_y}^N[Y_t]; & Y_t^0 &= Y_t - m_t; \\ K_t &= M_{\Delta_y}^N[Y_t^0 Y_t^{0T}], & K(t_1, t_2) &= M_{\Delta_y}^N[Y_{t_1}^0 Y_{t_2}^{0T}]; \\ a_1^{\circ} &= a_1^{\circ}(m_t, K_t, t) = M_{\Delta_y}^N[a^{\circ}(Y_t, t)]; \\ a_2^{\circ} &= a_2^{\circ}(m_t, K_t, t) = a_{21}^{\circ}(m_t, K_t, t) + a_{21}^{\circ}(m_t, K_t, t)^T + a_{22}^{\circ}(m_t, K_t, t); \\ a_{21}^{\circ} &= a_{21}^{\circ}(m_t, K_t, t) = M_{\Delta_y}^N[a^{\circ}(Y_t, t) Y_t^{0T}]; \\ a_{22}^{\circ} &= a_{22}^{\circ}(m_t, K_t, t) = M_{\Delta_y}^N[\bar{\sigma}^{\circ}(Y_t, t)]; \\ \sigma^{\circ}(Y_t, t) &= b^{\circ}(Y_t, t) \nu_0(t) b^{\circ}(Y_t, t)^T; \\ \bar{\sigma}(Y_t, t) &= \sigma^{\circ}(Y_t, t) + \int_{R_0^q} c^{\circ}(Y_t, t, v) c^{\circ}(Y_t, t, v)^T \nu_P(t, dv), \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

где  $M_{\Delta_y}^N$  — символ вычисления математического ожидания для нормальных распределений (6) на гладком многообразии  $\Delta_y$ .

Для стационарных СтС нормальные стационарные СтП — если они существуют, то  $m_t = m^*$ ,  $K_t = K^*$ ,  $K(t_1, t_2) = k(\tau)$  ( $\tau = t_1 - t_2$ ), — определяются уравнениями [6–8]:

$$\left. \begin{aligned} a_1^{\circ}(m^*, K^*) &= 0; & a_2^{\circ}(m^*, K^*) &= 0; \\ \dot{k}_{\tau}(\tau) &= a_{21}^{\circ}(m^*, K^*) K^{*-1} k(\tau); & k(0) &= K^* \ (\forall \tau > 0); \\ k(\tau) &= k(-\tau)^T \ (\forall \tau < 0). \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

При этом необходимо, чтобы матрица  $a_{21}^{\circ}(m^*, K^*) = a_{21}^{2*}$  была асимптотически устойчивой.

В случае СтС (5) уравнения МНА переходят в известные уравнения МСЛ [6–8]:

$$\left. \begin{aligned} \dot{m}_t &= a_1^{\circ}(m_t, K_t, t), \quad m_0 = m(t_0); \\ \dot{K}_t &= k_1^{\circ a}(m_t, K_t, t) K_t + K_t k_1^{\circ a}(m_t, K_t, t)^T + \sigma_0(t), \quad K_0 = K(t_0); \\ \frac{\partial K(t_1, t_2)}{\partial t_2} &= K(t_1, t_2) K_{t_2} k_1^{\circ a}(m_{t_2}, K_{t_2}, t_2)^T, \quad K(t_1, t_2) = K_{t_1}, \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

где

$$\begin{aligned} a^{\circ}(Y_t, t) &= a_0^{\circ}(m_t, K_t) + k_1^{\circ a}(m_t, K_t) Y_t^0; \\ k_1^{\circ a}(m_t, K_t, t) &= \left[ \left( \frac{\partial}{\partial m_t} \right) a_0^{\circ}(m_t, K_t, t)^T \right]^T; \\ b^{\circ}(Y_t, t) &= b_0^{\circ}(t); \quad \sigma^{\circ}(Y_t, t) = b_0^{\circ}(t) \nu(t) b_0^{\circ}(t)^T = \sigma_0^{\circ}(t). \end{aligned}$$

При условии асимптотической устойчивости матрицы  $k_1^a(m^*, K^*)$  для стационарных СтС (5) в основе МСЛ лежат уравнения (9), записанные в виде:

$$\left. \begin{aligned} a_0^{\circ}(m^*, K^*) &= 0; \quad k_1^{\circ a}(m^*, K^*) K^* + K^* k_1^{\circ a}(m^*, K^*)^T + \bar{\sigma}_0 = 0; \\ \dot{k}_{\tau}(\tau) &= k_1^{\circ a}(m^*, K^*) k(\tau); \quad k(0) = K^* \quad (\forall \tau > 0); \\ k(\tau) &= k(-\tau)^T \quad (\forall \tau < 0). \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Таким образом, приходим к следующим алгоритмам МНА и МСЛ.

- Если существуют интегралы (8), то уравнения (6) и (7) лежат в основе нестационарных алгоритмов методов аналитического моделирования (МАМ) для негауссовых СтС (4), а уравнения (10) — для негауссовых СтС (5).
- Если СтС (4) и (5) стационарны и существует стационарный нормальный процесс и матрица  $a_{21}^*$  асимптотически устойчива, то уравнения (9) и (11) лежат в основе стационарных алгоритмов МАМ.

Наконец, отметим, что для гауссовых СтС алгоритмы упрощаются, если принять  $c^{\circ}(Y_t, t, v) \equiv 0$  в (4) и  $V = V_0$ ,  $\nu^V = v^{V_0}$  в (5).

Для алгоритмизации МНА необходимо уметь вычислять следующие интегралы:

$$\begin{aligned} I_0^{\circ a} &= I_0^{\circ a}(m_t, K_t, t) = a_1^{\circ}(m_t, K_t, t) = M_{\Delta_y}^N [a^{\circ}(Y_t, t)]; \\ I_1^{\circ a} &= I_1^{\circ a}(m_t, K_t, t) = a_{21}^{\circ}(m_t, K_t, t) = M_{\Delta_y}^N \left[ a^{\circ}(Y_t, t) Y_t^{0T} \right]; \\ I_0^{\circ \bar{\sigma}} &= I_0^{\circ \bar{\sigma}}(m_t, K_t, t) = a_{22}^{\circ}(m_t, K_t, t) = M^N [\bar{\sigma}^{\circ}(Y_t, t)], \end{aligned} \quad (12)$$

а для МСЛ достаточно вычислить первый интеграл в (12), причем интеграл  $I_1^{\circ a}$  вычисляется по формуле [6–8]:

$$k_1^{\circ a} = k_1^a(m_t, K_t, t) = \left[ \left( \frac{\partial}{\partial m_t} \right) I_0^{\circ a}(m_t, K_t, t)^T \right]^T.$$

Уравнения МНА (МСЛ) содержат интегралы  $I_0^{\vartheta a}$ ,  $I_1^{\vartheta a}$  и  $I_0^{\vartheta \sigma}$  в виде соответствующих коэффициентов. Поэтому процедура вычисления интегралов должна быть согласована с методом численного решения обыкновенных дифференциальных уравнений для  $t_t$ ,  $K_t$  и  $K(t_1, t_2)$ . Эти коэффициенты допускают дифференцирование по  $t_t$  и  $K_t$ , так как под интегралом стоит сглаживающая нормальная плотность.

В [9] изложены алгоритмы дискретного аналитического и статистического моделирования типовых распределений (в том числе нормальных) в нелинейных СтС на многообразиях. Алгоритмы дискретного аналитического и статистического моделирования для СтС со сложной эллиптической нелинейностью, а также смешанные алгоритмы различной степени точности относительно шага интегрирования также представлены в [9].

#### 4 Эллиптический осциллятор Якоби в стохастической среде

Рассмотрим нелинейную двумерную СтС, описываемую следующими уравнениями:

$$\left. \begin{aligned} \dot{Y}_1 &= Y_2; & \dot{Y}_2 &= -\omega_0^2 \Theta(Y_1) + L_0 - 2\varepsilon\omega_0 Y_2 + h^2 V; \\ Y_1(t_0) &= Y_{10}; & Y_2(t_0) &= Y_{20}. \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

Здесь  $Y_1$  и  $Y_2$  — координата и скорость;  $\Theta(Y_1)$  — эллиптическая функция Якоби, определяющая ЭОЯ;  $L_0$  — постоянная или медленно меняющаяся на интервале времени  $T = 2\pi\omega_0^{-1}$  величина;  $-2\varepsilon\omega_0 Y_2$  — линейная диссипативная составляющая;  $h^2 V$  — стохастическая составляющая, представляющая собой нормальный белый шум интенсивности  $h^2\nu$ ;  $\varepsilon$ ,  $h$  и  $\omega_0^2$  — постоянные параметры;  $Y_{10}$  и  $Y_{20}$  — нормальные независимые начальные координата и скорость.

При  $L_0 = 0$ ,  $\varepsilon = 0$ ,  $h = 0$  и  $\Theta(Y_1) = \operatorname{sn} Y_1$  уравнения фазового портрета ЭОЯ и интеграл сохранения энергии, если учесть выражение для интеграла от  $\operatorname{sn} Y$  (см. приложение П2), имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} \frac{dY_2}{dY_1} &= -\frac{\omega_0^2 \operatorname{sn} Y_1}{Y_2}; \\ \mathcal{H} = \mathcal{H}(Y_1, Y_2) &= \frac{Y_2^2}{2} - \omega_0^2 \Pi^{\vartheta}(Y_1) = \text{const}; \end{aligned} \quad (14)$$

$$\Pi^{\vartheta}(Y_1) = \frac{1}{k} \ln (\operatorname{dn} Y_1 - k \operatorname{cn} Y_1). \quad (15)$$

При  $\varepsilon > 0$  и  $L_0 = 0$  по теореме Гиббса [6–8] уравнения (13) допускают стационарный стохастический режим с одномерной плотностью:

$$f_1^*(y_1, y_2) = c \exp \left[ -\frac{4\varepsilon\omega_0^2}{\nu} \mathcal{H}(y_1, y_2) \right]. \quad (16)$$

Из (14) и (15) следует, что точное одномерное распределение ЭОЯ по скорости  $Y_2$  является гауссовским, а по координате  $Y_1$  негауссовским следующего вида:

$$f_1^*(y_1) = c_1 \exp \left[ -\frac{4\varepsilon\omega_0^2}{\nu} \Pi^*(y_1) \right], \quad (17)$$

где функция  $\Pi^*(y_1)$  определена (15).

Аналогично, пользуясь формулами приложения П2 для  $\Theta(Y_1) = \operatorname{cn} Y_1$  и  $\operatorname{dn} Y_1$ , получаем формулы (16) и (17), если учесть соотношения:

$$\Pi^{\operatorname{cn}}(Y_1) = k^{-1} \arccos(\operatorname{dn} Y_1); \quad \Pi^{\operatorname{dn}}(Y_1) = \arcsin(\operatorname{sn} Y_1).$$

Применяя уравнения разд. 3 для  $D_1 = K_{11}$ ,  $D_2 = K_{22}$ ,  $K_{12}$  и различных ЭНЯ, получим искомые уравнения аналитического моделирования ЭОЯ:

$$\begin{aligned} \dot{m}_1 &= 0, & m_1(t_0) &= m_{10}; \\ \dot{m}_2 &= -\omega_0^2 \Theta_0(m_1, D_1) + L_0 - 2\varepsilon\omega_0 m_2, & m_2(t_0) &= m_{20}; \\ \dot{D}_1 &= 2K_{12}, & D_1(t_0) &= D_{10}; \\ \dot{D}_2 &= -2[\omega_0^2 \Theta_0(m_1, D_1) K_{12} + 2\varepsilon\omega_0 D_2] + h^2\nu, & D_2(t_0) &= D_{20}; \\ \dot{K}_{12} &= D_2 - \omega_0^2 k_1^3(m_1, D_1) D_1 - 2\varepsilon\omega_0 K_{12}, & K_{12}(t_0) &= K_{120}. \end{aligned}$$

Коэффициенты  $\Theta_0 = \Theta_0(m_1, D_1)$  и  $k_1^3 = k_1^3(m_1, D_1)$  для типовых ЭНЯ приведены в приложении П3.

В стационарном режиме при  $L_0 = 0$ ,  $\nu = \nu^*$  для  $\Theta(Y_1) = \operatorname{sn} Y_1$  имеем:

$$\Theta_0(0, D_1) = 0; \quad m_1^* = 0; \quad m_2^* = 0; \quad K_{12}^* = 0; \quad D_2^* = \frac{h^2\nu^*}{4\varepsilon\omega_0},$$

а  $D_1^*$  определяется из уравнения:

$$k_1^{\operatorname{sn}}(0, D_1^*) D_1^* = \gamma \quad \left( \gamma = \frac{h^2\nu^*}{4\varepsilon\omega_0^3} \right).$$

Здесь введены следующие обозначения:

$$k_1^{\operatorname{sn}}(0, D_1) = \kappa^{\operatorname{sn}}(D_1) \sum_{n=0}^{\infty} A_n^{\operatorname{sn}}(q) \exp[-\alpha_n^{\operatorname{sn}}(D_1)],$$

где

$$\begin{aligned} \kappa^{\operatorname{sn}}(D_1) &= \frac{\pi D_1}{k \mathbf{K}^2}; & A_n^{\operatorname{sn}}(q) &= \frac{(2n+1)q^{n+1/2}}{1-q^{2n+1}}; \\ \alpha_n^{\operatorname{sn}} &= \left( \frac{\pi(2n+1)}{\mathbf{K}} \right)^2 \frac{D_1}{8}; & q &= \exp \left[ -\frac{\pi \mathbf{K}'(k)}{\mathbf{K}(k)} \right]. \end{aligned}$$

Аналогично рассматриваются ЭОЯ для других эллиптических функций Якоби (см. приложение П3).

При малых  $k$  и  $k'$  имеют место простые приближенные выражения для коэффициентов статистической линеаризации, если воспользоваться асимптотическими формулами приложения П2 (19)–(21).

## 5 Заключение

Разработано методическое и алгоритмическое обеспечение аналитического моделирования нормальных (гауссовских) процессов в дифференциальных СтС с нелинейностями, описываемыми эллиптическими функциями Якоби. В качестве тестового примера рассмотрена динамика осциллятора Якоби в стохастической среде. Алгоритмы положены в основу разрабатываемого инструментального программного обеспечения и комплекса тестовых примеров.

В приложениях П1 и П2 приведены необходимые сведения из теории эллиптических интегралов и эллиптических функций Якоби, а в приложении П3 — коэффициенты статистической линеаризации при  $m \neq 0$  и  $m = 0$ .

Результаты допускают обобщения на системы с другими типами эллиптических нелинейностей, описываемых функциями Вейерштрасса, тэта-функциями и др.

## Приложения

### П1. Сведения из теории эллиптических интегралов первого рода

Эллиптический интеграл первого рода  $F(\varphi, k)$  и полный эллиптический интеграл первого рода  $\mathbf{K}(k)$  определяются по формулам:

$$F(\varphi, k) = \int_0^\varphi \frac{dt}{\sqrt{1 - k^2 \sin^2 t}};$$

$$\mathbf{K}(k) = F\left(\frac{\pi}{2}, k\right) = \mathbf{K}'(k') , \quad \frac{\pi}{2} \leq \mathbf{K}(k) \leq \infty \quad (0 \leq k \leq 1) ;$$

$$\mathbf{K}'(k) = F\left(\frac{\pi}{2}, k'\right) = \mathbf{K}(k') ,$$

где  $k$  ( $k^2 < 1$ ) — модуль;  $\varphi$  — амплитуда;  $k' = \sqrt{1 - k^2}$  — дополнительный модуль;  $k^2 + k'^2 = 1$ .

Преобразование интервала:

$$F(-\varphi, k) = -F(\varphi, k) , \quad F(n\pi \pm \varphi, k) = 2n\mathbf{K}(k) \pm F(\varphi, k) .$$

Степенные разложения:

$$\begin{aligned} \mathbf{K}(k^2) &= \frac{\pi}{2} \left\{ 1 + \sum_{j=1}^{\infty} \frac{(2j)!}{(2^j j!)^2} k^{2j} \right\}, \quad |k| < 1; \\ \mathbf{K}(k'^2) &= \frac{1}{2} \ln \left( \frac{16}{k'^2} \right) \left\{ 1 + \sum_{j=1}^{\infty} \left[ \frac{(2j)!}{(2^j j!)^2} (k'^2)^j \right] \right\} + \\ &\quad + \sum_{j=1}^{\infty} \left\{ \left[ \frac{(2j)!}{(2^j j!)^2} \right]^2 \sum_{l=1}^{2j} \left[ (-1)^l \frac{2}{l} \right] (k'^2)^l \right\}; \\ \mathbf{K}(s) &= \frac{\pi}{2} (1+s) \sum_{j=1}^{\infty} \frac{[(2j-1)!!]^2}{[(2j-2)!!]^2} s^{2j-\eta}, \quad s = \frac{1-k'}{1'_k}. \end{aligned}$$

Основной и дополнительный параметры Якоби  $q$  и  $q'$ :

$$q = q(k^2) = \exp \left( -\frac{\pi \mathbf{K}'}{\mathbf{K}} \right); \quad q' = q'(k^2) = \exp \left( -\frac{\pi \mathbf{K}'}{\mathbf{K}'} \right); \quad \ln \frac{1}{q} \cdot \ln \frac{1}{q'} = \pi^2.$$

Разложение в  $q$ -ряд Якоби:

$$\mathbf{K}(k) = \frac{\pi}{2} + 2\pi \sum_{j=1}^{\infty} \frac{q^j}{1+q^{2j}}.$$

## П2. Сведения из теории эллиптических функций Якоби

Соотношения между квадратами функций Якоби:

$$\begin{aligned} -\operatorname{dn}^2 u + k'^2 &= -k^2 \operatorname{cn}^2 u = k^2 \operatorname{sn}^2 u - k^2; \\ -k'^2 \operatorname{nd}^2 u + k'^2 &= -k^2 k'^2 \operatorname{sd}^2 u = k^2 \operatorname{cd}^2 u - k^2, \\ k'^2 \operatorname{sc}^2 u + k'^2 &= k'^2 \operatorname{nc}^2 u = \operatorname{dc}^2 u - k^2; \quad \operatorname{cs}^2 u + k'^2 = \operatorname{ds}^2 u = \operatorname{ns}^2 u - k^2. \end{aligned}$$

Теоремы сложения для функций Якоби:

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{sn}(u+v) &= \frac{\operatorname{sn} u \operatorname{cn} v \operatorname{dn} v + \operatorname{sn} v \operatorname{cn} u \operatorname{dn} u}{1 - k^2 \operatorname{sn}^2 u \operatorname{sn}^2 v}; \\ \operatorname{cn}(u+v) &= \frac{\operatorname{cn} u \operatorname{cn} v - \operatorname{sn} u \operatorname{dn} u \operatorname{sn} v \operatorname{dn} v}{1 - k^2 \operatorname{sn}^2 u \operatorname{sn}^2 v}; \\ \operatorname{dn}(u+v) &= \frac{\operatorname{dn} u \operatorname{dn} v - k^2 \operatorname{sn} u \operatorname{cn} u \operatorname{sn} v \operatorname{cn} v}{1 - k^2 \operatorname{sn}^2 u \operatorname{sn}^2 v}. \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

Формулы удвоения аргумента получаются из (18) при  $u = v$ .

Формулы для половинных аргументов функций Якоби:

$$\operatorname{sn}^2\left(\frac{u}{2}\right) = \frac{1 - \operatorname{cn} u}{1 + \operatorname{dn} u}; \quad \operatorname{cn}^2\left(\frac{u}{2}\right) = \frac{\operatorname{dn} u + \operatorname{cn} u}{1 + \operatorname{dn} u}; \quad \operatorname{dn}^2\left(\frac{u}{2}\right) = \frac{k'^2 + \operatorname{dn} u + k^2 \operatorname{cn} u}{1 + \operatorname{dn} u}.$$

Производные от функций Якоби:

$$\begin{aligned} (\operatorname{sn} u)' &= \operatorname{cn} u \operatorname{dn} u; & (\operatorname{cn} u)' &= -\operatorname{sn} u \operatorname{dn} u; \\ (\operatorname{dn} u)' &= -k^2 \operatorname{sn} u \operatorname{cn} u; & (\operatorname{cd} u)' &= -k'^2 \operatorname{sd} u \operatorname{nd} u; \\ (\operatorname{sd} u)' &= \operatorname{cd} u \operatorname{nd} u; & (\operatorname{nd} u)' &= k^2 \operatorname{sd} u \operatorname{cd} u; \\ (\operatorname{dc} u)' &= k'^2 \operatorname{sc} u \operatorname{nc} u; & (\operatorname{nc} u)' &= \operatorname{sc} u \operatorname{dc} u; \\ (\operatorname{sc} u)' &= \operatorname{dc} u \operatorname{nc} u; & (\operatorname{nc} u)' &= -\operatorname{ds} u \operatorname{cs} u; \\ (\operatorname{ds} u)' &= -\operatorname{cs} u \operatorname{ns} u; & (\operatorname{cs} u)' &= -\operatorname{ns} u \operatorname{ds} u. \end{aligned}$$

Интегралы от функций Якоби:

$$\begin{aligned} \int \operatorname{sn} u \, du &= k^{-1} \ln(\operatorname{dn} u - k \operatorname{cn} u); & \int \operatorname{cn} u \, du &= k^{-1} \arccos(\operatorname{dn} u); \\ \int \operatorname{dn} u \, du &= \arcsin(\operatorname{sn} u); & \int \operatorname{cd} u \, du &= k^{-1} \ln(\operatorname{nd} u + k \operatorname{sd} u)); \\ \int \operatorname{sd} u \, du &= (kk')^{-1} \arcsin(-k)^{-1} \operatorname{cd} u); & \int \operatorname{nd} u \, du &= (k')^{-1} \arccos(\operatorname{cd} u); \\ \int \operatorname{dc} u \, du &= \ln(\operatorname{nc} u + \operatorname{sc} u); & \int \operatorname{nc} u \, du &= (k')^{-1} \ln(\operatorname{dc} u + k' \operatorname{sc} u); \\ \int \operatorname{sc} u \, du &= (k')^{-1} \ln(\operatorname{dc} u + k' \operatorname{nc} u); & \int \operatorname{nc} u \, du &= \ln(\operatorname{ds} u - \operatorname{cs} u); \\ \int \operatorname{ds} u \, du &= \ln(\operatorname{ns} u - \operatorname{cs} u); & \int \operatorname{cs} u \, du &= \ln(\operatorname{ns} u - \operatorname{ds} u). \end{aligned}$$

Асимптотические представления  $\operatorname{sn} u$ ,  $\operatorname{cn} u$  и  $\operatorname{dn} u$  при малых  $k$  и  $k'$ :

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{sn} u &\approx \sin u - \frac{1}{4} k^2 (u - \sin u \cos u) \cos u; \\ \operatorname{sn} u &\approx \operatorname{th} u + \frac{1}{4} k'^2 (\operatorname{sh} u \operatorname{ch} u - u) \operatorname{sech}^2 u; \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{cn} u &\approx \cos u - \frac{1}{4} k^2 (u - \sin u \cos u) \sin u; \\ \operatorname{cn} u &\approx \operatorname{sech} u - \frac{1}{4} k'^2 (\operatorname{sh} u \operatorname{ch} u - u) \operatorname{th} u \operatorname{sech} u; \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

$$\left. \begin{array}{l} \operatorname{dn} u \approx 1 - \frac{1}{2} k^2 \sin^2 u; \\ \operatorname{dn} u \approx \operatorname{sech} u + \frac{1}{4} k'^2 (\operatorname{sh} u \operatorname{ch} u + u) \operatorname{th} u \operatorname{sech} u; \end{array} \right\} \quad (21)$$

$$\left. \begin{array}{l} \arcsin x - \arcsin y = \arcsin \left( x \sqrt{1-y^2} - y \sqrt{1-x^2} \right); \\ \arccos x - \arccos y = \arccos \left( xy + \sqrt{(1-x^2)(1-y^2)} \right). \end{array} \right\} \quad (22)$$

### П3. Коэффициенты статистической линеаризации эллиптических нелинейностей Якоби

При  $m = 0$ , пользуясь (20) и табличными интегралами

$$\begin{aligned} \int_0^\infty e^{-p^2 x^2} \cos ax dx &= \frac{1}{2p} \sqrt{\pi} \exp \left( -\frac{a^2}{4p^2} \right); \\ \int_0^\infty x e^{-p^2 x^2} \sin ax dx &= \frac{a}{2p^3} \sum_{l=1}^\infty \frac{1}{(2l-1)!!} \left( -\frac{a^2}{2p^2} \right)^{l-1}; \\ \int_{-\infty}^\infty e^{-p^2 x^2} \sin [a(x+x_0)] dx &= \frac{\sqrt{\pi}}{p} \exp \left( -\frac{a^2}{4p^2} \right) \sin ax_0; \\ \int_{-\infty}^\infty x e^{-p^2 x^2} \cos [a(x+x_0)] dx &= \frac{\sqrt{\pi}}{p} \exp \left( -\frac{a^2}{4p^2} \right) \cos ax_0; \\ \int_0^\infty x e^{-p^2 x^2} \sin ax dx &= \frac{a\sqrt{\pi}}{4p^3} \exp \left( -\frac{a^2}{4p^2} \right); \\ \int_0^\infty x e^{-p^2 x^2} \cos ax dx &= \frac{1}{2p^2} - \frac{a}{4p^3} \sum_{l=0}^\infty \frac{(-1)^l l!}{(2l+1)!} \left( \frac{a}{p} \right)^{2l+2}, \end{aligned}$$

соответственно для  $\Theta(Y) = \operatorname{sn} Y, \operatorname{cn} Y$  и  $\operatorname{dn} Y$  получаем:

$$\Theta_0^{\operatorname{sn}} = 0; \quad k_1^{\operatorname{sn}}(0, D) = \kappa^{\operatorname{sn}} \sum_{n=0}^\infty A_n^{\operatorname{sn}} \exp(-\alpha_n^{\operatorname{sn}}), \quad (23)$$

где

$$\kappa^{\operatorname{sn}} = \frac{\pi D}{k \mathbf{K}}, \quad A_n^{\operatorname{sn}} = (2n+1) \frac{q^{n+1/2}}{1-q^{2n+1}};$$

$$\Theta_0^{\text{cn}}(0, D) = \kappa^{\text{cn}} \sum_{n=0}^{\infty} A_n^{\text{cn}} \exp(-\alpha_n^{\text{cn}}), \quad k_1^{\text{cn}}(0, D) = 0, \quad (24)$$

где

$$\kappa^{\text{cn}} = \frac{2\pi}{k\mathbf{K}}, \quad A_n^{\text{cn}} = \frac{q^{n+1/2}}{1+q^{2n+1}};$$

$$\Theta_0^{\text{dn}}(0, D) = \frac{\pi}{2\mathbf{K}} + \kappa^{\text{dn}} \sum_{n=1}^{\infty} A_n^{\text{dn}} \exp(-\alpha_n^{\text{dn}}), \quad k_1^{\text{dn}} = 0, \quad (25)$$

где

$$\kappa^{\text{dn}} = \frac{\pi}{\mathbf{K}}, \quad A_n^{\text{dn}} = \frac{q^n}{1+q^{2n}}, \quad \alpha_n^{\text{dn}} = \frac{\pi^2 D n^2}{2\mathbf{K}^2}.$$

При  $m \neq 0$ , пользуясь (1) и известными табличными интегралами

$$\begin{aligned} S_{n,\omega,x_0}^{\alpha,\beta,\gamma} &= \int_{-\infty}^{\infty} x^n \exp[-(\alpha x^2 + \beta x + \gamma)] \sin(\omega x + x_0) dx = \\ &= - \left( \frac{-1}{2\alpha} \right)^n \sqrt{\frac{\pi}{\alpha}} \exp\left(\frac{\beta^2 - \omega^2}{4\alpha} - \gamma\right) \sum_{j=0}^{\text{E}(n/2)} \frac{n!}{(n-2l)!l!} \times \\ &\quad \times \alpha^l \sum_{j=0}^{n-2l} \left( \frac{n-2l}{j} \right) \beta^{n-2l-j} \omega^j \sin\left(\frac{\omega\beta}{2\alpha} - x_0 + \frac{\pi}{2} j\right), \end{aligned} \quad (26)$$

$$\begin{aligned} C_{n,\omega,x_0}^{\alpha,\beta,\gamma} &= \int_{-\infty}^{\infty} x^n \exp[-(\alpha x^2 + \beta x + \gamma)] \cos(\omega x + x_0) dx = \\ &= \frac{(-1)^n}{2\alpha} \sqrt{\frac{\pi}{\alpha}} \exp\left(\frac{\beta^2 - \omega^2}{4\alpha} - \gamma\right) \sum_{j=0}^{\text{E}(n/2)} \frac{n!}{(n-2l)!l!} \times \\ &\quad \times \alpha^l \sum_{j=0}^{\text{E}(n/2)} \left( \frac{n-2l}{j} \right) \beta^{n-2l-j} \omega^j \cos\left(\frac{\omega\beta}{2\alpha} - x_0 + \frac{\pi}{2} j\right), \end{aligned} \quad (27)$$

где  $\binom{n}{m} = (n(n-1)\cdots(n-m))/m!$ , придем к следующим результатам:

$$\Theta_0^{\text{sn}}(m, D) = \kappa_0(D) \sum_{n=0}^{\infty} \frac{q^{n+1/2}}{1-q^{2n+1}} S_{0,\Omega_{2n+1},0}^{\alpha,\beta,\gamma}(m, D), \quad k_1^{\text{sn}}(m, D) = \frac{\partial \Theta_0^{\text{sn}}}{\partial m}(m, D), \quad (28)$$

где

$$\kappa_0(D) = \kappa_0^{\text{sn}}(D) = \sqrt{\frac{2\pi}{D}} \frac{\pi}{k\mathbf{K}};$$

$$\Theta_0^{\text{cn}}(m, D) = \kappa_0(D) \sum_{n=0}^{\infty} \frac{q^{n+1/2}}{1 + q^{2n+1}} C_{0, \Omega_{2n+1}, 0}^{\alpha, \beta, \gamma}(m, D), \quad k_1^{\text{cn}}(m, D) = \frac{\partial \Theta_0^{\text{cn}}}{\partial m}(m, D), \quad (29)$$

где

$$\kappa_0(D) = \kappa_0^{\text{cn}}(D) = \sqrt{\frac{2\pi}{D}} \frac{1}{k\mathbf{K}};$$

$$\Theta_0^{\text{dn}}(m, D) = \frac{\pi}{2\mathbf{K}} + \kappa_0^{\text{dn}}(D) \sum \frac{q^n}{1 + q^{2n}} C_{0, \Omega_{2n}, 0}^{\alpha, \beta, \gamma}(m, D),$$

$$k_1^{\text{cn}}(m, D) = \frac{\partial \Theta_0^{\text{cn}}}{\partial m}(m, D), \quad (30)$$

где

$$\kappa_0^{\text{dn}}(D) = \sqrt{\frac{\pi}{D}} \frac{1}{\mathbf{K}}.$$

Здесь функции  $S$  и  $C$  с соответствующими индексами определены (26) и (27), а

$$\Omega_{2p+1} = \frac{2\pi(2p+1)}{2\mathbf{K}}, \quad \Omega_{2p} = \frac{2\pi p}{\mathbf{K}}, \quad \alpha = \frac{1}{2D}, \quad \beta = -\frac{m}{D}, \quad \gamma = \frac{m^2}{2D}.$$

Приближенные выражения для малых  $k$  и  $k'$  и коэффициентов статистической линеаризации ЭНЯ (23)–(25) и (28)–(30) получаются на основе формул (19)–(22).

## Литература

1. Синицын И. Н., Синицын В. И., Корепанов Э. Р. Моделирование нормальных процессов в стохастических системах со сложными трансцендентными нелинейностями // Информатика и её применения, 2015. Т. 9. Вып. 2. С. 23–29.
2. Синицын И. Н. Аналитическое моделирование процессов в динамических системах с цилиндрическими бесселевыми нелинейностями // Информатика и её применения, 2015. Т. 9. Вып. 4. С. 39–49.
3. Синицын И. Н., Корепанов Э. Р., Белоусов В. В. Символьное аналитическое моделирование нормальных процессов в стохастических системах со сложными бесселевыми нелинейностями дробного порядка // Системы и средства информатики, 2016. Т. 26. № 3. С. 26–47.
4. Справочник по специальным функциям / Под ред. М. Абрамовича и И. Стигана. — М.: Наука, 1979. 832 с.
5. Попов Б. А., Теслер Г. С. Вычисление функций на ЭВМ: Справочник. — Киев: Наукова думка, 1984. 599 с.
6. Пугачёв В. С., Синицын И. Н. Стохастические дифференциальные системы. Анализ и фильтрация. — М.: Наука, 1990. 632 с.
7. Пугачёв В. С., Синицын И. Н. Теория стохастических систем. — М.: Логос, 2000; 2004. 1000 с.

8. Синицын И. Н., Синицын В. И. Лекции по нормальной и эллипсоидальной аппроксимации распределений в стохастических системах. – М.: ТОРУС ПРЕСС, 2013. 488 с.
9. 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.

Поступила в редакцию 08.02.17

---

## ANALYTICAL MODELING OF NORMAL PROCESSES IN STOCHASTIC SYSTEMS WITH ELLIPTIC NONLINEARITIES

*I. N. 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:** Analytical modeling methodological support and corresponding algorithms for normal (Gaussian) stochastic processes in differential stochastic systems (StS) with Jacobian elliptic nonlinearities based on statistical linearization and normal approximation methods are presented. Dynamics of Jacobian oscillator in stochastic media is the basis of the test example. Necessary information about elliptic integrals and elliptic Jacobi-functions and statistical linearization coefficients of basic Jacobian nonlinearities are given. The results may be generalized to other types of elliptic functions and functions related to them.

**Keywords:** analytical modeling; method of normal approximation (MNA); method of statistical linearization (MSL); Jacobian elliptic nonlinearity; Jacobian elliptic oscillator

**DOI:** 10.14357/08696527170101

### Acknowledgments

The work was supported by the Program III.3 of the Department for Nanotechnologies and Information Technologies of the Russian Academy of Sciences (No. 0063-2016-0018).

### References

1. Sinitsyn, I. N., V. I. Sinitsyn, and E. R. Korepanov. 2015. Modelirovaniye normal'nykh protsessov v stokhasticheskikh sistemakh so slozhnymi transentsentnymi nelineynostyami [Modeling of normal processes in stochastic systems with complex transcendental nonlinearities]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 9(2):23–29.

2. Sinitsyn, I. N. 2015. Analiticheskoe modelirovaniye protsessov v dinamicheskikh sistemakh s tsilindricheskimi besselevymi nelineynostyami [Analytical modeling of processes in dynamical systems with cylindric Bessel nonlinearities]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 9(4):39–49.
3. Sinitsyn, I. N., E. R. Korepanov, and V. V. Belousov. 2016. Simvol'noe analiticheskoe modelirovaniye normal'nykh protsessov v stokhasticheskikh sistemakh so slozhnymi besselevymi nelineynostyami drobnogo poryadka [Symbolic analytical modeling of normal processes in stochastic systems with complex fraction order Bessel nonlinearities]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 26(3):26–47.
4. Abramovich, M., and I. Stigan, eds. 1979. *Spravochnik po spetsial'nym funktsiyam* [Handbook of mathematical functions]. Moscow: Nauka. 832 p.
5. Popov, B. A., and G. S. Tesler. 1984. *Vychislenie funktsiy na EVM: Spravochnik* [Calculation of functions on the computer: Handbook]. Kiev: Naukova Dumka. 599 p.
6. Pugachev, V. S., and I. N. Sinitsyn. 1987. *Stochastic differential systems. Analysis and filtering*. Chichester—New York: John Wiley. 549 p.
7. Pugachev, V. S., and I. N. Sinitsyn. 2001. *Stochastic systems. Theory and applications*. Singapore: World Scientific. 908 p.
8. Sinitsyn, I. N., and V. I. Sinitsyn. 2013. *Lektsii po normal'noy i ellipsoidal'noy approksimatsii raspredeleniy v stokhasticheskikh sistemakh* [Lectures on normal and ellipsoidal approximation in stochastic systems]. — Moscow: TORUS PRESS. 488 p.
9. Sinitsyn, I. N. 2013. Parametricheskoe statisticheskoe i analiticheskoe modelirovaniye raspredeleniy v nelineynykh stokhasticheskikh sistemakh na mnogoobraziyakh [Parametric statistical and analytical modeling of distributions in stochastic systems on manifolds]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 7(2):4–16.

Received February 8, 2017

## Contributor

**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

# ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ АНАЛИТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В СТОХАСТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ, НЕ РАЗРЕШЕННЫХ ОТНОСИТЕЛЬНО ПРОИЗВОДНЫХ\*

*И. Н. Синицын<sup>1</sup>*

**Аннотация:** Рассматриваются методы параметрического аналитического моделирования (МАМ) стохастических процессов (СтП) в конечномерных нелинейных стационарных и нестационарных стохастических системах (СтС), не разрешенных относительно производных. Такие модели описывают поведение многих технических систем информатики и управления, если пренебречь переходными процессами. Для аналитического моделирования и оценки точности и чувствительности алгоритмов разработаны усовершенствованные МАМ на основе методов нормальной аппроксимации (МНА) и статистической линеаризации (МСЛ), методов ортогональных разложений (МОР) и квазимоментов, а также других методов параметризации одно- и многомерных плотностей. Особое внимание уделено МАМ для дискретных СтС по методу МОР на основе эталонного пуассоновского распределения. Даны типовые нелинейности, не разрешенные относительно производных, и коэффициенты их статистической линеаризации, а также два тестовых примера. Алгоритмы положены в основу разрабатываемого экспериментального программного обеспечения для решения задач надежности и безопасности технических систем.

**Ключевые слова:** анализ точности и чувствительности; метод аналитического моделирования (МАМ); метод нормальной аппроксимации (МНА); метод ортогональных разложений (МОР); метод статистической линеаризации (МСЛ); одно- и многомерные плотности; стохастическая система (СтС); стохастический процесс (СтП)

**DOI:** 10.14357/08696527170102

## 1 Введение

Методы аналитического моделирования широкополосных СтП в нелинейных дифференциальных СтС, разрешенных относительно производных, представлены в [1–7]. В [8] развиты МСЛ и МНА, лежащие в основе МАМ в СтС, не разрешенной относительно производных, в частности приведены типовые негладкие нелинейности, зависящие от производных, даны формулы МСЛ для

---

\*Работа выполнена при поддержке РFFI (проект 15-07-02244).

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

СтС с аддитивными шумами. Для гладких нелинейностей развит МНА. Получены уравнения чувствительности МСЛ (МНА). В приложении даны тестовые примеры.

Рассмотрим развитие МАМ [1, 2, 5] применительно к СтС, не разрешенных относительно производных. В разд. 2 рассмотрены уравнения нелинейных дифференциальных СтС, не разрешенных относительно производных с винеровскими и пуассоновскими белыми, а также автокоррелированными шумами. Раздел 3 содержит обобщение МАМ на основе МНА (МСЛ) [8] на случай автокоррелированных шумов. В разд. 4 рассмотрены общие вопросы МАМ на основе параметризации одно- и многомерных плотностей СтП нелинейных дифференциальных СтС, не разрешенных относительно производных, приводимых к СтС, разрешенных относительно производных. Разделы 5–7 посвящены МАМ на основе МОР и метода квазимоментов (МКМ) для одно- и многомерных плотностей в случае эталонных гауссовских и пуассоновских плотностей. Заключение содержит выводы и некоторые обобщения. В приложениях приведены формулы для коэффициентов статистической линеаризации типовых нелинейностей, не разрешенных относительно производных, и два тестовых примера, иллюстрирующих МНА (МСЛ) и МОР с точностью до вероятностных моментов третьего порядка включительно.

## 2 Нелинейные дифференциальные стохастические системы, не разрешенные относительно производных

Следуя [8], рассмотрим сначала дифференциальную СтС с нелинейностями, описываемыми гладкими функциями:

$$\begin{aligned} \varphi = \varphi \left( t, \Theta, Y_t, \dot{Y}_t, \dots, Y_t^{(k)}, U_t \right) &= 0, \quad Y(t_0) = Y_0, \\ \dot{Y}(t_0) = \dot{Y}_0, \dots, Y^{(n)}(t_0) = Y_0^{(k)}, \end{aligned} \quad (1)$$

при этом уравнение нелинейного формирующего фильтра ( $\Phi\Phi$ ) возьмем в виде, разрешенном относительно возмущений:

$$\dot{U}_t = a^U(t, \Theta, U_t) + b^U(t, \Theta, U_t) V_t^U, \quad U(t_0) = U_0. \quad (2)$$

Здесь  $a^U = a^U(t, \Theta, U_t)$  и  $b^U(t, \Theta, U_t)$  —  $(n^Y \times 1)$ - и  $(n^Y \times n^V)$ -мерные функции;  $V_t^U$  — белый шум в строгом смысле [1, 2], допускающий представление:

$$V_t^U = \dot{W}_t^U, \quad W_t^U = W_0^U(t, \Theta) + \int_{R_0^q} c^U(\Theta, \rho) P^0(t, \Theta, d\rho), \quad (3)$$

где  $\nu_t$  — его интенсивность:

$$\nu_t = \nu_t^W = \nu_t^{W_0} + \int_{R_0^q} c^U(\Theta, \rho) [c^U(\Theta, \rho)]^T \nu_P(t, \Theta, \rho) d\rho; \quad (4)$$

$c^U = c^U(\Theta, \rho)$  — известная векторная функция той же размерности, что и  $W_t^0$ , а интеграл при любом  $t \geq t_0$  представляет собой стохастический интеграл по центрированной пуассоновской мере  $P^0(t, \Theta, \mathcal{A})$ , независимой от  $W_0^U$  и имеющей независимые значения на попарно непересекающихся множествах;  $\mathcal{A}$  — борелевское множество пространства  $R_0^q$  с выколотым началом;  $\nu_t^W$ ,  $\nu_t^{W_0}$  и  $\nu_P$  — интенсивности СтП  $W_t^U$ ,  $W_0^U$  и  $P^0$ . Уравнение (2) понимается в смысле Ито и имеет единственное решение в среднем квадратическом (с.к.) [1, 2].

Для гладких функций в (1), допускающих стохастические производные Ито до  $h$ -го порядка, выполним следующие преобразования. Будем дифференцировать сполна по  $t$  левые части уравнений (1) по обобщенной формуле Ито [1, 2] до тех пор, пока не появятся производные белого шума. В результате получим следующую систему нелинейных дифференциальных уравнений:

$$\varphi = 0, \quad \dot{\varphi} = 0, \dots, \varphi^{(h)} = 0. \quad (5)$$

Далее введем вектор  $Z_t = [Z_T'^T Z_t''^T]^T$ , составленный из  $Z_t' = [Y_t^T \dot{Y}_t^T \dots Y_t^{(k-1)T}]^T$  и вспомогательного вектора  $Z_t''$ , определяемого уравнениями (5). В результате придем к уравнениям, разрешенным относительно дифференциалов, следующего вида:

$$dZ_t = a^Z dt + b^Z dW_0 + \int_{R_0^q} c^Z P^0(t, \Theta, du), \quad (6)$$

где  $a^Z = a^Z(t, \Theta, Z_t)$ ;  $b^Z = b^Z(t, \Theta, Z_t)$ ;  $c^Z = c^Z(t, \Theta, Z_t, u)$ .

Таким образом, имеем следующее утверждение.

**Теорема 2.1.** Пусть нелинейная негауссовская СтС (1), (2), не разрешенная относительно производных  $k$ -го порядка, удовлетворяет условиям:

- 1<sup>0</sup> функции (1) допускают обобщенные стохастические дифференциалы Ито вплоть до  $h$ -го порядка включительно;
- 2<sup>0</sup> уравнение ФФ (2) разрешено относительно возмущений  $U_t$ , имеет единственное с.к. решение.

Тогда система (1), (2) приводится к системе, разрешенной относительно производных (6).

Пусть теперь в (1) стохастическое возмущение  $U_t$  является автокоррелированным СтП и описывается стохастическим дифференциальным уравнением следующего ФФ:

$$U_t^{(n)} + \sum_{k=n-m}^{n-1} \alpha_k^U \left( t, \Theta, U_t, \dot{U}_t, \dots, U_t^{(n-m-1)} \right) U_t^{(k)} + \\ + \alpha_0^U \left( t, \Theta, U_t, \dot{U}_t, \dots, U_t^{(n-1)} \right) = \sum_{h=1}^m \beta_h \left( t, \Theta, U_t, \dot{U}_t, \dots, U_t^{(n-m-1)} \right) V_t^{(h)}. \quad (7)$$

Здесь  $n = n^U$  — порядок дифференциального уравнения, причем  $0 < m < n$ ;  $\alpha_0^U, \alpha_k^U$  и  $\beta_h^U$  — известные функции отмеченных переменных.

Пусть компоненты СтП  $Y_t, \dot{Y}_t, \dots, Y_t^{(k)}$  более гладкие, чем  $U_t$ . В этом случае для приведения (1), (7) к (6) можно применить способ, основанный на дифференцировании (1) и исключении  $U_t$  и ее производных, не содержащих белого шума, из уравнений (1) и уравнений, полученных из него дифференцированием (7) по обобщенной формуле Ито [1, 2]. В результате придем к следующему уравнению вида (6):

$$d\bar{Z}_t = \bar{a}^Z dt + \bar{b}^Z dW_0 + \int_{R_0^q} \bar{c}^Z P^0(t, \Theta, du), \quad (8)$$

где  $\bar{a}^Z = \bar{a}^Z(t, \Theta, \bar{Z}_t); \bar{b}^Z = \bar{b}^Z(t, \Theta, \bar{Z}_t); \bar{c}^Z = \bar{c}^Z(t, \Theta, \bar{Z}_t, u)$ .

В случае аддитивных возмущений уравнения (6) и (8) приобретают следующий вид:

$$\dot{Z}_t = a^Z + b_0^Z V_t; \quad (9)$$

$$\dot{\bar{Z}}_t = \bar{a}^Z + \bar{b}_0^Z V_t. \quad (10)$$

Здесь СтП  $V_t = \dot{W}_t$ , а СтП  $W_t$  определен формулами (3) и (4) без индекса  $U$ :

$$Z_t = \left[ Y_t'^T U_t^T \right]^T; \quad Y'_t = \left[ Y_t^T \dot{Y}_t^T \dots Y_t^{(k-1)T} \right]^T = \left[ Y_t^T \bar{Y}_{1t}^T \dots Y_{k-1,t}^T \right]^T; \\ \bar{Y}_{kt} = Y_t^{(k)}.$$

Таким образом, получаем следующий результат.

**Теорема 2.2.** Пусть нелинейная негауссовская СтС (1), (7) удовлетворяет условиям:

1<sup>0</sup> функции (1) допускают обобщенные стохастические дифференциалы Ито вплоть до  $h$ -го порядка включительно;

2<sup>0</sup> уравнение ФФ (7) имеет единственное с.к. решение;

3<sup>0</sup> СтП  $Y_t, \dot{Y}_t, \dots, Y_t^{(k)}$  более гладки, чем возмущение  $U_t$ .

Тогда система (1), (7) приводима к системе (8).

### 3 Методы аналитического моделирования на основе методов нормальной аппроксимации (статистической реализации)

В основе МАМ на базе МНА для (1)–(6) лежат следующие обыкновенные дифференциальные уравнения [9]:

$$\left. \begin{aligned} \dot{m}_t^Z &= \Phi_t^m(t, \Theta, m_t^Z, K_t^Z), \quad m_0^Z = m_{t_0}^Z; \\ \dot{K}_t^Z &= \Phi_t^K(t, \Theta, m_t^Z, K_t^Z), \quad K_0^Z = K_{t_0}^Z; \\ \frac{\partial K^Z(t_1, t_2)}{\partial t_2} &= \Phi_{t_1, t_2}^K(t_1, t_2, \Theta, m_{t_2}^Z, K_{t_2}^Z), \quad K^Z(t_1, t_2) = K_{t_1}^Z. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Здесь

$$\left. \begin{aligned} \Phi_t^m(t, \Theta, m_t^Z, K_t^Z) &= M_N[a^Z]; \\ \Phi_t^K(t, \Theta, m_t^Z, K_t^Z) &= M_N \Phi_{1t}(t, \Theta, m_t^Z, K_t^Z) + \\ &\quad + \Phi_{1t}^T(t, \Theta, m_t^Z, K_t^Z) + \Phi_{2t}(t, \Theta, m_t^Z, K_t^Z); \\ \Phi_{1t}(t, \Theta, m_t^Z, K_t^Z) &= M_N \left[ a^Z (Z_t - m_t^Z)^T \right]; \\ \Phi_{2t}(t, \Theta, m_t^Z, K_t^Z) &= M_N [\sigma(t, \Theta, Z_t)]; \\ \sigma(t, \Theta, Z_t) &= \sigma_0(t, \Theta, Z_t) + \\ &\quad + \int_{P_0^q} c^Z(t, \Theta, Z_t, u) c^Z(t, \Theta, Z_t, u)^T \nu_P(t, \Theta, du); \\ \sigma_0(t, \Theta, Z_t) &= b^Z(t, \Theta, Z_t) \nu_0(t, \Theta) b^Z(t, \Theta, Z_t)^T; \\ \Phi_{t_1, t_2}^k(t_1, t_2, \Theta, m_{t_2}^Z, K_{t_2}^Z) &= K^Z(t_1, t_2) (K_{t_2}^Z)^{-1} \Phi_{1t}^T, \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

где  $M_N$  — символ математического ожидания для гауссовского (нормального) распределения.

В стационарном случае уравнения МНА имеют следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} \Phi_*^m(\Theta, m_*^Z, K_*^Z) &= 0, \quad \Phi_*^K(\Theta, m_*^Z, K_*^Z) = 0, \\ \frac{dk^Z(\tau)}{d\tau} &= \Phi_\tau^k(k^Z(\tau), \Theta, m_*^Z, K_*^Z), \quad k^Z(0) = K_*^Z, \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

где принято

$$\left. \begin{aligned} \Phi_*^m(\Theta, m_*^Z, K_*^Z) &= M_N[a^Z]; \\ \Phi_*^K(\Theta, m_*^Z, K_*^Z) &= \\ &= \Phi_{1*}(\Theta, m_*^Z, K_*^Z) + \Phi_{1*}(\Theta, m_*^Z, K_*^Z)^T + \Phi_{2*}(\Theta, m_*^Z, K_*^Z); \\ \Phi_{1*}(\Theta, m_*^Z, K_*^Z) &= M_N[a^Z(Z_t - m_*^Z)]; \\ \Phi_{2*}(\Theta, m_*^Z, K_*^Z) &= M_N[\sigma_*(\Theta, Z_t)]; \\ \sigma_*(\Theta, Z_t) &= \sigma_{0*}(\Theta, Z_t) + \int_{R_0^q} c^Z(\Theta, Z_t, u) c^Z(\Theta, Z_t, u)^T \nu_P(t, \Theta, du); \\ \sigma_{0*}(\Theta, Z_t) &= b^Z(\Theta, Z_t) \nu_{0*}(\Theta) b^Z(\Theta, Z_t)^T; \\ \Phi_\tau^k(k^Z(\tau), \Theta, m_*^Z, K_*^Z) &= k^Z(\tau) (K_*^Z)^{-1} \Phi_{1*}^T, \quad \tau = t_1 - t_2. \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

Таким образом, имеем следующие результаты.

**Теорема 3.1.** Пусть для нелинейной негауссовой СтС (1), (2) выполнены условия:

- 1<sup>0</sup> правые части уравнений (1) имеют стохастические производные Ито до порядка  $h$ ;
- 2<sup>0</sup> уравнения (1) совместно с (5) имеют единственное решение, понимаемое в с.к.

Тогда уравнения МАМ на основе МНА имеют вид (11) при условиях конечности интегралов (12).

**Теорема 3.2.** Пусть в условиях теоремы 3.1 параметры СтС не зависят от времени и имеет место ковариационно-стационарный СтП. Тогда его математические ожидания, ковариационная матрица и матрица ковариационных функций определяются уравнениями (13) при условиях конечности интегралов (14) и асимптотической устойчивости матрицы  $\Phi_{1*}$ .

Для случая автокоррелированных возмущений  $U_t$  имеют место аналогичные утверждения.

**Теорема 3.3.** Пусть для СтС (1), (7) выполнены условия:

- 1<sup>0</sup> компоненты  $Y_t, \dots, Y_t^{(k)}$  более гладкие, чем  $U_t$ ;
- 2<sup>0</sup> правые части уравнений (1) имеют стохастические производные Ито до порядка  $h$ ;
- 3<sup>0</sup> уравнения (1) совместно с (5) имеют единственное с.к. решение.

Тогда уравнения МАМ на основе МНА определяются уравнениями теоремы 3.1 и имеют вид (11) при условии конечности интегралов (12) для функций  $\Phi_t^K$  и  $\sigma_t$ , в которых  $a^Z$ ,  $b^Z$  и  $c^Z$  следует заменить на  $\bar{a}^Z$ ,  $\bar{b}^Z$  и  $\bar{c}^Z$ .

**Теорема 3.4.** Пусть в условиях теоремы 3.3 параметры СтС не зависят от времени и имеет место ковариационно-стационарный СтП. Тогда его математическое ожидание, ковариационная матрица и матрица ковариационных функций определяются уравнениями (13) с заменой функций  $a_*^Z$ ,  $b_*^Z$  и  $c_*^Z$  на  $\bar{a}_*^Z$ ,  $\bar{b}_*^Z$  и  $\bar{c}_*^Z$  при условии асимптотической устойчивости матрицы  $\bar{\Phi}_{1*}$ .

Для СтС с аддитивными шумами (9), (10) уравнения МНА переходят в уравнения МСЛ [8]. В этом случае требование к гладкости функций (1) можно снять. Повторяя [8], приходим к уравнениям МСЛ для СтС (9):

$$\left. \begin{aligned} \varphi_0 &= 0, \quad \dot{K}_t^Z = a^Z K_t^Z + K^Z (a^Z)^T + b_0^Z \nu (b_0^Z)^T, \quad K_{t_0}^Z = K_0^Z; \\ \frac{\partial K^Z(t_1, t_2)}{\partial t_2} &= K^Z(t_1, t_2) (a_{t_2}^Z)^T, \quad K^Z(t_1, t_1) = K_{t_1}^Z \quad (\text{теорема 3.5}); \\ \varphi_{0*} &= 0; \quad a_*^Z K_*^Z + K_*^Z (a_*^Z)^T + b_{0*}^Z \nu_* (b_{0*}^Z)^T = 0; \\ \frac{dk^Z(\tau)}{d\tau} &= a_* k^Z(\tau), \quad k^Z(0) = K_*^Z \quad (\text{теорема 3.6}). \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

Уравнения МСЛ для СтС (10) получаются из (15) заменой  $a^Z$  и  $b_0^Z$  на  $\bar{a}_*^Z$  и  $\bar{b}_0^Z$  и  $a_*^Z$  и  $b_{0*}^Z$  на  $\bar{a}_*^Z$  и  $\bar{b}_{0*}^Z$ .

В приложении П1 даны выражения для коэффициентов статистической линеаризации типовых нелинейностей, не разрешенных относительно производных, скалярного и векторного аргумента.

#### 4 Методы аналитического моделирования на основе параметризации одно- и многомерных распределений

Как известно [1, 2], обобщением МНА распределений являются различные приближенные методы, основанные на параметризации распределений. Аппроксимация одномерной характеристической функции  $g_1(\lambda; \Theta, t)$  и соответствующей плотности  $f_1(y; \Theta, t)$  известными функциями  $g_1^*(\lambda; \Theta, \Xi)$  и  $f_1^*(y; \Theta, \Xi)$ , зависящими от конечномерного векторного параметра  $\Xi$ , сводит задачу приближенного определения одномерного распределения к выводу из уравнения для характеристических функций обыкновенных дифференциальных уравнений, определяющих  $\Xi$  как функцию времени. Это относится и к остальным многомерным распределениям. При аппроксимации многомерных распределений целесообразно выбирать последовательности функций  $\{g_n^*(\lambda_1, \dots, \lambda_n; \Theta, \Xi_n)\}$  и  $\{f_n^*(y_1, \dots, y_n; \Theta, \Xi_n)\}$ , каждая пара которых находилась бы в такой зависимости от векторного параметра  $\Xi_n$ , чтобы при любом  $n$  множество параметров,

образующих вектор  $\Xi_n$ , включало в качестве подмножества множество параметров, образующих вектор  $\Xi_{n-1}$ . Тогда при аппроксимации  $n$ -мерного распределения придется определять только те координаты вектора  $\Xi_n$ , которые не были определены ранее при аппроксимации функций  $g_1, f_1, \dots, g_{n-1}, f_{n-1}$ .

При этом в зависимости от того, что представляют собой параметры, от которых зависят функции  $f_n^*(y_1, \dots, y_n; \Theta, \Xi_n)$  и  $g_n^*(\lambda_1, \dots, \lambda_n; \Theta, \Xi_n)$ , аппроксимирующие неизвестные многомерные плотности  $f_n(y_1, \dots, y_n; \Theta, t_1, \dots, t_n)$  и характеристические функции  $g_n(\lambda_1, \dots, \lambda_n; \Theta, t_1, \dots, t_n)$ , используются различные приближенные методы решения уравнений, определяющих многомерные распределения вектора состояния системы  $Y_t$ , в частности методы моментов, семиинвариантов, ортогональных разложений и др.

Для оценки качества СтС на многообразиях (МСтС) при гауссовских  $\Theta$  выбрана условная функция потерь  $\rho$ , допускающая квадратическую аппроксимацию [9, 10]

$$\rho = \rho(\Theta) = \rho(m^\Theta) + \sum_{i=1}^{p^\Theta} \rho'_i(m^\Theta) \Theta_i^0 + \sum_{i,j=1}^{p^\Theta} \sum \rho''_{ij}(m^\Theta) \Theta_i^0 \Theta_j^0,$$

и показатель  $\varepsilon$ , равный

$$\varepsilon = \varepsilon_2^{1/4}, \quad \varepsilon_2 = M_N[\rho(\Theta)]^2 - \rho(m^\Theta)^2,$$

где

$$M_N[\rho(\Theta)^2] = \rho(m^\Theta)^2 + \rho'(m^\Theta)^T K^\Theta \rho'(m^\Theta) + 2\rho(m^\Theta) \text{tr} [\rho''(m^\Theta) K^\Theta] + \\ + \left\{ \text{tr} [\rho''(m^\Theta) K^\Theta] \right\}^2 + 2\text{tr} [\rho''(m^\Theta) K^\Theta]^2.$$

Основываясь на обобщении МОР, полученном в [9, 10], рассмотрим развитие МАМ применительно к одно- и многомерным плотностям, предполагая выполненными условия приведения раздела 2.

## 5 Методы аналитического моделирования на основе метода ортогональных разложений для одномерных плотностей

Следуя [9, 10], представим уравнения МОР в виде следующего отрезка разложения:

$$f = f(y_t, \Theta, \vartheta^y, t) \approx w(y_t, \Theta) \left[ 1 + \sum_{l=3}^{n_1} \sum_{|\nu|=l} c_{\nu t}(\Theta, t) p_\nu(y_t) \right]. \quad (16)$$

Здесь  $w = w(y_t; \Theta)$  — эталонная одномерная плотность, выбираемая из условия совпадения первых двух вероятностных моментов для  $w$  и  $f$ ;  $\{p_\nu(y_t), q_\nu(y_t)\}$  — система биортонормальных полиномов с весом  $w$ , т. е. удовлетворяющих условию:

$$\mathbf{M}_{\Delta^y}^w [p_\nu(Y_t) q_\mu(Y_t)] = \delta_{\nu\mu} = \begin{cases} 0 & \text{при } \mu \neq \nu; \\ 1 & \text{при } \mu = \nu. \end{cases} \quad (17)$$

Здесь  $\mathbf{M}_{\Delta^y}^w$  — символ математического ожидания в области  $\Delta^y$ ;  $\vartheta^y = \{m_t, K_t, c_{\nu t}\}$  — условные параметры МОР, т. е. вектор условного математического ожидания  $m_t = m(\Theta, t)$ , условная ковариационная матрица  $K_t = K(\Theta, t)$  и условная матрица коэффициентов ортогонального разложения  $c_{\nu t} = c_{\nu t}(\Theta, t)$ , удовлетворяющая условию:

$$c_{\nu t} = \mathbf{M}_{\Delta^y}^f [q_\nu(Y_t)] = q_\nu(\alpha). \quad (18)$$

Функция  $q_\nu(\alpha)$  представляет собой комбинацию условных начальных моментов  $\alpha_t$  вектора  $Y_t$ , полученную из  $q_\nu(x)$  заменой всех одночленов  $x_1^{k_1}, \dots, x_r^{k_r}$  соответствующими моментами  $\alpha_{k_1}, \dots, \alpha_{k_r}$ .

Будем пользоваться векторной нумерацией полиномов  $\{p_\nu, q_\nu\}$  так, чтобы сумма координат  $|\nu| = \nu_1 + \dots + \nu_r$  векторного индекса  $\nu = [\nu_1 \dots \nu_r]^T$  была равна степени полиномов. Тогда число линейно независимых полиномов данной степени  $\nu_* = |\nu|$  будет равно числу независимых одночленов степени  $\nu_*$ , т. е.  $C_{r+\nu_*-1}^{\nu_*}$ . Отметим также, что согласно [1, 2] существование всех моментов для плотности необходимо и достаточно для существования интегралов (16).

**Теорема 5.1.** *Если в условиях теорем 2.1 и 2.2 существует одномерное распределение СтП  $Y_t$ , то при фиксированном векторе параметров  $\Theta$  и полиномиальных  $\{p_\nu(y_t), q_\nu(y_t)\}$  в основе МОР для одномерных распределений лежат разложения (16) и уравнения:*

$$\left. \begin{aligned} \dot{m}_t &= A^m(m_t, K_t, c_{\nu t}, \Theta, t) = \varphi_{10}(m_t, K_t, \Theta, t) + \\ &\quad + \sum_{l=3}^n \sum_{|\nu|=l} \varphi_{1\nu}(m_t, K_t, \Theta, t) c_{\nu t}, \quad m(t_0) = m_0; \\ \dot{K}_t &= A^K(m_t, K_t, c_{\nu t}, \Theta, t) = \varphi_{20}(m_t, K_t, \Theta, t) + \\ &\quad + \sum_{l=3}^n \sum_{|\nu|=l} \varphi_{2\nu}(m_t, K_t, \Theta, t) c_{\nu t}, \quad K(t_0) = K_0; \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

$$\begin{aligned}
 \dot{c}_{\kappa t} = & A^{c_{\kappa}}(m_t, K_t, c_{\kappa t}, \Theta, t) = \varphi_{\kappa 0}(m_t, K_t, \Theta, t) + \\
 & + \psi_{\kappa 0}^{m_t}(m_t, K_t, \Theta, t)^T \dot{m}_t + \frac{1}{2} \operatorname{tr} \left[ \psi_{\kappa 0}^{K_t}(m_t, K_t, \Theta, t) \dot{K}_t \right] + \\
 & + \frac{1}{2} \operatorname{tr} \left[ \psi_{\kappa \nu}^{K_t}(m_t, K_t, \Theta, t) \dot{K}_t \right] + \sum_{l=3}^n \sum_{|\nu|=l} c_{\nu t} [\varphi_{\kappa \nu}(m_t, K_t, \Theta, t) + \\
 & + \psi_{\kappa \nu}^{m_t}(m_t, K_t, \Theta, t)^T \dot{m}_t], \quad c_{\kappa}(t_0) = c_{\kappa 0}. \quad (20)
 \end{aligned}$$

Здесь приняты следующие обозначения:

$$\left. \begin{aligned}
 \varphi_{10}(m_t, K_t, \Theta, t) &= M_{\Delta y}^w[a(Y_t, \Theta, t)]; \\
 \varphi_{1\nu}(m_t, K_t, \Theta, t) &= M_{\Delta y}^{wp_{\nu}}[a(Y_t, \Theta, t)]; \\
 \varphi_{20}(m_t, K_t, \Theta, t) &= M_{\Delta y}^w \left[ a(Y_t, \Theta, t)(Y_t - m_y)^T + \right. \\
 &\quad \left. + (Y_t - m_t)a(Y_t, \Theta, t)^T + \bar{\sigma}(Y_t, \Theta, t) \right]; \\
 \varphi_{2\nu}(m_t, K_t, \Theta, t) &= M_{\Delta y}^{wp_{\nu}} \left[ a(Y_t, \Theta, t)(Y_t - m_t)^T + \right. \\
 &\quad \left. + (Y_t - m_t)a(Y_t, \Theta, t)^T + \bar{\sigma}(Y_t, \Theta, t) \right]; \\
 \bar{\sigma}(Y_t, \Theta, t) &= \sigma(Y_t, \Theta, t) + \\
 &\quad + \int_{R_0^q} c(Y_t, \Theta, t, v) c(Y_t, \Theta, t, v)^T \nu_P(t, \Theta) dv; \\
 \sigma(Y_t, \Theta, t) &= b(Y_t, \Theta, t) \nu_0(\Theta, t) b(Y_t, \Theta, t)^T; \\
 \varphi_{\kappa \nu}(m_t, K_t, \Theta, t) &= M_{\Delta y}^{wp_{\nu}} \left\{ \frac{\partial^T q_{\kappa}(Y_t)}{\partial Y_t} a(Y_t, \Theta, t) + \right. \\
 &\quad + \frac{1}{2} \operatorname{tr} \left[ \frac{\partial}{\partial Y_t} \frac{\partial^T}{\partial Y_t} q_{\kappa}(Y_t) \sigma(Y_t, \Theta, t) \right] + \int_{R_0^q} \left[ q_{\kappa}(Y_t + c(Y_t, \Theta, t, v)) - \right. \\
 &\quad \left. - q_{\kappa}(Y_t) - \frac{\partial q_{\kappa}(Y_t)}{\partial Y_t} c(Y_t, \Theta, t, v) \right] \nu_P(\Theta, t, dv) \left. \right\}; \\
 \psi_{\kappa \nu}^{m_t}(m_t, K_t, \Theta, t) &= M_{\Delta y}^{wp_{\nu}}[q_{\kappa}^{m_t}(Y_t)]; \\
 \psi_{\kappa \nu}^{K_t}(m_t, K_t, \Theta, t) &= M_{\Delta y}^{wp_{\nu}}[q_{\kappa}^{K_t}(Y_t)], \quad \left. \right\} \quad (22)
 \end{aligned} \right\}$$

а интегралы  $\psi_{\kappa 0}^{m_t}(m_t, K_t, \Theta, t)$  и  $\psi_{\kappa 0}^{K_t}(m_t, K_t, \Theta, t)$  выражаются согласно (22) при  $p_{\nu}(y_t) = p_0(y_t) = 1$ . При этом предполагается, что выполнены условия (17), (18), а интегралы (21), (22) конечны.

**Замечание 5.1.** Уравнения теоремы 5.1 для  $\dot{m}_t$  и  $\dot{K}_t$  линейны относительно  $c_{\kappa t}$ , в то время как уравнения для  $\dot{c}_{\kappa t}$  в силу (19) и (20) нелинейны.

Для рассмотрения стационарных распределений с параметрами  $\vartheta^{*y} = \{m^*; K^*; c_\nu^*\}$  достаточно правые части уравнений (19) и (20) приравнять нулю:

$$\left. \begin{aligned} A^m(m^*, K^*, c_\nu^*, \Theta) &= 0; \\ A^K(m^*, K^*, c_\nu^*, \Theta) &= 0; \\ A^{c_\kappa}(m^*, K^*, c_\kappa^*, \Theta) &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

**Теорема 5.2.** Пусть в условиях теоремы 5.1 СтС стационарна и существует негауссовский стационарный СтП. Тогда его одномерная плотность определяется отрезком ортогонального разложения согласно (16) и уравнениями (23) при условии асимптотической устойчивости линейных уравнений в вариациях для системы (19), (20).

Как известно [9, 10], методы теории чувствительности в инженерной практике широко применяются для приближенного анализа точности СтС со случайными параметрами  $\Theta$  в предположении малых дисперсий этих параметров по сравнению с их математическими ожиданиями. Используя теоремы 5.1 и 5.2, найдем условные параметры  $\vartheta^y = \{m_t; K_t; c_{\nu t}\}$  одномерной плотности. Уравнения функций чувствительности первого порядка условных параметров  $\vartheta^y$  для МОР получаются путем дифференцирования правых и левых частей уравнений теоремы 5.1 по  $\Theta$  согласно формулам разд. 4. В этом случае получаются следующие уравнения для функций чувствительности первого порядка  $\nabla^\Theta m_t$  ( $\nabla^\Theta = (\partial/\partial\Theta)$ ),  $\nabla^\Theta K_t = (\partial/\partial\Theta) K_t$  и  $\nabla^\Theta c_{\nu t} = (\partial/\partial\Theta) c_{\nu t}$ :

$$\left. \begin{aligned} \nabla^\Theta \dot{m}_t &= \nabla^\Theta \varphi_{10} + \sum_{l=3}^n \sum_{|\nu|=l} \left( \nabla^\Theta \varphi_{1\nu} m_t^{c_\nu} + \varphi_{1\nu} \nabla^\Theta c_{\nu t} \right), \quad \nabla^\Theta m(t_0) = 0; \\ \nabla^\Theta \dot{K}_t &= \nabla^\Theta \varphi_{20} + \sum_{l=3}^n \sum_{|\nu|=l} \left( \nabla^\Theta \varphi_{2\nu} + \varphi_{2\nu} \nabla^\Theta c_{\nu t} \right), \quad \nabla^\Theta K(t_0) = 0; \\ \nabla^\Theta \dot{c}_{\kappa t} &= \nabla^\Theta \varphi_{\kappa 0} + \nabla^\Theta \left\{ \psi_{\kappa 0}^{m_t} \dot{m}_t + \frac{1}{2} \operatorname{tr} \left( \psi_{\kappa 0}^{m_t} \dot{K}_t \right) + \frac{1}{2} \operatorname{tr} \left( \psi_{\kappa \nu}^{K_t} \dot{K}_t \right) \right\} + \\ &\quad + \sum_{l=3}^n \sum_{|\nu|=l} \left\{ \nabla^\Theta c_{\nu t} \left[ \varphi_{\kappa \nu} + (\psi_{\kappa \nu}^{m_t})^T \dot{m}_t \right] + c_{\nu t} \nabla^\Theta \left[ (\varphi_{\kappa \nu}^{m_t})^T \dot{m}_t \right] \right\}, \\ &\quad \nabla^\Theta c_\kappa(t_0) = 0. \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

Таким образом, в условиях теоремы 5.1 уравнения алгоритма чувствительности МОР имеют вид (24) (**теорема 5.3**).

**Замечание 5.2.** При дифференцировании  $\vartheta^y$  по  $\Theta$  порядок уравнений возрастает пропорционально числу производных. Аналогично выписываются уравнения

для функций чувствительности второго порядка  $\nabla^\Theta(\nabla^\Theta)^T m_t$ ,  $\nabla^\Theta(\nabla^\Theta)^T K_t$  и  $\nabla^\Theta(\nabla^\Theta)^T c_{\nu t}$ .

**Замечание 5.3.** Основной вычислительной трудностью практического применения МОР для многомерных дифференциальных МСтС является быстрый рост числа уравнений для  $c_{\nu t}$  с увеличением размерности  $p$  вектора состояния  $Y_t$ . В [1, 2] содержатся таблицы, отражающие эти закономерности. В частности, для МСтС размерности  $p = 10$ , порядка учитываемого вероятностного момента  $N = 4$  и отрезка разложения одномерной плотности  $n_1 = n = 4$  число уравнений составляет  $Q^{\text{MOP}} = 85$ . Описанные в [1, 2] универсальные методы сокращения числа уравнений МОР, основанные на использовании метода С. В. Мальчикова и его обобщений, моментно-семиинвариантных соотношений, соответствующего ряда Эджуорта, а также их комбинации могут быть использованы. В тех случаях, когда известна аналитическая природа нелинейной задачи, применяют метод нормальных координат совместно с обобщенной формулой Ито непосредственно в уравнениях МСтС или в уравнениях (19) и (20).

## 6 Методы аналитического моделирования на основе метода ортогональных разложений для многомерных плотностей

Следуя [10], возьмем следующий конечный отрезок согласованных ортогональных разложений многомерных плотностей:

$$f_n = f_n(y_1, \dots, y_n; \Theta, \vartheta_n^y, t_1, \dots, t_n) \approx w_n(y_1, \dots, y_n; \Theta, \vartheta_n^y, t_1, \dots, t_n) \times \\ \times \left[ 1 + \sum_{l=3}^{n_n} \sum_{|\nu_1|+\dots+|\nu_n|=l} c_{\nu_1, \dots, \nu_n} p_{\nu_1, \dots, \nu_n}(y_1, \dots, y_n) \right].$$

Здесь, в отличие от разд. 5, положим  $Y(t_i) = Y_i$  ( $i = \overline{1, p}$ );  $w_n = \{w_n(y_1, \dots, y_n; \Theta, \vartheta_n^y, t_1, \dots, t_n)\}$  — согласованные последовательности плотностей, имеющие те же вероятностные моменты первого и второго порядка, что и  $f_n$ , вследствие чего каждая из плотностей  $w_n$  зависит как от параметров, так и от значений условного математического ожидания  $m(\Theta, t) = M_{\Delta^y}^{f_1} Y_t$  и условной ковариационной функции  $K(\Theta, t, t') = M_{\Delta^y}^{f_2} [Y^0(\Theta, t) Y^0(\Theta, t')^T]$  при  $t, t' = t_1, \dots, t_n$  ( $n = 1, 2, \dots$ ). Количество

$$c_{\nu_1, \dots, \nu_n}(\Theta, t_1, \dots, t_n) = M_{\Delta^y}^{f_n} [q_{\nu_1, \dots, \nu_n}(Y_1, \dots, Y_n)]$$

представляют собой коэффициенты МОР для многомерного распределения;  $\{p_{\nu_1, \dots, \nu_n}(Y_1, \dots, Y_n), q_{\nu_1, \dots, \nu_n}(Y_1, \dots, Y_n)\}$  — многомерные биортонормальные полиномы, удовлетворяющие условиям согласованности [1, 2]:

$$c_{\nu_1, \dots, \nu_{n-1}, 0}(\Theta, t_1, \dots, t_n) = c_{\nu_1, \dots, \nu_{n-1}}(\Theta, t_1, \dots, t_{n-1}). \quad (25)$$

В результате придем к следующим обыкновенным дифференциальным уравнениям для параметров условного многомерного распределения  $\vartheta_n^y = \{\bar{m}_n; \bar{K}_n; c_{\kappa_1}, \dots, c_{\kappa_n}\}$ :

$$\left. \begin{aligned} \dot{m}_n &= A^{m_n} (m_n(\Theta, t_n), K_n(\Theta, t_n)) ; \\ c_{\nu_n}(\Theta, t_n) &= \varphi_{10}(m_n, K_n, \Theta, t_n) + \sum_{l=1}^{n_1} \sum_{|\nu|=l} \varphi_{1\nu}(m_n, K_n, \Theta, t_n) c_{\nu_n} ; \end{aligned} \right\} \quad (26)$$

$$\begin{aligned} \dot{K}_n &= A^{K_n} (m_n(\Theta, t_n), K_n(\Theta, t_n), c_{\nu_n}(\Theta, t_n)) = \\ &= \varphi_{20}(m_n, K_n, \Theta, t_n) + \sum_{l=1}^{n_1} \sum_{|\nu|=l} \varphi_{2\nu}(m_n, K_n, \Theta, t_n) c_{\nu_n} ; \end{aligned} \quad (27)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial K(t_1, t_2)}{\partial t_2} &= A^{K_2} (m_2(\Theta, t_2), K_2(\Theta, t_2), c_{\nu_1, \nu_2}(\Theta, t_2)) = \\ &= \varphi_{30}(\bar{m}_2, \bar{K}_2, \Theta, t_2) + \sum_{l=3}^{n_2} \sum_{|\nu_1|+|\nu_2|=l} c_{\nu_1, \nu_2} \varphi_{3\nu_1 \nu_2}(\bar{m}_2, \bar{K}_2, \Theta, t_2) ; \end{aligned} \quad (28)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial c_{\kappa_1}, \dots, c_{\kappa_n}(\Theta, t_1, \dots, t_n)}{\partial t_n} &= \\ &= A^{c_\kappa} (m_n, \dot{m}_n, \bar{m}_n, K_n, \dot{K}_n, \bar{K}_n, \dot{K}_h, K_{nh}, \Theta, t_1, \dots, t_n) = \\ &= \varphi_{\kappa_1}, \dots, \kappa_n, 0 (\bar{m}_n, \bar{K}_n, \Theta, t_n) + \psi_{\kappa_1}, \dots, \kappa_n, 0^{m_n} (\bar{m}_n, \bar{K}_n, \Theta, t_n) \dot{m}(t_n) + \\ &\quad + \text{tr} [\psi_{\kappa_1}, \dots, \kappa_n, 0^{K_n} (\bar{m}_n, \bar{K}_n, \Theta, t_n) \dot{K}(t_n)] + \\ &\quad + \sum_{h=1}^{n_n-1} \text{tr} [\psi_{\kappa_1}, \dots, \kappa_n, \nu_1, \dots, \nu_n^{K_h} (\bar{m}_n, \bar{K}_n, \Theta, t_n) \frac{\partial K(t_n, t_h)}{\partial t_n}] + \\ &\quad + \sum_{l=3}^{n_n} \sum_{|\nu_1|+\dots+|\nu_n|=l} c_{\kappa_1}, \dots, \kappa_n, 0 \left\{ \varphi_{\kappa_1}, \dots, \kappa_n, \nu_1, \dots, \nu_n (\bar{m}_n, \bar{K}_n, \Theta, t_n) + \right. \\ &\quad \left. + \psi_{\kappa_1}, \dots, \kappa_n, \nu_1, \dots, \nu_n^{m_n} (\bar{m}_n, \bar{K}_n, \Theta, t_n) \dot{m}(t_n) + \right. \\ &\quad \left. + \text{tr} [\psi_{\kappa_1}, \dots, \kappa_n, \nu_1, \dots, \nu_n^{K_n} (\bar{m}_n, \bar{K}_n, \Theta, t_n) \dot{K}(t_n)] + \right. \\ &\quad \left. + \text{tr} [\psi_{\kappa_1}, \dots, \kappa_n, \nu_1, \dots, \nu_n^{K_h} (\bar{m}_n, \bar{K}_n, \Theta, t_n) \frac{\partial K(t_n, t_h)}{\partial t_n}] \right\} . \end{aligned} \quad (29)$$

Здесь приняты следующие обозначения:

$$\begin{aligned}
 \bar{m}_n &= [m(t_1) \dots m(t_n)]^T; \quad \bar{K}_n = \{K_{ij}(t_n, t_h)\}, \quad i, j = \overline{1, p}; \\
 |\kappa_1|, \dots, |\kappa_n| &= \overline{1, n}; \quad |\kappa_1 + \dots + \kappa_n| = \max \{(3, n, \dots, n_n)\}; \\
 \varphi_{3, \nu_1, \nu_2}(\bar{m}_2, \bar{K}_2, \Theta, t_2) &= M_{\Delta y}^{w_2 p_{\nu_1, \nu_2}} \left\{ [y_1 - m(t_1)] a(y_2, \Theta, t_2)^T \right\}; \\
 \varphi_{\kappa_1, \dots, \kappa_n, \nu_1, \dots, \nu_n}(\bar{m}_n, \bar{K}_n, \Theta, t_n) &= \\
 &= M_{\Delta y}^{w_n p_{\nu_1, \dots, \nu_n}} \left\{ \frac{\partial^T q_{\kappa_1, \dots, \kappa_n}(y_1, \dots, y_n)}{\partial y_n} a(y_n, \Theta, t_n) + \right. \\
 &\quad \left. + \frac{1}{2} \operatorname{tr} \left[ \frac{\partial}{\partial y_n} \frac{\partial^T}{\partial y_n} q_{\kappa_1, \dots, \kappa_n}(y_1, \dots, y_n) \sigma(y_n, \Theta, t_n) \right] + \right. \\
 &\quad \left. + \int_{R_0^q} \left[ q_{\kappa_1, \dots, \kappa_n}(y_1, \dots, y_{n-1}, y_n + c(y_n, \Theta, t_n, v)) - q_{\kappa_1, \dots, \kappa_n}(y_1, \dots, y_n) \times \right. \right. \\
 &\quad \left. \times \frac{\partial^T q_{\kappa_1, \dots, \kappa_n}(y_1, \dots, y_n)}{\partial y_n} c(y_n, \Theta, t_n, v) \right] \nu_P(\Theta, t_n, dv) \right\}; \quad (30)
 \end{aligned}$$

$$\psi_{\kappa_1, \dots, \kappa_n, \nu_1, \dots, \nu_n}^{m_n}(\bar{m}_n, \bar{K}_n, \Theta, t_n) = M_{\Delta y}^{w_n p_{\nu_1, \dots, \nu_n}} [q_{\kappa_1, \dots, \kappa_n}^{m_n}(y_1, \dots, y_n)]; \quad (31)$$

$$\psi_{\kappa_1, \dots, \kappa_n, \nu_1, \dots, \nu_n}^{K_n}(\bar{m}_n, \bar{K}_n, \Theta, t_n) = M_{\Delta Y}^{w_n p_{\nu_1, \dots, \nu_n}} [q_{\kappa_1, \dots, \kappa_n}^{K_n}(y_1, \dots, y_n)]; \quad (32)$$

$$\psi_{\kappa_1, \dots, \kappa_n, \nu_1, \dots, \nu_n}^{K_h}(\bar{m}_n, \bar{K}_n, \Theta, t_n) = M_{\Delta y}^{w_n p_{\nu_1, \dots, \nu_n}} [q_{\kappa_1, \dots, \kappa_n}^{K_h}(y_1, \dots, y_n)], \quad (33)$$

где  $\varphi_{30}$  определяется (30) при  $p_{\nu_1, \nu_2}(y_1, y_2) = p_{0,0}(y_1, y_2) = 1$ ,  $K(t_1, t_1) = K_1$ ;  $q_{\kappa_1, \dots, \kappa_n}^{m_n}(y_1, \dots, y_n)$  — матрица-столбец производных полинома  $q_{\kappa_1, \dots, \kappa_n}(y_1, \dots, y_n)$  по компонентам вектора  $m_n = m(t_n)$ ;  $q_{\kappa_1, \dots, \kappa_n}^{K_h}(y_1, \dots, y_n)$  — квадратная матрица вторых производных полинома  $q_{\kappa_1, \dots, \kappa_n}(y_1, \dots, y_n)$  по элементам матрицы  $K(t_n, t_n)$  ( $h = \overline{1, n}$ );  $q_{\kappa_1, \dots, \kappa_n}^{m_n}(\alpha)$  и  $q_{\kappa_1, \dots, \kappa_n}^{K_h}(\alpha)$  — результат замены одночленов  $y_{11}^{r_{11}}, \dots, y_{1p}^{r_{1p}}, \dots, y_{n1}^{r_{n1}}, \dots, y_{np}^{r_{np}}$  соответствующими моментами  $\alpha_{r_{11}, \dots, r_{1p}, \dots, r_{n1}, \dots, r_{np}}$  в выражениях полиномов  $q_{\kappa_1, \dots, \kappa_n}^{m_n}(\alpha)$  и  $q_{\kappa_1, \dots, \kappa_n}^{K_h}(\alpha)$ ; функции  $\varphi_{\kappa_1, \dots, \kappa_n, 0}$ ,  $\psi_{\kappa_1, \dots, \kappa_n, 0}^{m_n}$ ,  $\psi_{\kappa_1, \dots, \kappa_n, 0}^{K_n}$ ,  $\psi_{\kappa_1, \dots, \kappa_n, 0}^{K_h}$  определяются формулами (25)–(33);  $p_{\nu_1, \dots, \nu_n}(y_1, \dots, y_n) = p_{0, \dots, 0}(y_1, \dots, y_n) = 1$  для  $\nu_1, \dots, \nu_n = 0$ .

Начальные условия для уравнений (26)–(29) имеют следующий вид:

$$m(t_0) = m_0, \quad K(t_0, t_0) = K_0, \quad c_\nu(\Theta, t_0) = c_{\nu 0}; \quad (34)$$

$$K(\Theta, t_1, t_1) = K(\Theta, t_1), \quad c_{\nu_1, \nu_2}(\Theta, t_1, t_1) = c_{\nu_1 + \nu_2}(\Theta, t_1); \quad (35)$$

$$c_{\kappa_1, \dots, \kappa_n}(\Theta, t_1, \dots, t_{n-1}, t_{n-1}) = c_{\kappa_1, \dots, \kappa_{n-1}, \kappa_{n-1} + \kappa_n}(\Theta, t_1, \dots, t_{n-1}). \quad (36)$$

Таким образом, приходим к следующему результату.

**Теорема 6.1.** Если в условиях теоремы 5.1 существует последовательность  $n$ -мерных согласованных распределений СтП  $Y(t)$  при фиксированном векторе параметров  $\Theta$  и согласованное семейство полиномов  $\{p_{\nu_1, \dots, \nu_n}(y_1, \dots, y_n), q_{\nu_1, \dots, \nu_n}(y_1, \dots, y_n)\}$ , то уравнения (26)–(28) при условиях (34)–(36) и конечности интегралов (29)–(33) лежат в основе МОР для многомерных распределений.

Дифференцируя уравнения для параметров плотностей по  $\Theta$ , приходим к следующим уравнениям точности и чувствительности для многомерных распределений:

$$\nabla^\Theta \dot{m}_n = \nabla^\Theta A^{m_n} = A_0^{m_n} + A_{m_n}^{m_n} \nabla^\Theta m_n + A_{K_n}^{m_n} \nabla^\Theta K_n + A_{c_{\nu n}}^{m_n} \nabla^\Theta c_{\nu n}; \quad (37)$$

$$\nabla^\Theta \dot{K}_n = \nabla^\Theta A^{K_n} = A_0^{K_n} + A_{m_n}^{K_n} \nabla^\Theta m_n + A_{K_n}^{K_n} \nabla^\Theta K_n + A_{c_{\nu n}}^{K_n} \nabla^\Theta c_{\nu n}; \quad (38)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t_2} \nabla^\Theta K(\Theta, t_1, t_2) &= \nabla^\Theta A^K = \\ &+ A_0^K + A_{m_2}^K \nabla^\Theta m_2 + A_{K_2}^K \nabla^\Theta K_2 + A_K^K \nabla^\Theta K + A_{c_{\nu 2}}^K \nabla^\Theta c_{\nu 2}; \end{aligned} \quad (39)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t_n} \nabla^\Theta c_{\kappa_1, \dots, \kappa_n}(\Theta, t_1, \dots, t_n) &= \nabla^\Theta A^{c_\kappa} = A_0^{c_\kappa} + A_{m_n}^{c_\kappa} \nabla^\Theta m_n + A_{m_n}^{c_\kappa} \nabla^\Theta \dot{m}_n + \\ &+ A_{K_n}^{c_\kappa} \nabla^\Theta K_n + A_{K_n}^{c_\kappa} \nabla^\Theta \dot{K}_n + A_K^{c_\kappa} \nabla^\Theta K + A_{K,h}^{c_\kappa} \nabla^\Theta K, h. \end{aligned} \quad (40)$$

Таким образом, в условиях теоремы 6.1 уравнения чувствительности МОР имеют вид (37)–(40) (**теорема 6.2**).

**Замечание 6.1.** Приравнивая нулю правые части уравнений (37)–(40), получим конечные уравнения для соответствующих стационарных значений. Суждение о точности и устойчивости стационарных значений можно сделать на основе рассмотрения линейных уравнений в вариациях для (37)–(40). Аналогично выписываются уравнения для функций чувствительности второго порядка  $\nabla^\Theta (\nabla^\Theta)^T \vartheta_n^y$ .

## 7 Методы аналитического моделирования на основе метода квазимоментов

Рассмотрим применение алгоритмов разд. 5 и 6 для случая, когда параметризация распределений проводится на основе МКМ [9, 10]. Тогда при аппроксимации одномерной плотности  $f$  отрезком разложения по многомерным полиномам Эрмита  $\{H_\nu, G_\nu\}$  имеем согласно [1, 2]

$$\left. \begin{aligned} p_\nu(y_t) &= \frac{H_\nu(y_t - m_t)}{\nu_1! \dots \nu_p!}; & q_\nu(y_t) &= G_\nu(y_t - m_t); \\ c_{\nu t} &= q_\nu(\alpha) = G_\nu(\mu); & q_\kappa^{m_t} &= 0; & q_\kappa^{K_t}(\alpha) &= 0 \quad (|\kappa| = 3); \end{aligned} \right\} \quad (41)$$

$$\left. \begin{aligned} q_{\kappa r}^{m_t} &= -\kappa_r c_{\kappa-e_r, t} \quad (r = \overline{1, p}; |\kappa| = 4, \dots, N) ; \\ q_{\kappa rr} &= -\kappa_r \kappa_s c_{\kappa-e_r-e_s, t} \quad (r, s = \overline{1, p}; s > r; |\kappa| = 5, \dots, N) . \end{aligned} \right\} \quad (42)$$

Таким образом, в основе МКМ лежат уравнения теоремы 5.1 при условиях (41) и (42) (**теорема 7.1**).

При использовании согласованных многомерных полиномов Эрмита  $\{H_{\nu_1, \dots, \nu_n}(Y_1, \dots, Y_n), G_{\nu_1, \dots, \nu_n}(Y_1, \dots, Y_n)\}$  [1, 2]:

$$p_{\nu_1, \dots, \nu_n}(y_1, \dots, y_n; t_1, \dots, t_n) = \frac{H_{\nu_1, \dots, \nu_n}(y_1 - m(t_1), \dots, y_n - m(t_n))}{\nu_{11}! \dots \nu_{nr}!} ;$$

$q_{\nu_1, \dots, \nu_n}(y_1, \dots, y_n; t_1, \dots, t_n) = G_{\nu_1, \dots, \nu_n}(y_1 - m(t_1), \dots, y_n - m(t_n))$ ,  
в уравнениях теоремы 6.1 следует положить

$$q_{\kappa_1, \dots, \kappa_n, r}^{m_n}(\alpha) = -\kappa_{nr} c_{\kappa_1, \dots, \kappa_n - e_r} \quad (r = \overline{1, p}; |\kappa_1| + \dots + |\kappa_n| = 4, n_n) ;$$

$$q_{\kappa_1, \dots, \kappa_n, r, s}^{K, h}(\alpha) = -\kappa_{hr} \kappa_{ns} c_{\kappa_1, \dots, \kappa_{h-e_r}, \dots, \kappa_{n-e_s}} \quad (r, s = \overline{1, p}; h = \overline{1, (n-1)}, |\kappa_1| + \dots + |\kappa_n| = \overline{5, n_n}) ;$$

$$q_{\kappa_1, \dots, \kappa_n, rr}^{K_n}(\alpha) = -\frac{1}{2} \kappa_{nr} (\kappa_{nr} - 1) c_{\kappa_1, \dots, \kappa_n - 2e_r} ;$$

$$q_{\kappa_1, \dots, \kappa_n, rs}^{K_n}(\alpha) = -\kappa_{nr} \kappa_{ns} c_{\kappa_1, \dots, \kappa_n - e_r - e_s} \quad (r, s = \overline{1, p}; s \neq r; |\kappa_1| + \dots + |\kappa_n| = \overline{5, n_n}) ;$$

$$\left. \begin{aligned} q_{\kappa_1, \dots, \kappa_n}^{m_n}(\alpha) &= 0 \text{ при } |\kappa_1| + \dots + |\kappa_n| = 3 ; \\ q_{\kappa_1, \dots, \kappa_n}^{K, h}(\alpha) &= 0 \text{ при } |\kappa_1| + \dots + |\kappa_n| = 3 \text{ и } 4 . \end{aligned} \right\} \quad (43)$$

Имеем следующее утверждение.

**Теорема 7.2.** В основе МКМ и многомерных согласованных распределений лежат уравнения теоремы 6.1 при условиях (43).

## 8 Обобщение

Полученные в [9, 10] и разд. 3–7 результаты легко обобщаются на случай дискретных СтС, если воспользоваться результатами [1, 2, 5].

В частности, для дискретных МСтС МОР и аппроксимации, например, одномерной плотности  $f(x)$  на основе пуассоновского эталонного распределения  $w_0(x)$ , плотность  $f(x)$  представляется в виде ряда

$$f(x) = w_0(x) \sum_{\nu=0}^{\infty} c_{\nu} p_{\nu}(x) . \quad (44)$$

Здесь  $p_\nu(x)$  — биортонормальная система полиномов, удовлетворяющая условиям [1, 2, 5]:

$$\int_{-\infty}^{\infty} p_\nu(x) p_\mu(x) w_0(x) dx = \delta_{\nu\mu}, \quad p_0(x) = 1, \quad p_\nu(x) = \sum_{k=0}^{\nu} a_{nk} x^k. \quad (45)$$

Коэффициенты разложения  $c_\nu$  определяются согласно

$$c_\nu = \int_{-\infty}^{\infty} p_\nu(x) f(x) dx = p_\nu(\alpha) \quad (\nu = 0, 1, 2, \dots),$$

где  $p_\nu(\alpha)$  представляет собой результат замены в выражении полинома  $p_\nu(\alpha)$  всех одночленов  $x_\nu^{k_1}, \dots, x_\nu^{k_\nu}$  соответствующими начальными моментами  $\alpha_{k_1, \dots, k_\nu}$  случайной величины (СВ)  $X$  с плотностью  $f(x)$ . В случае скалярной СВ  $X$  и условия (45) имеем:

$$c_0 = 1, \quad c_\nu = a_{\nu 0} + \sum_{k=2}^{\nu} a_{\nu k} \alpha_k, \quad (46)$$

где  $\alpha_k$  — начальный момент порядка  $k$  для СВ  $X$ .

Таким образом, все коэффициенты  $c_\nu$  в (44) легко определяются, если известны конечные начальные вероятностные моменты СВ  $X$ .

Рассмотрим дискретную скалярную СВ  $X$ ,  $f(x)$  которой аппроксимируется рядом ортогонального разложения плотности СВ, возможными значениями которой служит все целые неотрицательные числа, причем

$$P(X = \nu) = p_\nu \quad (\nu = 0, 1, 2, \dots).$$

Выберем эталонное пуассоновское распределение  $w_0(x)$  с тем же начальным вероятностным моментом  $\alpha_1$ :

$$w_0(x) = \sum_{\nu=0}^{\infty} \frac{\alpha_1^\nu}{\nu!} e^{-\alpha_1} \delta(x - \nu).$$

Учтем, что ортонормальные полиномы  $p_\nu(x)$  выражаются через начальные моменты  $\alpha_1^0, \alpha_2^0, \dots$  эталонного распределения  $w_0(x)$  и моменты  $\alpha_1, \alpha_2, \dots$  распределения  $f(x)$  при любых  $w_0(x)$  и  $f(x)$  согласно формуле:

$$p_\nu(x) = \frac{(-1)^\nu \pi_{2\nu}(x)}{\sqrt{\pi_{2\nu-2}(\alpha) \Delta_{2\nu}(x)}} \quad (\nu = 1, 2, \dots),$$

где

$$\pi_{2n}(x) = \begin{vmatrix} 1 & x & \cdots & x^n \\ 1 & \alpha_1^0 & \cdots & \alpha_n^0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \alpha_{n-1}^0 & \alpha_n^0 & \cdots & \alpha_{2n-1}^0 \end{vmatrix} \quad (n = 1, 2, \dots);$$

$$\pi_{2r}(\alpha) = \begin{vmatrix} 1 & \alpha_1^0 & \cdots & \alpha_r^0 \\ \alpha_1^0 & \alpha_2^0 & \cdots & \alpha_{r+1}^0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \alpha_r^0 & \alpha_{r+1}^0 & \cdots & \alpha_{2r}^0 \end{vmatrix} \quad (r = 1, 2, \dots).$$

Тогда в соответствии с (46) коэффициент  $c_\nu$  получается заменой в определи-  
теле  $\Delta_{2\nu}(x)$  степеней аргумента  $x$  соответствующими начальными моментами.  
В результате получим для  $f(x)$  пуассоновское ортогональное разложение:

$$f(x) = w_0(x) \left[ 1 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\pi_{2n}(\alpha)\pi_{2n}(x)}{\pi_{2n-2}(\alpha)\pi_{2n}(x)} \right],$$

где

$$\pi_{2n}(\alpha) = \begin{vmatrix} 1 & \alpha_1 & \cdots & \alpha_n \\ 1 & \alpha_1^0 & \cdots & \alpha_n^0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \alpha_{n-1}^0 & \alpha_n^0 & \cdots & \alpha_{2n-1}^0 \end{vmatrix} \quad (n = 1, 2, \dots).$$

Отсюда при  $\alpha_1^0 = \alpha_1$ , выразив  $\alpha_2^0$  и  $\alpha_3^0$  через  $\alpha_1$  по известным формулам [2],  
получим:

$$f(x) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\alpha_1^n}{n!} \exp(-\alpha_1) \left[ 1 + \frac{\alpha_2 - \alpha_1 - \alpha_1^2}{2} - \right. \\ \left. - \frac{(\alpha_2 - \alpha_1 - \alpha_1^2)(1 + 2\alpha_1)}{2\alpha_1^2} n + \frac{\alpha_2 - \alpha_1 - \alpha_1^2}{2\alpha_1^2} n^2 + \dots \right] \delta(x - n),$$

где  $\alpha_n = \sum_{\nu=1}^{\infty} \nu^n p_\nu$  ( $n = 1, 2, \dots$ ).

## 9 Заключение

Рассмотрены МАМ СтП в конечномерных нелинейных стационарных и не-  
стационарных СтС, не разрешенных относительно производных.

Для аналитического моделирования и оценки точности и чувствительности алгоритмов разработаны усовершенствованные МАМ на основе МНА и МСЛ, МОР и МКМ, а также других методов параметризации одно- и многомерных плотностей.

В приложении П1 даны типовые нелинейности, не разрешенные относительно производных, и коэффициенты их статистической линеаризации, а в приложениях П2 и П3 — два тестовых примера. Алгоритмы положены в основу разрабатываемого экспериментального программного обеспечения для решения задач надежности и безопасности технических систем [11–15].

## Приложения

**П1.** Типовые одно- и многомерные нелинейности, приведенные в [4], если в качестве одной из переменных выбрать  $\dot{Y}_t$ , могут служить моделями нелинейностей, не разрешенных относительно производных.

В таблице на основе [4] составлены аналитические выражения для некоторых типовых одно- и многомерных нелинейностей. В таблице введены следующие обозначения:

$$h = [h_1 \cdots h_n]^T; |h| = h_1 + \cdots + h_n; e_p = \begin{bmatrix} 0 & \cdots & 1 & \cdots & 0 \end{bmatrix};$$

Коэффициенты статистической линеаризации типовых нелинейностей, не разрешенных относительно производных

$\varphi$	$\varphi_0$
$\dot{Y}^{2n+1}$	$\sum_{l=0}^{2n+1} C_{2n+1}^l m^l \mu_{2n+1-l}, D = D_{\dot{Y}}, \mu_{2p} = (2p-1)!!D^p,$ $\mu_{2p+1} = 0, p = 0, 1, 2, \dots$
$\dot{Y}^3$	$\left(3 + \frac{m^2}{D}\right)$
$\sin \omega \dot{Y}$	$\exp\left(-\frac{\omega^2 D}{2}\right) \sin \omega m$
$\dot{Y} \exp(\alpha \dot{Y})$	$(m + \alpha D) \exp\left(\alpha m + \frac{\alpha^2 D}{2}\right)$
$\dot{Y} \cos \omega \dot{Y}$	$(m \cos \omega m - \omega D \sin \omega m) \exp\left(-\frac{\omega^2 D}{2}\right)$
$\operatorname{sgn} \dot{Y}$	$\Phi\left(\frac{m}{\sqrt{D}}\right)$
$\dot{Y}^2 \operatorname{sgn} \dot{Y}$	$2D \left\{ \left(\frac{m^2}{D} + 1\right) \Phi\left(\frac{m}{\sqrt{D}}\right) + \frac{1}{\sqrt{2\pi D}} \exp\left(-\frac{m^2}{2D}\right) \right\}$ $(m = m_{\dot{Y}}, D = D_{\dot{Y}})$

Окончание таблицы на с. 39

Коэффициенты статистической линеаризации типовых нелинейностей, не разрешенных относительно производных (окончание)

$\begin{cases} \frac{l}{d} \dot{Y}, &  \dot{Y}  \leq d; \\ l, & \dot{Y} > d; \\ -l, & \dot{Y} < -d \end{cases}$	$l \left\{ (1 + m_1) \Phi \left( \frac{1 + m_1}{\sigma_1} \right) - (1 - m_1) \Phi \left( \frac{1 - m_1}{\sigma_1} \right) + \right.$ $+ \frac{\sigma_1}{\sqrt{2\pi}} \left[ \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left( \frac{1 + m_1}{\sigma_1} \right)^2 \right\} - \right.$ $\left. \left. - \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left( \frac{1 - m_1}{\sigma_1} \right)^2 \right\} \right] \right\} +$ $(m_1 = m/d, \sigma_1 = \sqrt{D}/d)$
$\begin{cases} \gamma (\dot{Y} + d), & \dot{Y} < -d; \\ 0, &  \dot{Y}  \leq d; \\ \gamma (\dot{Y} - d), & \dot{Y} > d \end{cases}$	$\gamma \left\{ 1 - \frac{1}{m_1} \left[ (1 + m_1) \Phi \left( \frac{1 + m_1}{\sigma_1} \right) - \right. \right.$ $\left. \left. - (1 - m_1) \Phi \left( \frac{1 - m_1}{\sigma_1} \right) \right] + \right.$ $+ \frac{\sigma_1}{m_1 \sqrt{2\pi}} \left[ \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left( \frac{1 - m_1}{\sigma_1} \right)^2 \right\} - \right.$ $\left. \left. - \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left( \frac{1 + m_1}{\sigma_1} \right)^2 \right\} \right] \right\}$
$\begin{cases} -l, & \dot{Y} < -d; \\ 0, &  \dot{Y}  \leq d; \\ l, & \dot{Y} > d \end{cases}$	$l \left[ \Phi \left( \frac{1 + m_1}{\sigma_1} \right) - \Phi \left( \frac{1 - m_1}{\sigma_1} \right) \right]$
$\dot{Y}_1^{n_1} \dot{Y}_2^{n_2}$ $(n = n_1 + n_2 > 1)$	$\alpha_n = m_p \alpha_{n-e_p} + \sum_{r=1}^2 n_r K_{pr} \alpha_{n-e_p-e_r} - K_{pp} \alpha_{n-2e_p}$
$\dot{Y}_1 \dot{Y}_2$	$m_1 m_2 + K_{12}$
$\dot{Y}_1^2 \dot{Y}_2$	$(m_1^2 + K_{11}) m_2 + 2m_1 K_{12}$
$\sin(\omega_1 \dot{Y}_1 + \omega_2 \dot{Y}_2)$	$\exp \left[ -\frac{\omega_1^2 K_{11} + 2\omega_1 \omega_2 K_{12} + \omega_2^2 K_{22}}{2} \right] \sin(\omega_1 m_1 + \omega_2 m_2)$
$\operatorname{sgn}(\dot{Y}_1 + \dot{Y}_2)$	$2\Phi(\zeta_{1,2}), \zeta_{1,2} = \frac{m_1 + m_2}{\sqrt{D}}, D = K_{11} + 2K_{12} + K_{22}$

$$k_p = [k_{p_1} \cdots k_{p_n}] \quad (p = 1, \dots, n), \quad K = [k_{pq}],$$

а через  $\alpha_h$  и  $\mu_h$  обозначены вероятностные начальные и центральные моменты порядка  $h$ ,  $\alpha_0 = 1$ ,  $\alpha_{e_p} = m_p$ . Функцию Лапласа и интеграл от нее возьмем в виде [1, 2]

$$\Phi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^z e^{-t^2/2} dt, \quad \Phi'(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^z e^{-z^2/2} dt.$$

**П2.** Рассмотрим МАМ для скалярной нелинейной СтС вида

$$\varphi \left( Y_t, \dot{Y}_t \right) = \varphi_1 \left( \dot{Y}_t \right) + \varphi_2 \left( Y_t \right) + V_t = 0, \quad (47)$$

где  $\varphi_{1,2}$  — скалярные нелинейные недифференцируемые функции отмеченных переменных;  $V_t$  — гауссовский белый шум интенсивности  $\nu$ . В соответствии с теоремами 3.5 и 3.6 выполним с (47) следующие преобразования: заменим нелинейные функции статистически линеаризованными выражениями:

$$\begin{aligned} \varphi_1 &= \varphi_1 \left( \dot{Y}_t \right) = \varphi_{10} \left( m_t^{\dot{Y}}, D_t^{\dot{Y}} \right) + k_{1\dot{Y}}^{\varphi_1} \left( m_t^{\dot{Y}}, D_t^{\dot{Y}} \right) \dot{Y}_t^0; \\ \varphi_2 &= \varphi_2 \left( Y_t \right) = \varphi_{20} \left( m_t^Y, D_t^Y \right) + k_{1Y}^{\varphi_2} \left( m_t^Y, D_t^Y \right) Y_t^0, \end{aligned}$$

далее составим уравнения для математических ожиданий

$$\varphi_{10} \left( m_t^{\dot{Y}}, D_t^{\dot{Y}} \right) + \varphi_{20} \left( m_t^Y, D_t^Y \right) = 0, \quad m_t^Y = m_t^{\dot{Y}} \quad (48)$$

и центрированных составляющих  $Y_t^0 = Y_t - m_t^Y$ ,  $\dot{Y}_t^0 = \dot{Y}_t - m_t^{\dot{Y}}$ :

$$k_{1\dot{Y}}^{\varphi_1} \left( m_t^{\dot{Y}}, D_t^{\dot{Y}} \right) \dot{Y}_t^0 + k_{1Y}^{\varphi_1} \left( m_t^Y, D_t^Y \right) Y_t^0 + V_t. \quad (49)$$

В предположении

$$k_{1\dot{Y}}^{\varphi_1} = k_{1Y}^{\varphi_1} \left( m_t^{\dot{Y}}, D_t^{\dot{Y}} \right) \neq 0$$

разрешим (49) относительно производной  $\dot{Y}_t^0$

$$\dot{Y}_t^0 = a Y_t^0 + b V_t,$$

положив

$$\begin{aligned} a &= a \left( m_t^{\dot{Y}}, m_t^Y, D_t^{\dot{Y}}, D_t^Y \right) = -k_{1Y}^{\varphi_2} \left( m_t^Y, D_t^Y \right) \left[ k_{1\dot{Y}}^{\varphi_1} \left( m_t^{\dot{Y}}, D_t^{\dot{Y}} \right) \right]^{-1}; \\ b &= b \left( m_t^{\dot{Y}}, D_t^{\dot{Y}} \right) \left[ k_{1\dot{Y}}^{\varphi_1} \left( m_t^{\dot{Y}}, D_t^{\dot{Y}} \right) \right]^{-1}. \end{aligned}$$

Наконец, по известным формулам теории линейных стохастических систем [1, 2] получим следующее обыкновенное дифференциальное уравнение для дисперсии  $D_t^Y$ :

$$\dot{D}_t^Y = 2a D_t^Y + b^2 \nu, \quad D_{t_0}^Y = D_0^Y. \quad (50)$$

Уравнения (48) и (50) определяют МАМ на основе МСЛ.

Если существует ковариационно-стационарный процесс и функция  $a_*$  отрицательна, то имеем

$$m_t^{\dot{Y}} = 0; \quad m_*^Y = const; \quad D_*^Y = const = \frac{b^2 \nu_*}{2a_*}.$$

**П3.** Рассмотрим скалярную нелинейную СтС вида

$$\varphi = \dot{Y}_t^3 = -Y_t^3 + Y_t V(\Theta), \quad Y_{t_0} = Y_0. \quad (51)$$

Здесь  $V(\Theta)$  — гауссовский белый шум интенсивности  $\nu = \nu(\Theta)$ . Выполним с (51) следующие преобразования. Проведем статистическую линеаризацию левой части согласно приложению П1:

$$\dot{Y}_t^3 = \varphi_0 \left( m_t^{\dot{Y}}, D_t^{\dot{Y}} \right) + k_{1\dot{Y}}^\varphi \left( m_t^{\dot{Y}}, D_t^{\dot{Y}} \right) \dot{Y}_t^0,$$

где

$$\begin{aligned} \varphi_0 &= \varphi_0 \left( m_t^{\dot{Y}}, D_t^{\dot{Y}} \right) = D_t^{\dot{Y}} \left[ 3 + \frac{\left( m_t^{\dot{Y}} \right)^2}{D_t^{\dot{Y}}} \right]; \\ k_1 &= k_1 \left( m_t^{\dot{Y}}, D_t^{\dot{Y}} \right) = 3D_t^{\dot{Y}} \left[ 1 + \frac{\left( m_t^{\dot{Y}} \right)^2}{D_t^{\dot{Y}}} \right]. \end{aligned}$$

Учитывая, что  $k_1^\varphi \neq 0$ , заменим (51) приближенной системой следующего вида:

$$\dot{Y}_t = \alpha - \beta Y_t^3 + \gamma Y_t V(\Theta), \quad Y(t_0) = Y_0, \quad (52)$$

где

$$\begin{aligned} \alpha &= m_t^{\dot{Y}} - \varphi_0 k_1^{-1} = m_t^{\dot{Y}} - \frac{3 + (m_t^{\dot{Y}})^2 / D_t^{\dot{Y}}}{3 \left[ 1 + (m_t^{\dot{Y}})^2 / D_t^{\dot{Y}} \right]}; \\ \beta &= \gamma = k_1^{-1} = \frac{1}{3D_t^{\dot{Y}} \left[ 1 + (m_t^{\dot{Y}})^2 / D_t^{\dot{Y}} \right]}. \end{aligned}$$

Система (52) при  $\alpha = 0$ ,  $\beta = \gamma = 1$  МОР и МКМ подробно изучена в [9, 10]. Обобщая [9, 10] на случай  $\beta = \gamma \neq 1$  с точностью до вероятностных моментов третьего порядка, придем к следующим взаимосвязанным уравнениям для  $m_t^Y$ ,  $D_t^Y$  и  $c_{3t}$ :

$$\begin{aligned} \dot{m}_t^Y &= \alpha - \beta m_t^Y \left[ (m_t^Y)^2 + 3D_t^Y \right] - c_{3t}, \quad m^Y(t_0) = m_0^Y; \\ \dot{D}_t^Y &= \beta^2 \left[ \nu(\Theta) - 6D_t^Y \right] \left[ (m_t^Y)^2 + D_t^Y \right] - 6\beta m_t^Y c_{3t}, \quad D^Y(t_0) = D_0^Y; \\ \dot{c}_{3t} &= 6\beta^2 \left[ \nu(\Theta) - 3D_t^Y \right] m_t^Y D_t^Y + 3\beta^2 \left[ \nu(\Theta) - 3(m_t^Y)^2 - 9D_t^Y \right] c_{3t}, \quad c_3(t_0) = c_{30}. \end{aligned}$$

Аналогично [9, 10] записываются уравнения для функций чувствительности на основе уравнения (52).

## Литература

1. Пугачёв В. С., Синицын И. Н. Стохастические дифференциальные системы. Анализ и фильтрация. — М.: Наука, 1990. 632 с.
2. Пугачёв В. С., Синицын И. Н. Теория стохастических систем. — М.: Логос, 2000; 2004. 1000 с.
3. Синицын И. Н. Канонические представления случайных функций и их применение в задачах компьютерной поддержки научных исследований. — М.: ТОРУС ПРЕСС, 2009. 768 с.
4. Синицын И. Н., Синицын В. И. Лекции по нормальной и эллипсоидальной аппроксимации распределений в стохастических системах. — М.: ТОРУС ПРЕСС, 2013. 488 с.
5. 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.
6. Синицын И. Н., Синицын В. И. Аналитическое моделирование нормальных процессов в стохастических системах со сложными нелинейностями // Информатика и её применения, 2014. Т. 8. Вып. 3. С. 2–4.
7. Синицын И. Н., Синицын В. И., Сергеев И. В., Корепанов Э. Р., Белоусов В. В., Шоргин В. С. Математическое обеспечение аналитического моделирования стохастических систем со сложными нелинейностями // Системы и средства информатики, 2014. Т. 24. № 3. С. 4–29.
8. Синицын И. Н. Аналитическое моделирование широкополосных процессов в стохастических системах, не разрешенных относительно производных // Информатика и её применение, 2017. Т. 11. Вып. 1. С. 3–19.
9. 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.
10. Синицын И. Н. Применение ортогональных разложений для аналитического моделирования многомерных распределений в нелинейных стохастических системах на многообразиях // Системы и средства информатики, 2015. Т. 25. № 3. С. 4–23.
11. Еванов А. Г., Константинов В. М. Системы со случайными параметрами. — М.: Наука, 1976. 568 с.
12. Справочник по теории автоматического управления / Под ред. А. А. Красовского. — М.: Наука, 1987. 712 с.
13. ГОСТ 23743-88. Изделия авиационной техники. Номенклатура показателей безопасности полета, надежности, контролепригодности, эксплуатационной и ремонтной технологичности.
14. Болотин В. В. Теория надежности машин // Машиностроение: Энциклопедия. Т. IV-3. Надежность машин. — М.: Машиностроение, 1998.
15. Александровская Л. Н., Аронов И. З., Круглов В. И. и др. Безопасность и надежность технических систем. — М.: Университетская книга, Логос, 2008. 376 с.

*Поступила в редакцию 12.12.16*

# PARAMETRIC ANALYTICAL MODELING OF WIDE BAND PROCESSES IN STOCHASTIC SYSTEMS WITH UNSOLVED DERIVATIVES

*I. N. 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:** Methods of parametric analytical modeling (AMM) of stochastic processes in finite dimensional nonlinear stationary and nonstationary stochastic systems with unsolved derivatives are presented. Such models describe technical systems in control and informatics if one neglects transient processes. For analytical modeling and accuracy and sensitivity analysis, the author developed autocorrelated methods based on normal approximation and statistical linearization (NAM and SLM), orthogonal expansions (OEM), and other parametric methods for one- and multidimensional densities. Special attention is paid to AMM for discrete systems by OEM based on the Poisson distribution. Typical nonlinearities with unsolved derivatives and statistical linearization coefficients are given. Test examples are discussed. Algorithms are the basis of experimental software tools for safety and reliability analysis of technical systems that are being developed by the authors.

**Keywords:** accuracy and sensitivity analysis; analytical modeling method; normal approximation method (NAM); one- and multidimensional densities; orthogonal expansions method (OEM); statistical linearization method (SLM); stochastic process (StP); stochastic system (StS); stochastic system with unsolved derivatives

**DOI:** [10.14357/08696527170102](https://doi.org/10.14357/08696527170102)

## Acknowledgments

The work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (project 15-07-02244).

## References

1. Pugachev, V. S., and I. N. Sinitsyn. 1987. *Stochastic differential systems. Analysis and filtering*. Chichester, New York, NY: Jonh Wiley. 549 p.
2. Pugachev, V. S., and I. N. Sinitsyn. 2001. *Stochastic systems. Theory and applications*. Singapore: World Scientific. 908 p.
3. Sinitsyn, I. N. 2009. *Kanonicheskie predstavleniya sluchaynykh funktsiy i ikh prime-nenie v zadachakh kompyuternoy podderzhki nauchnykh issledovaniy* [Canonical representations of stochastic functions and their application in computer support of scientific research]. Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics 2017 vol 27 no 1 43

- expansions of random functions and their application to scientific computer-aided support]. Moscow: TORUS PRESS. 768 p.
4. Sinitsyn, I. N., and V. I. Sinitsyn. 2013. *Lektsii po normal'noy i ellipsoidal'noy approksimatsii raspredeleniy v stokhasticheskikh sistemakh* [Lectures on normal and ellipsoidal approximation of distributions in stochastic systems]. Moscow: TORUS PRESS. 488 p.
  5. Sinitsyn, I. N. 2013. Parametricheskoe statisticheskoe i analiticheskoe modelirovaniye raspredeleniy v nelineynykh stokhasticheskikh sistemakh na mnogoobraziyakh [Parametric statistical and analytical modeling of distributions in stochastic systems on manifolds]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 7(2):4–16.
  6. Sinitsyn, I. N., and V. I. Sinitsyn. 2014. Analiticheskoe modelirovaniye normal'nykh protsessov v stokhasticheskikh sistemakh so slozhnymi nelineynostyami [Analytical modeling of normal processes in stochastic systems with complex nonlinearities]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 8(3):2–4.
  7. Sinitsyn, I. N., V. I. Sinitsyn, I. V. Sergeev, E. R. Korepanov, V. V. Belousov, and V. S. Shorgin. 2014. Matematicheskoe obespechenie analiticheskogo modelirovaniya stokhasticheskikh sistem so slozhnymi nelineynostyami [Mathematical software for analytical modeling of stochastic systems with complex nonlinearities]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 24(3):4–29.
  8. Sinitsyn, I. N. 2017. Analiticheskoe modelirovaniye shirokopolosnykh protsessov v stokhasticheskikh sistemakh, nerazreshennykh otnositel'no proizvodnykh [Analytical modeling of wide band processes in stochastic systems with unsolved derivatives]. *Informatika i ee primenie — Inform. Appl.* 11(1):3–19.
  9. Sinitsyn, I. N. 2015. Analiticheskoe modelirovaniye raspredeleniy metodom ortogonal'nykh razlozheniy v nelineynykh stokhasticheskikh sistemakh na mnogoobraziyakh [Analytical modeling of distributions in nonlinear stochastic systems on manifolds by method of orthogonal expansions]. *Informatika i ee primenie — Inform. Appl.* 9(3):17–24.
  10. Sinitsyn, I. N. 2015. Primenenie ortogonal'nykh razlozheniy dlya analiticheskogo modelirovaniya mnogomernykh raspredeleniy v nelineynykh stokhasticheskikh sistemakh na mnogoobraziyakh [Applications of orthogonal expansions for analytical modeling of multidimensional distributions in stochastic systems on manifold]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 25(3):4–23.
  11. Evlanov, A. G., and V. M. Konstantinov. 1976. *Sistemy so slozhnymi parametrami* [Systems with random parameters]. Moscow: Nauka. 568 p.
  12. Krasovskiy, A. A., ed. 1987. *Spravochnik po teorii avtomaticheskogo upravleniya* [Handbook for automatic control]. Moscow: Nauka. 712 p.
  13. GOST 23743-88. Izdeliya aviationsionnoy tekhniki. Nomenklatura pokazateley bezopasnosti poleta, nadezhnosti, kontroleprigodnosti, ekspluatatsionnoy i remontnoy tekhnologichnosti [Aircraft products. Nomenclature of flight safety indicators, reliability, controllability, operational and repair processability].

14. Bolotin, V. V. 1998. Teoriya nadezhnosti mashin [Theory of machine reliability]. *Mashinostroenie: Entsiklopetsiya. Nadezhnost' mashin* [Mechanical engineering: Encyclopedia. Reliability of machines]. Moscow: Mashinostroenie. Vol. IV-3.
15. Aleksandrovskaia, L. N., I. Z. Aronov, V. I. Kruglov, et al. 2008. *Bezopasnost' i nadezhnost' tekhnicheskikh sistem* [Security and reliability of technical systems]. Moscow: Universitetskaya kniga, Logos. 376 p.

*Received December 12, 2016*

## Contributor

**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

# МАКЕТ ИНТЕРОПЕРАБЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОГО И СЕМАНТИЧЕСКОГО ПОИСКА И АНАЛИЗА ГЕОДАННЫХ\*

*С. К. Дулин<sup>1</sup>, Н. Г. Дуллина<sup>2</sup>, В. В. Косарик<sup>3</sup>, Д. А. Никишин<sup>4</sup>*

**Аннотация:** Описан принцип работы и функциональность макета интероперабельной информационно-аналитической системы, предназначеннной для обеспечения задач пространственного и семантического поиска и анализа географических данных на примере форм рельефа и элементов гидрографической сети на основе разработанной авторами модели интероперабельности. Для целей поиска в массивах геоизображений использован подход, предусматривающий применение не только текстовых, но и визуальных дескрипторов, отражающих содержательные и визуальные (форму, цвет, текстуру) особенности природных геообъектов, процессов или явлений. С этой целью был создан фрагмент вербально-образного тезауруса, содержащий визуальные дескрипторы объектов гидросфера и разработан макет поисковой системы для поиска геообъектов в репозитарии геопространственной информации. Макет системы разработан в среде Microsoft Visual Studio 2008 и функционирует в среде СУБД Microsoft SQL-Server 2005.

**Ключевые слова:** геоданные; семантическая геоинтероперабельность; онтологии; Semantic Web

**DOI:** 10.14357/08696527170103

## 1 Введение

Данная работа посвящена описанию структуры, принципа работы и функциональности макетного образца информационно-аналитической системы, предназначеннной для обеспечения задач пространственного и семантического поиска и анализа географических данных на примере форм рельефа и элементов гидрографической сети и созданной на основе разработанной авторами модели интероперабельности.

---

\* Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 14-07-00040).

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

<sup>2</sup> Вычислительный центр им. А. А. Дородницына Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук, ngdulina@mail.ru

<sup>3</sup> Институт проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук, valery\_lek@mail.ru

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

Процесс создания и необходимость постоянной актуализации геоданных требуют значительных временных, трудовых и финансовых затрат, что обуславливает необходимость совместного, перекрестного использования данных, получаемых из различных источников. Это требует обеспечения удобного и максимально автоматизированного способа поиска и предоставления необходимых данных пользователям в различных областях знания и отраслях производства применительно не только к современным, но и к перспективным вычислительным и телекоммуникационным средствам и системам.

Более того, глобальные вызовы, как, например, представленная в [1] проблема междисциплинарной интероперабельности для глобальных исследований устойчивости, а также проблема обеспечения национальной безопасности в масштабах отдельной страны [2] или международной безопасности вообще, обуславливают необходимость создания глобального знания, на основе которого должны осуществляться непрерывный мониторинг ситуации и построение прогнозов на кратко-, средне- и долгосрочную перспективу.

Разработка инвариантных к форме представления данных, интероперабельных методов поиска и обработки геоданных и геоизображений из множества различных источников данных, а также гармонизации самих источников является активно развивающимся в настоящее время направлением теоретических и прикладных исследований в информатике [3–7].

## 2 Структура географической информации

К географической информации в настоящее время можно отнести различные растровые и векторные данные, планы и карты, а также фотографические (в том числе спектрональные и мультиспектральные), радиолокационные, тепловые и тому подобные изображения земной поверхности и отдельных объектов (включая как аэрокосмические, так и наземные). Также к географической информации относятся и различного рода данные, содержащие пространственную информацию как в явном виде (координаты), так и в неявном — в виде наименований объектов местности или топологической привязки к определенным в пространстве объектам. Использованию информации последнего вида посвящено значительное число публикаций, в том числе [8, 9].

Источники геоданных значительно отличаются как по способу описания, так и по цифровым форматам представления данных. Помимо этого, имеются различия по математической основе (способам географической привязки), точности и степени обработанности геоданных, их тематическому содержанию [10–12].

Для обмена векторными географическими данными между разными информационными системами обычно используются разработанные крупными производителями программного обеспечения (ПО) специальные обменные или просто популярные, ставшие стандартом де-факто форматы (например, DXF, MIF/MID, SHP, SXF и др.) или международные стандарты, например стандарт Open Geospatial Consortium (OGC) или GML.

Данные в растровом виде, предназначенные для профессионального использования, в основном представляются в различных разновидностях формата TIFF (GeoTIFF) (в том числе его многомерных расширениях) или в различных специализированных форматах. Крупные информационные ресурсы обычно реализуют хранение и доступ к своим данным из специализированных баз пространственных данных (наподобие покрытий сервиса Google Earth).

Многообразие способов и форматов организации данных обусловлено противоречивыми требованиями, предъявляемыми как к способам хранения различных компонентов геоданных (их пространственной и семантической составляющей), так и оптимизацией под технологические процессы, в которых эти данные предполагается использовать.

Механизмы для преодоления семантической разнородности в разнообразных информационных источниках являются критическими компонентами любой интероперабельной системы, однако такие механизмы представляют специфические трудности, так как семантическая структура географической информации не может рассматриваться независимо от ее пространственной структуры [8].

Аналогичная ситуация имеет место и для обобществляемых посредством сервис-ориентированной архитектуры (Service-Oriented Architecture, SOA) методов поиска, анализа и обработки пространственных данных. В частности, это касается ряда пространственных задач, решаемых как на поверхности относимости, так и в пространстве, таких как: определение направления, расстояния; построение буферных зон; вычисление зон и объемов (земляных работ, затопления, оползней, селевых масс и т. п.). Основаниями для разнообразия методов обработки, наряду с различиями используемых данных, являются особенности платформы, способы представления чисел и т. п. [11, 12].

### 3 Методология вербально-образного поиска

Разработке интероперабельных методов поиска геоданных, поступающих из множества различных источников данных, в том числе на основе графических и других визуальных примитивов, посвящено значительное число публикаций, в частности [8, 9, 13–15]. Важность обеспечения комбинированного, пространственно-семантического поиска нашла отражение в [8, 9, 14].

Разработка методов представления знаний о геообъектах с использованием существующих конвенциональных систем классификации [4–7], в том числе и вербально-образных [16], в настоящее время также остается актуальной задачей. Так, для поиска геоизображений в [16] было предложено использовать вербальные запросы, дополненные визуальными примитивами (геометрической формой, цветом и текстурой). Принципиальным отличием такого подхода является использование вербально-образных классификаций, построенных на основе конвенциональных морфологических классификаций геообъектов, разработанных в науках о Земле, и заключается в создании системы вербально-образных

знаков и, на ее основе, вербально-образного геотезауруса. Использование подобного решения для построения системы индексирования геообъектов на растровых изображениях, хранящихся в репозиториях пространственных данных, позволяет строить поисковые запросы с использованием не только текстовых, но и визуальных дескрипторов вербально-образного геотезауруса, отражающих содержательные и визуальные особенности природных геообъектов, процессов или явлений. При этом допускаются случаи, когда содержание геоизображений, содержащих информацию о геообъектах, может быть отражено вербально-образными знаками построенной системы, но которые невозможно сконструировать на основе используемой системы вербально-образных знаков.

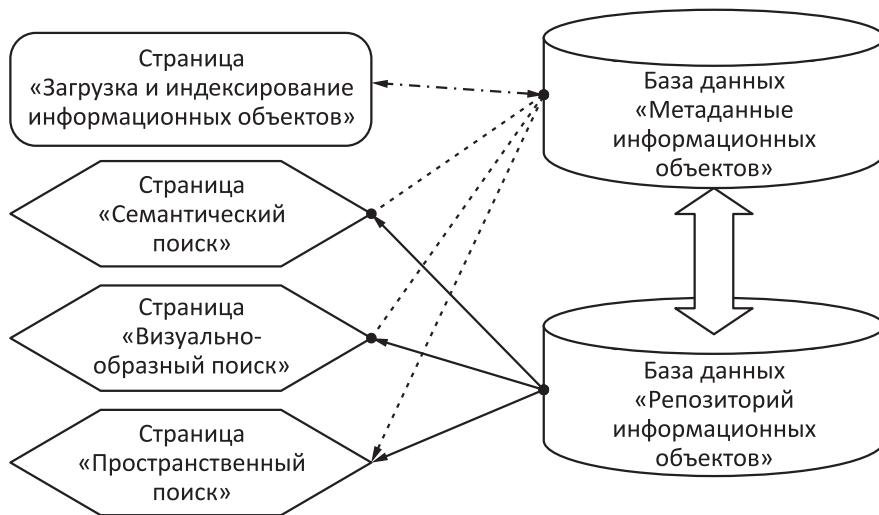
Создание авторами данной работы метода индексирования и поиска геоизображений в разнородных источниках геопространственной информации на основе вербально-образных классификаций включало создание фрагмента системы образных знаков для отображения объектов гидросфера и разработку действующего макета системы поиска геообъектов в репозитории геопространственной информации, демонстрирующего реализуемость предлагаемого метода.

#### 4 Принцип работы макетной модели

Разработанная макетная модель реализована в виде совокупности специализированных баз данных (БД) и веб-страниц, интегрированных в электронный ресурс. Базы данных функционируют на основе системы управления БД (СУБД) Microsoft SQL-Server 2005, веб-страницы разрабатывались на языке Visual Basic .Net Framework в среде Visual Studio 2008. Разработка и функционирование системы осуществляется на операционных системах семейства MS Windows. Общий объем кода в настоящее время составляет порядка 10 Mb. Структура макетной модели представлена на рис. 1.

Информационной базой для работы модели системы является репозиторий информационных объектов. Под информационным объектом в системе понимаются отдельные порции данных любой природы (файлы): растровые изображения или их фрагменты (*англ. tiles*), векторные данные в виде пространственно-семантических описаний отдельных геообъектов (*англ. features*) и их наборов, текстовые и тому подобные описания; в принципе, данными могут выступать и любые другие данные. При создании макетного образца в качестве данных были использованы:

- растровые изображения и их фрагменты: карты, спутниковые изображения, схематические изображения различных типов дельт;
- файлы формата векторных карт с отдельными объектами, представленные в форматах SXF, MIF/MID (MapInfo), SHP (ArcGIS);
- различные текстовые или тексто-графические описания в форматах TXT, DOC, PDF.



**Рис. 1** Структура макетной модели

Для целей индексирования и поиска для каждого объекта данных, включаемого в репозиторий, в структуре данного ресурса ведется БД метаданных, хранящая структуры метаописаний для объектов репозитория.

Метаописание в общем виде содержит:

- пространственные характеристики — точки привязки или координаты габаритных областей объектов (*англ. extent*);
- семантические признаки: собственные наименования местных предметов (рек, городов, горных массивов и т. п.), привязку к структуре классификационных признаков объекта (например, типу местности: дельта, горный район, населенный пункт и т. п.) и некоторые другие;
- визуально-образные пиктограммы, представляющие собой схематичное представление искомой сущности и предназначенные для обеспечения вербально-образного поиска;
- различная служебная информация, необходимая при функционировании системы и ее БД.

Основными рабочими процессами здесь являются:

- I. Загрузка и индексирование данных: данный процесс заключается в загрузке информационных объектов в репозиторий системы (посредством стандартного диалога) с присвоением ему статуса «не проиндексирован». Индексирование объектов осуществляется либо непосредственно после загрузки объекта, либо может быть выполнено после завершения сеанса

загрузки. Для этого вызывается страница «Репозиторий» с фильтром «непройндексированные данные», на которой перечисляются информационные объекты, требующие индексации. Сам процесс индексирования заключается:

- в пространственной привязке — указании пользователем на генеральной карте метрики (точек) пространственной привязки объекта;
- вызове формы метаданных и заполнении ее атрибутивных полей, в том числе указании индекса соответствующего визуально-образного паттерна.

После закрытия формы объект принимает статус «проиндексирован», который свидетельствует о том, что объект имеет по крайней мере одну связь с системой терминов-индексов, однако это не означает, что в дальнейшем невозможно дальнейшее уточнение или дополнение пространственной привязки или индексных атрибутов объекта.

II. Поиск данных. Демонстрационный макет реализует следующие виды поиска:

- A. Вербальный поиск (поиск по семантическим атрибутам). Для этого вида поиска пользователь должен перейти на страницу с семантическим словарем системы. Семантический словарь организован по иерархическому принципу и содержит структуру доступных в системе семантических признаков, фрагмент которой представлен на рис. 2. На верхнем уровне словаря (в его корне) перечисляются системы классификации (по административно-территориальной принадлежности, по геоморфологическому типу местности/объекта, по собственному наименованию объекта местности и т. п.). На последующих уровнях элементы представляют собой промежуточные уровни классификации (например, типы дельт). На самом нижнем уровне элементами словаря являются значения отдельных терминов (названия городов, рек и т. п.). Для задания условия поиска пользователю необходимо выбрать в списке необходимый термин (или несколько терминов, объединенных логическими связками); для удобства создания запроса также предусмотрено поле для свободного ввода. На основе запроса в репозитории данных осуществляется поиск информационных объектов, удовлетворяющих условию поиска. В результате поиска пользователю возвращается таблица с описаниями найденных информационных объектов.
- B. Визуально-образный поиск (поиск по образным паттернам). Данный вид поиска начинается со страницы, содержащей таблицу образных паттернов, соответствующих определенным терминам системы. Визуально-образные паттерны представляют собой схематическое изображение сущности некоторого контента, а сама страница тем самым

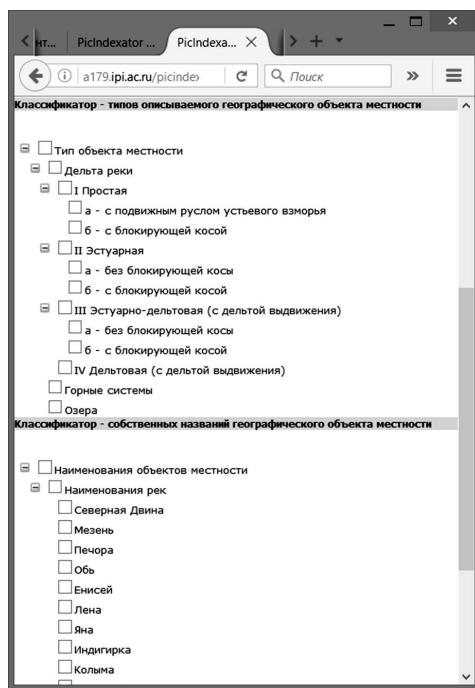


Рис. 2 Фрагмент структуры семантического словаря

выступает словарем образов, ее изображение представлено на рис. 3. В макетном образце данный метод поиска реализован на примере различных типов дельт рек, представленных в виде схематических изображений, их классификация была взята из [17]. Из множества образных паттернов, размещенных на странице в виде таблицы-мозаики, пользователь должен выбрать требуемый (один или несколько), после чего в репозитории осуществляется поиск информационных объектов, приуроченных к данному образному паттерну. По сути, поиск выполняется аналогично семантическому поиску, только вместо текстового значения в качестве условия поиска используется идентификатор соответствующего образа.

- B. Пространственный поиск (поиск по пространственному положению). Специфика работы с геоданными предполагает использование карты в качестве одного из основных видов пользовательского интерфейса [3]. С этой целью в системе предусмотрено использование нескольких различных карт, изображение страницы с одним из вариантов карты представлено на рис. 4. Для этого вида поиска пользователь на-

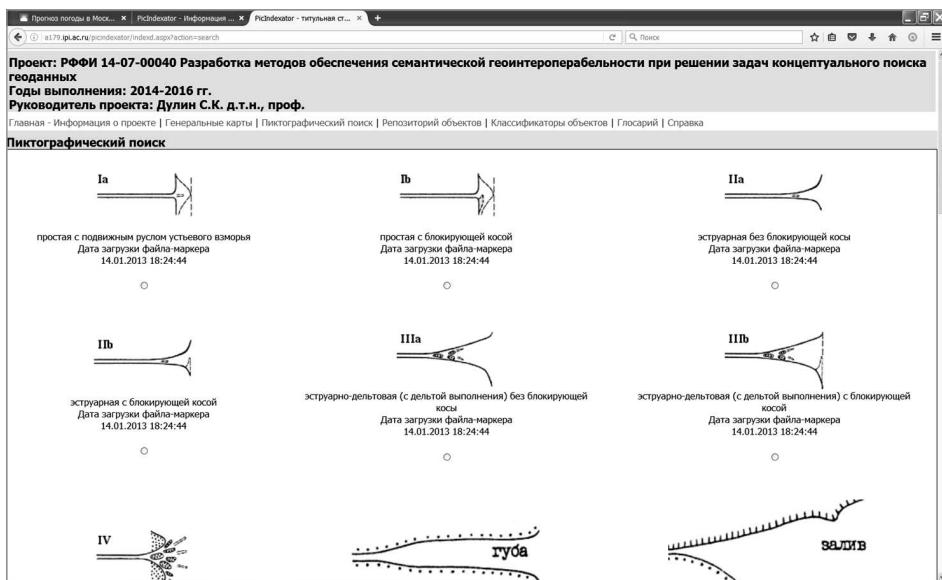


Рис. 3 Фрагмент таблицы образов-маркеров

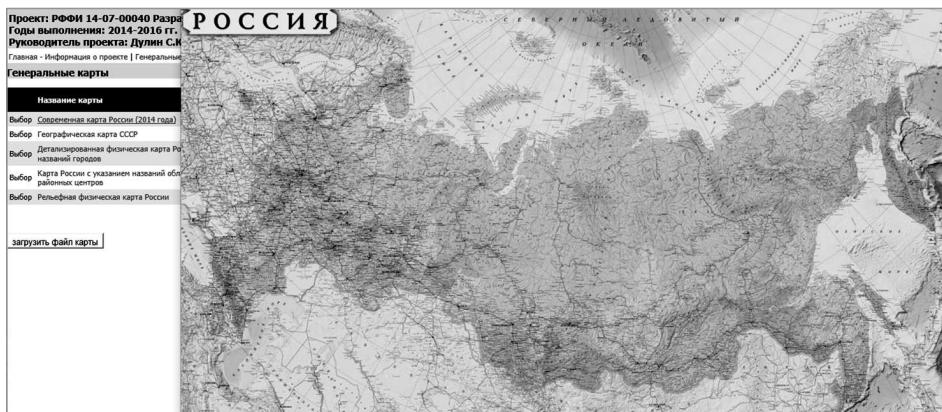


Рис. 4 Страница пространственного поиска (вариант с использованием генеральной карты территории России по состоянию на 2014 г.)

генеральной (общей) карте выделяет прямоугольную область, на основе чего в репозитории данных осуществляется поиск тех объектов данных, которые по атрибуту(ам) своей пространственной привязки попадают в выделенную область. Дополнительным условием поиска может

выступать полное вхождение объекта в заданную область; фильтрация тех объектов, которые по своим габаритам выходят за границы выделенной области, возможна только для объектов, содержащих более одной точки привязки. В общем случае возможна реализация поиска по двум областям (внутренней и внешней, где первая определяет условие поиска, а вторая — условие фильтрации габаритных объектов). В результате поиска пользователю возвращается перечень (таблица) описаний найденных информационных объектов.

Результат всех видов поиска представляет собой набор найденных в репозитории объектов, удовлетворяющих условиям поиска, и может быть представлен либо в виде списка (таблицы) с данными найденных объектов, либо в виде отображения условных маркеров найденных объектов на генеральной карте (в соответствии с их пространственной привязкой).

## **5 Описание пользовательских графических интерфейсов ресурса**

1. Страница «Информация о проектах» является титульной страницей ресурса и содержит перечень проектов, для каждого из которых приведены описание и основные сведения о нем (перечень документов, ссылки на источники и т. п.).
2. Страница «Генеральная карта» служит отправной точкой для выполнения пространственного поиска, а также используется для пространственной привязки данных при их индексировании.
3. Страница «Семантический словарь» выступает отправной точкой для вербального семантического поиска, а также используется в качестве рубрикатора при заполнении полей метаданных индексируемых объектов.
4. Страница «Визуально-образный поиск» является отправной точкой для выполнения образного семантического поиска, а также используется в качестве карты (таблицы) образов при индексировании информационных объектов в образном отношении.
5. Страница «Репозиторий объектов» содержит полный перечень информационных объектов, загруженных в систему. На этой странице доступны функции фильтрации объектов по различным значениям атрибутов, а также вызова перечисленных выше видов поиска (семантический, вербально-образный, пространственный). Также предусматриваются две функциональные кнопки:
  - (а) «Индексирование объекта», посредством которого вызывается форма для заполнения полей метаданных (задание текстовых атрибутов или привязка к образам);

- (6) «Пространственная привязка объекта», посредством которой на изображении генеральной карты пользователь указывает соответствующее местоположение объекта, после чего соответствующие координаты объекта заносятся в структуру его метаданных.
- 6. Страница «Справка» содержит сведения, относящиеся к системе макетных образцов (авторы-разработчики, руководство пользователя и разработчика и т. п.).
- 7. Страница «Глоссарий» содержит описания специальных терминов и носит вспомогательный характер.

## 6 Заключение

В результате проведенных исследований создан действующий макет системы поиска геообъектов в электронной библиотеке геопространственной информации, демонстрирующий реализуемость предлагаемых методов представления знаний о геообъектах, их индексирования и поиска в электронных библиотеках и других хранилищах геопространственной информации на основе фрагмента вербально-образного тезауруса.

С точки зрения практической значимости данная работа позволит создать более совершенные системы поиска применительно к геопространственной информации. Область применения таких систем — от узкоспециализированных организаций, имеющих дело с хранением и обработкой геопространственной информации, до поисковых систем общего пользования.

## Литература

1. *Craglia M., Nativi S., Santoro M., Vaccari L., Fugazza C.* Inter-disciplinary interoperability for global sustainability research // GeoSpatial semantics / Eds. C. Claramunt, S. Levashkin, M. Bertolotto. — Lecture notes in computer science ser. — Heidelberg: Springer, 2011. Vol. 6631. P. 1–15.
2. *Лукьянов Г. В., Никишин Д. А., Веревкин Г. Ф., Косарик В. В.* Нормативные и методологические аспекты организации информационного мониторинга национальной безопасности // Системы и средства информатики, 2015. Т. 25. № 3. С. 225–241.
3. *Lemmens R.* Semantic interoperability of distributed geo-services. — Rotterdam, The Netherlands: Optima Graphic Communication, 2006. 312 p.
4. *Zhao T., Zhang C., Wei M., Peng Z.* Ontology-based geospatial data query and integration // Geographic information science / Eds. T. J. Cova, H. J. Miller, K. Beard, et al. — Lecture notes in computer science ser. — Heidelberg: Springer, 2008. Vol. 5266. P. 370–392.
5. *Buccella A., Cechich A., Fillottrani P.* Ontologydriven geographic information integration: A survey of current approaches // Computers Geosciences, 2009. Vol. 35. P. 710–723.

6. Reitz T., Templer S. An environment for the conceptual harmonisation of geospatial schemas and data // 15th AGILE Conference (International) on Geographic Information Science Proceedings. — Berlin–Heidelberg: Springer-Verlag, 2012. P. 63–68.
7. Leida M., Gusmini A., Davies J. Semantics-aware data integration for heterogeneous data sources // J. Ambient Intelligence Humanized Computing, 2013. Vol. 4. Iss. 4. P. 471–491.
8. Worboys M., Duckham M. Integrating spatio-thematic information // Geographic information science / Eds. M. J. Egenhofer, D. M. Mark. — Lecture notes in computer science ser. — Berlin: Springer, 2002. Vol. 2478. P. 346–361.
9. Younis E., Jones C., Tanasescu V., Abdelmoty A. Hybrid geo-spatial query methods on the semantic Web with a spatially-enhanced index of Dbpedia // Geographic information science / Eds. N. Xiao, M. Kwan, M. F. Goodchild, S. Shekhar. — Lecture notes in computer science ser. — Heidelberg: Springer, 2012. Vol. 7478. P. 340–353.
10. Бородакий Ю. В., Лободинский Ю. Г. К проблеме обеспечения интероперабельности // Информационные технологии и вычислительные системы, 2009. № 5. С. 16–24.
11. Дулин С. К., Дулина Н. Г., Никишин Д. А. Особенности моделей геоданных и методов их обработки в аспекте обеспечения семантической геоинтероперабельности // Информационные технологии, 2015. Т. 21. № 3. С. 224–235.
12. Дулин С. К., Дулина Н. Г., Никишин Д. А. Проблемы обеспечения семантической геоинтероперабельности и согласования понимания семантики геоданных // Системы и средства информатики, 2016. № 1. С. 86–108.
13. Жижимов О. Л., Пестунов И. А., Федотов А. М. Структура сервисов управления метаданными для разнородных информационных систем // Интернет и современное общество: Тр. XIV Всеросс. объединенной конф. — СПб., 2011.
14. Sinha G., Mark D., Kolas D., Varanka D., Romero B., Chen-Chieh F., Usery E., Liebermann J., Sorokine A. An ontology design pattern for surface water features // Geographic information science / Eds. M. Duckham, E. Pebesma, K. Stewart, A. V. Frank. — Lecture notes in computer science ser. — Heidelberg: Springer Cham, 2014. Vol. 8728. P. 187–203.
15. Грищенцев А. Ю., Коробейников А. Г. Средства интероперабельности в распределенных геоинформационных системах // Ж. радиоэлектроники, 2015. № 3. <http://jre.cplire.ru/jre/mar15/7/text.html>.
16. Zatsman I. M. Pictorial signs for geoimages in digital libraries // Eur. J. Semiotic Studies, 2003. Vol. 15. P. 609–620.
17. Михайлов В. Н. Гидрология устьев рек. — М.: МГУ, 1998. 176 с.

Поступила в редакцию 15.02.17

## LAYOUT OF AN INTEROPERABLE INFORMATION-ANALYTICAL SYSTEM FOR SPATIAL AND SEMANTIC SEARCH AND ANALYSIS OF GEODATA

**S. K. Dulin<sup>1</sup>, N. G. Dulina<sup>2</sup>, V. V. Kosarik<sup>1</sup>, and D. A. Nikishin<sup>1</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>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 paper describes the principle of operation and the functionality of the layout of an interoperable information-analytical system designed to perform the tasks of spatial and semantic search and analysis of geographic data by the example of landforms and elements of a hydrographic network on the basis of the model of interoperability proposed by the authors. To search geoimage data in arrays, the authors use an approach taking into account not only text, but also visual descriptors, reflecting the substantial and visual (shape, color, and texture) features of natural geoobjects, processes, or phenomena. The authors created a fragment of a verbal-graphic thesaurus containing visual descriptors of objects of the hydrosphere and designed the layout of the search engine used to search geoobjects in a repository of geospatial information. The layout of the system was developed in Microsoft Visual Studio 2008 and operates using Microsoft SQL Server 2005.

**Keywords:** geodata; semantic geo interoperability; ontologies; Semantic Web

**DOI:** 10.14357/08696527170103

### Acknowledgments

The work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (project 14-07-00040).

### References

1. Craglia, M., S. Nativi, M. Santoro, L. Vaccari, and C. Fugazza. 2011. Interdisciplinary interoperability for global sustainability research. *GeoSpatial semantics*. Eds. C. Claramunt, S. Levashkin, and M. Bertolotto. Lecture notes in computer science ser. Heidelberg: Springer. 6631:1–15.
2. Luk'yanov, G. V., D. A. Nikishin, G. F. Verevkin, and V. V. Kosarik. 2015. Normativnye i metodologicheskie aspekty organizatsii informatsionnogo monitoringa natsional'noy bezopasnosti [Standard and methodological aspects of the organization

- of information monitoring of national security]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 25(3):225–241.
3. Lemmens, R. 2006. *Semantic interoperability of distributed geo-services*. Rotterdam, The Netherlands: Optima Graphic Communication. 312 p.
  4. Zhao, T., C. Zhang, M. Wei, and Z. Peng. 2008. Ontology-based geospatial data query and integration. *Geographic information science*. Eds. T. J. Cova, H. J. Miller, K. Beard, *et al.* Lecture notes in computer science ser. Heidelberg: Springer. 5266:370–392.
  5. Buccella, A., A. Cechich, and P. Fillottrani. 2009. Ontologydriven geographic information integration: A survey of current approaches. *Computers Geosciences* 35:710–723.
  6. Reitz, T., and S. Templer. 2012. An environment for the conceptual harmonisation of geospatial schemas and data. *15th AGILE Conference (International) on Geographic Information Science Proceedings*. Berlin–Heidelberg: Springer-Verlag. 63–68.
  7. Leida, M., A. Gusmini and J. Davies. 2013. Semantics-aware data integration for heterogeneous data sources. *J. Ambient Intelligence Humanized Computing* 4(4):471–491.
  8. Worboys, M. and M. Duckham. 2002. Integrating spatio-thematic information. *Geographic information science*. Eds. M. J. Egenhofer, and D. M. Mark. Lecture notes in computer science ser. Berlin: Springer. 2478:346–361.
  9. Younis, E., C. Jones, V. Tanasescu, and A. I. Abdelmoty. 2012. Hybrid geo-spatial query methods on the semantic Web with a spatially-enhanced index of Dbpedia. *Geographic information science*. Eds. N. Xiao, M. Kwan, M. F. Goodchild, and S. Shekhar. Lecture notes in computer science ser. Heidelberg: Springer. 7478:340–353.
  10. Borodakiy, Yu. V., and Yu. G. Lobodinskiy. 2009. K probleme obespecheniya interoperabel'nosti [To the problem of interoperability]. *Informatsionnye tekhnologii i vychislitel'nye sistemy* [Information Technologies Computing Systems] 5:16–24.
  11. Dulin, S. K., N. G. Dulina, and D. A. Nikishin. 2015. Osobennosti modeley geodannyykh i metodov ikh obrabotki v aspekte obespecheniya semanticeskoy geointeroperabel'nosti [Features of models of geodata and methods of their processing in aspect of ensuring semantic geointeroperability]. *Informatsionnye tekhnologii* [Information Technologies] 21(3):224–235.
  12. Dulin, S. K., N. G. Dulina, and D. A. Nikishin. 2016. Problemy obespecheniya semanticeskoy geointeroperabel'nosti i soglasovaniya ponimaniya semantiki geodannyykh [Problems of maintenance semantic geo-interoperability and the coordination of understanding of geodata semantics]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 26(1):86–108.
  13. Zhizhimov, O. L., I. A. Pestunov, and A. M. Fedotov. 2011. Struktura servisov upravleniya metadannymi dlya raznorodnykh informatsionnykh sistem [The structure of services metadata management for heterogeneous information systems]. *Tr. XIV Vseross. ob"edinennoy konf. "Internet i sovremennoe obshchestvo"* [14th All-Russian Joint Conference “Internet and Modern Society” Proceedings]. St. Petersburg, Russia. 68–74.
  14. Sinha, G., D. Mark, D. Kolas, D. Varanka, B. Romero, F. Chen-Chieh, E. Usery, J. Liebermann, and A. Sorokine. 2014. An ontology design pattern for surface water features. *Geographic information science*. Eds. M. Duckham, E. Pebesma, K. Stewart,

- and A. V. Frank. Lecture notes in computer science ser. Heidelberg: Springer Cham. 8728:187–203.
15. Grishentsev, A. Yu., and A. G. Korobeynikov. 2015. Sredstva interoperabel'nosti v raspredelennykh geoinformatsionnykh sistemakh [Means of interoperability in the distributed geographic information systems]. *Zh. radioelektroniki* [J. Radio Electronics] 3. Available at: <http://jre.cplire.ru/jre/mar15/7/text.html> (accessed August 16, 2016).
  16. Zatsman, I. M. 2003. Pictorial signs for geoimages in digital libraries. *Eur. J. Semiotic Studies* 15:609–620.
  17. Mikhaylov, V. N. 1998. *Gidrologiya ust'ev rek* [Hydrology of river mouths]. Moscow: MSU Publishing House. 176 p.

*Received February 15, 2017*

## Contributors

**Dulin Sergey K.** (b. 1950)— Doctor of Science in technology, professor; leading scientist, Institute of Informatics Problems, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation; s.dulin@ccas.ru

**Dulina Natalia G.** (b. 1947)— Candidate of Science (PhD) in technology, senior scientist, 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; ngdulina@mail.ru

**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

**Kosarik Valerii V.** (b. 1970)— 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; valery\_lek@mail.ru

## ПОРТАЛ MSM TOOLS КАК ГЕТЕРОГЕННЫЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ СЕРВИС\*

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

**Аннотация:** Известна высокая эффективность анализа потоков данных в информационных системах с помощью смешанных вероятностных моделей. При этом результаты методов оценивания неизвестных параметров этих моделей могут существенно различаться в зависимости от возможных деталей реализации. Для решения данной проблемы создан гетерогенный вычислительный сервис **MSM Tools**, реализующий ряд методов анализа на основе смешанных вероятностных моделей. Использованная концепция обеспечивает необходимый уровень виртуализации между реальным оборудованием конкретного исследователя и средствами вычислительного портала, не требует установки дополнительного программного обеспечения — достаточно любого браузера. Приводится описание основных архитектурных и интерфейсных решений, использованных при его разработке. Возможности сервиса продемонстрированы на примере анализа данных профилировщика.

**Ключевые слова:** смешанные вероятностные модели; метод скользящего разделения смесей; гетерогенные вычисления; онлайн-сервис

**DOI:** 10.14357/08696527170104

### 1 Введение

Еще в 1996 г. в статье [1] была отмечена необходимость расширения традиционных форм проведения научных исследований, в том числе на основе взаимодействия посредством сети Интернет, для совместной работы вне рамок конкретных лабораторий, организаций или даже стран. В настоящее время становится очевидно, что такая форма сотрудничества особенно эффективна при взаимодействии исследователей из предметных областей с так называемыми **data scientists** — учеными, специализирующимися на всевозможных аспектах анализа и обработки данных со сложной, а зачастую также и неизвестной структурой. При этом актуальная проблема обработки значительных объемов данных, возникающая в реальных задачах предметных областей, влечет необходимость создания распределенных исследовательских коллективов.

---

\*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты 17-07-00851а и 15-07-05316а).

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

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

Одним из наиболее эффективных решений данной задачи стали системы поддержки научных исследований, построенные на дорогостоящей аппаратной базе [2]. Однако их использование зачастую предъявляет специфические требования к знаниям пользователей, напрямую не связанные с областью их научных интересов, что является безусловным недостатком подобных подходов. Очевидны возникающие инфраструктурные и экономические сложности. Устранение необходимости поддержки и администрирования дорогостоящих вычислительных средств для проведения ресурсоемких исследований возможно на основе использования технологий облачных вычислений. Некоторые специфические требования к облачным сервисам для научной сферы можно найти в работе [3].

Еще одно перспективное направление, позволяющее повысить эффективность исследований, — расширение использования уже имеющейся аппаратной базы современных компьютеров для проведения расчетов в научной сфере за счет задействования «непрофильных» компонентов. Такой подход привел к развитию технологий вычислений на графических процессорах (*GPU, graphics processing units*) в рамках развития идеологии *GPGPU (General-purpose computing for graphics processing units)*, прежде всего на основе технологии *NVIDIA CUDA (Compute Unified Device Architecture)*. Применение графических процессоров для научных исследований весьма привлекательно из-за их относительно низкой стоимости, сочетающейся со значительной производительностью и возможностью реализации достаточно точных численных методов. Наибольшую популярность приобретают гибридные решения, использующие возможности видеокарт для быстрой параллельной обработки данных совместно с традиционными вычислениями на базе центрального процессора (некоторые примеры можно найти, например, в работе [4]). Необходимо отметить, что подобные решения являются базой для так называемых гетерогенных вычислений [5].

Приведем некоторые примеры реальных задач, в которых эффективно используются описанные выше подходы и их комбинации:

- гидрологическое моделирование [6] (облачные технологии, веб-сервис);
- геопространственный анализ, исследование наблюдений за Землей [7] (облачные технологии);
- моделирование процесса распространения лавы при потенциальном вулканическом извержении [8] (на базе *GPGPU*);
- эластография в режиме реального времени [9] (на базе *GPGPU*);
- квантово-химические вычисления [10] (гибридное решение на базе центральных процессоров и *GPU*).

Известна высокая эффективность решения различных задач, связанных с анализом потоков данных в широком спектре информационных систем, на основе применения смешанных вероятностных моделей (см., например, [11, 12]). При этом результаты методов оценивания неизвестных параметров этих моделей могут существенно отличаться в зависимости от реализаций алгоритмов

в конкретных программных комплексах — как из-за особенностей программирования вычислительных процедур, так и вследствие использования различных платформенно- и аппаратно-зависимых решений. В статье [13] была предложена концепция онлайн-комплекса для стохастического моделирования реальных процессов, которая подразумевает создание набора различных методов анализа на основе смешанных вероятностных моделей в рамках единого сервиса. Это позволит существенно расширить потенциальную аудиторию пользователей и обеспечит необходимый уровень виртуализации между реальным оборудованием конкретного исследователя и средствами вычислительного портала. Кроме того, не требуется установка какого-либо дополнительного программного обеспечения — достаточно любого современного браузера. Реализация данной концепции проведена в рамках создания сервиса **MSM Tools** (<http://msm-analysis.com>), учитывающего опыт описанных выше гибридных решений, облачных вычислений и веб-технологий.

В рамках данной статьи приводится описание основных архитектурных и интерфейсных решений, использованных для создания данного гетерогенного вычислительного сервиса, а также продемонстрированы его возможности при работе с реальными данными на примере профилировщика среды **MATLAB**.

## **2 Разработка архитектуры сервиса**

Первоочередной задачей при создании программного комплекса для распределенных вычислений является разработка архитектуры соответствующего решения. Базовые принципы, включая схему потоков данных в системе, были предложены в работе [14]: продемонстрирована общая схема взаимодействия между пользователем, **Frontend**- и **Backend**-компонентами системы, а также серверами-хранилищами баз данных и вычислительными серверами. В данном разделе рассмотрим практическую реализацию концепций работы [14] в рамках разработки портала **MSM Tools**.

Для систем онлайн-обработки данных в реальном времени большую важность представляют вопросы, связанные с масштабированием отдельных частей системы. Специфика решения исследовательских задач на основе смешанных вероятностных моделей такова, что вычислительная сложность используемых алгоритмов может быть значительна, хотя для хранения как анализируемых данных, так и результатов требуется умеренный объем памяти (например, типичный объем экспериментальных выборок составляет от нескольких десятков тысяч до миллиона наблюдений). Это соображение приводит к необходимости выделения двух основных логических частей — сервисной и вычислительной — в архитектуре онлайн-системы.

Сервисная часть системы состоит из **Frontend**- и **Backend**-компонентов, а также серверов баз данных. С ее помощью реализуется основная бизнес-логика системы, поэтому вычислительные сложности, а также необходимость обработки больших данных (**Big Data**) отсутствуют. Решение задач масштабирования

для сервисной части требуется только в случае серьезной пиковой активности пользователей, что является маловероятным сценарием при штатной работе системы поддержки научных исследований.

Вычислительная часть системы получает входные наборы данных и начальные параметры для методов, обеспечивает работу алгоритмов EM-типа (*expectation-maximization*), возвращает оценки неизвестных параметров смешанных вероятностных моделей. При этом детали внутренней реализации вычислительной части скрыты для сервисной: пользователи не могут работать с ней напрямую, все взаимодействие производится сугубо за счет вызовов с Backend-сервера.

Каждый отдельный обработчик вычислительной части должен поддерживать реализацию следующего функционала:

- получение запроса на обработку данных и присвоение ему уникального идентификатора ID;
- загрузка и/или считывание с удаленного сервера файла с наблюдениями в заданном формате;
- ответ на запрос о текущем состоянии процесса анализа данных с заданным ID — для уведомления пользователя о статусе работы вычислительного метода для конкретной выборки;
- возврат результатов в заданном формате Backend-серверу.

Данные пункты реализуются в интерфейсе (API) обработчиков. Приведенный выше список также может быть дополнен следующим расширенным требованием: обработчик должен уметь оповещать Backend-сервер о своем наличии (адресе) при запуске и остановке, а также о текущей загрузке.

Подобный подход обладает несколькими преимуществами. Из-за умеренного списка требований, предъявляемых к API, уменьшаются затраты на разработку вычислительной части. Отдельные обработчики, доступ к которым осуществляется посредством соответствующих API, могут быть написаны на различных языках программирования для интеграции в систему заранее подготовленных реализаций алгоритмов и процедур. Кроме того, они могут быть размещены на иных серверных мощностях, нежели сервисная часть системы. Это, в частности, способствует увеличению стабильности работы системы с точки зрения конечного пользователя — сбой в работе одного из вычислительных серверов не оказывается на функционировании служебной части системы. Очевидна и возможность потенциального сокращения затрат на дорогостоящее оборудование без потери общего качества обслуживания.

Реализация обработчиков с учетом расширенных требований необходима для поддержки динамического масштабирования системы. При увеличении нагрузки на систему или при создании приоритетной заявки на обработку данных в облачном сервисе может быть создан отдельный виртуальный сервер вычислительной части. После успешного запуска он добавляется в пул существующих обработчиков, хранящийся на Backend-сервере. При уменьшении нагрузки и отсутствии

соответствующих задач данный обработчик удаляется из пула с целью экономии ресурсов.

Непосредственно для разработки портала **MSM Tools** были использованы:

- набор инструментов для создания сайтов и веб-приложений **Bootstrap** при разработке интерфейса;
- библиотека **jQuery** для работы с **JavaScript** в клиентской части приложения, включая **DOM**-дерево, обработку событий и асинхронных запросов к **Frontend**-серверу, загрузку файлов и т. д.;
- плагин **jQuery.flot** для отображения информации об исходных и проанализированных выборках;
- PHP-фреймворк **Yii2** для обработки информации на **Frontend**-сервере, например для задач регистрации, авторизации, рендеринга HTML-кода страниц и отправки данных на **Backend**-сервер;
- набор языков и средств программирования (**PHP**, **C#**) для обработки информации на вычислительных серверах при поступлении запроса от **Backend**-сервера.

### 3 Разработка пользовательского интерфейса портала

Еще один важный вопрос — разработка пользовательского интерфейса портала, основные требования к которому были рассмотрены в статье [15]. В данном разделе рассмотрим практическую реализацию данных концепций в рамках разработки портала **MSM Tools**.

Основным элементом интерфейса является область графического вывода, предназначенная для отображения исходного временного ряда, его модификаций в результате предобработки, а также вывода оценок параметров метода скользящего разделения смесей. Можно осуществлять отображение как одного графика, так и нескольких, например для сравнения результатов работы алгоритмов с разными настройками. Поддерживается динамическое масштабирование для графиков в зависимости от настроек браузера.

Пользователю для каждого ряда (в том числе и модифицированного некоторым способом) предлагаются следующие инструменты:

- загрузка выборки для анализа в форматах **CSV** и **TXT**, а также экспорт результатов (в том числе сохранение изображений в формате **PNG**);
- отображение гистограммы для данных и экспорт в формате **PNG**;
- дублирование исходного ряда;
- переход к разностям (в том числе логарифмическим);
- отыскание выборочных моментных характеристик (математическое ожидание, дисперсия и т. п.);
- запуск классического ЕМ-алгоритма (для всех параметров — ширина окна, точность итерационных приближений, величина сдвига и т. п. — предлага-

ются значения по умолчанию, которые основаны на предварительном анализе некоторого укороченного участка ряда с целью получения соответствующих начальных приближений);

- запуск сеточного ЕМ-алгоритма [16] (в том числе в CUDA-версии [17] — в зависимости от доступных обработчиков);
- удаление любых данных (полное, выборочное) из области графического анализа.

В рамках портала предусмотрено наличие пользовательских профилей, доступ к которым требует регистрации и авторизации для каждого сеанса работы. При этом в каждом профиле сохраняются ранее загруженные на сервер данные и полученные результаты обработки, которые доступны для дальнейшего использования и проведения дополнительного анализа.

Из-за высокой вычислительной сложности в ряде ситуаций может потребоваться значительное время для корректного определения параметров выбранной смешанной вероятностной модели, поэтому предусмотрено оповещение пользователей о завершении обработки данных путем отправки сервисного уведомления на e-mail, указанный при регистрации.

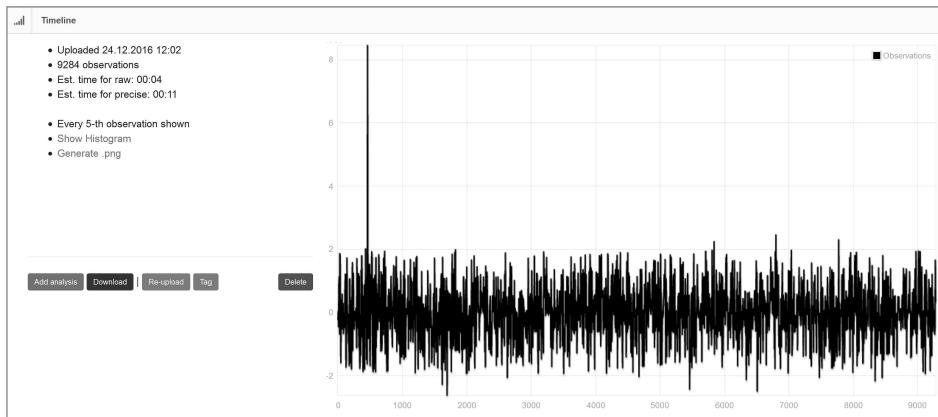
Примеры изображений пользовательского интерфейса системы MSM Tools представлены на рис. 1–4.

#### 4 Пример анализа реальных данных

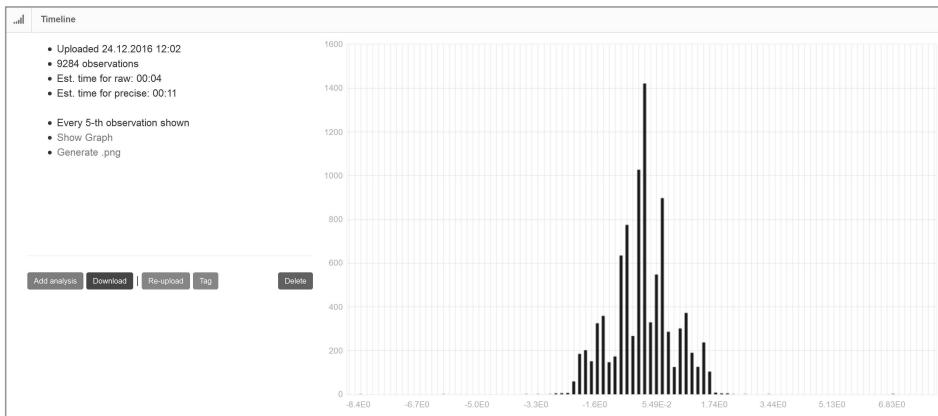
В работе [18] предложен вероятностный подход к анализу характеристик информационно-вычислительных систем на основе метода скользящего разделения смесей как один из возможных способов определения состояния среды выполнения со случайными факторами. В качестве тестовой выборки были использованы сведения о времени выполнения одной из встроенных функций (**surf**) среды MATLAB, предназначеннай для рисования трехмерных поверхностей, при множественных вызовах. В данном разделе рассмотрим процедуру выполнения анализа таких данных с помощью средств сервиса MSM Tools.

На рис. 1 изображены исходные данные — разности между соседними значениями в выборке со временами выполнения функции **surf** (для корректности аппроксимации моделью типа конечных смесей нормальных законов), общий размер — 9284 наблюдения. На рис. 2 представлена гистограмма для всего ряда. Переключение отображения для этих графиков в системе реализуется за счет нажатия на элемент «Show Graph» / «Show Histogram».

Ширина окна для метода скользящего разделения смесей [11] составляет 200 наблюдений, сдвиг окна производится на один элемент на каждом итерационном шаге. Для сравнения результатов были выбраны сеточные модификации ЕМ-алгоритма в «классической» и CUDA-версиях. Используется сетка относительно параметров нормального распределения (математические ожидания и дисперсии) размером  $9 \times 9$ . Веса для каждого положения окна задаются на



**Рис. 1** Данные профилировщика (разности)

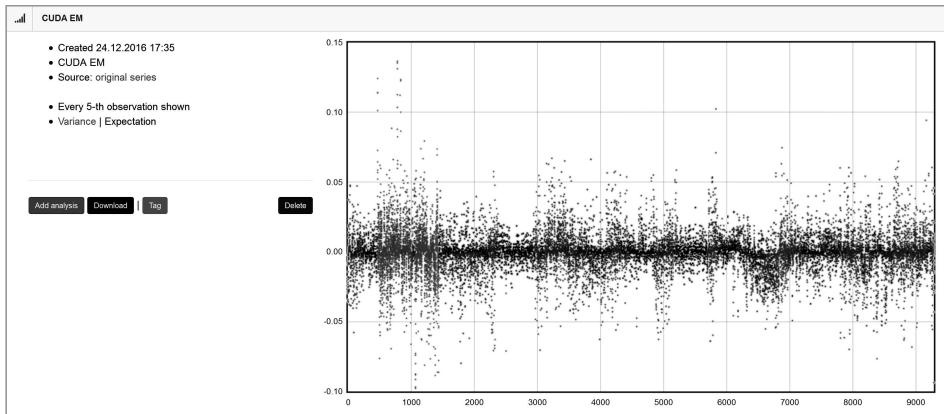


**Рис. 2** Данные профилировщика (гистограмма для разностей)

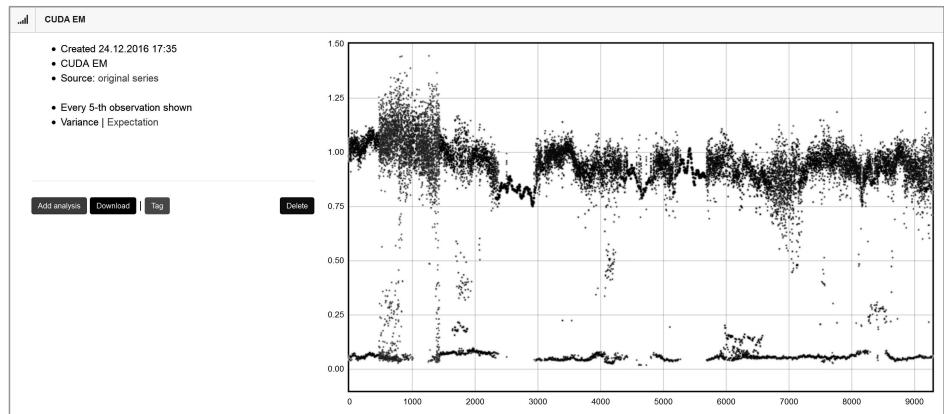
первом шаге случайным образом с проведением соответствующей нормировки — они должны быть неотрицательны и в сумме равняться единице.

Вычислительная точность метода равна  $10^{-8}$ , критерий останова основан на метрике  $l^1$ : сумма модулей изменений весов во всех узлах сетки не должна превышать указанное значение. В алгоритме предусмотрена возможность автоматического изменения параметрической сетки с целью максимизации значения функции правдоподобия полученной модели.

Результаты расчетов в сдвиговом режиме представлены на рис. 3 для динамической (связанной с математическими ожиданиями элементов смеси) и на рис. 4 для диффузионной (связанной с дисперсиями элементов смеси) компонент.



**Рис. 3** Данные профилировщика (динамическая компонента)



**Рис. 4** Данные профилировщика (диффузионная компонента, масштабирование)

Переключение отображения для этих графиков в системе реализуется за счет нажатия на элемент «Expectation» / «Variance». Стоит отметить, что оценки неизвестных параметров модели для двух методов совпали, поэтому на данных графиках приведены значения для CUDA-версии. На рис. 4 график диффузионной компоненты приведен для диапазона от 0 до 1,5 по оси ординат для лучшей детализации элементов, однако вследствие особенностей структуры исходных данных и используемых методов построения сетки на интервале (0, 1000) наблюдаются отдельные локальные «выбросы» величиной от 3 до 5.

На графиках (см. рис. 3 и 4) выделяются несколько структурных компонент (1–3 для различных положений окна), различающихся значениями и весом

(о возможной интерпретации подробнее см. статью [18]). Последний параметр в системе обычно отображается с помощью цвета от темно-синего до красного, который однозначно соответствует значениям весов из диапазона  $[0, 1]$ . В данном случае (для удобства представления результатов в градациях серого) использована интенсивность единственного цвета — чем темнее точка, тем больший вес имеет соответствующая компонента.

Отметим, что CUDA-реализация метода скользящего разделения смесей позволила добиться существенного ускорения при использовании параметрической сетки достаточно большого размера. Так, в среднем на обработку одного окна в рамках CUDA-реализации тратилось около 0,9 с, в то время как для классической реализации — 2,25 с. Все приведенные в данном разделе графики были созданы с помощью средств сервиса **MSM Tools**.

## 5 Заключение

Итак, в рамках реализации описанных выше решений:

- развернут интерфейс взаимодействия между сервисной и вычислительной частью комплекса **MSM Tools**;
- разработан фреймворк для создания отдельных обработчиков вычислительной части;
- созданы обработчики для набора реализаций ЕМ-алгоритма, включая сеточную модификацию, а также версию на архитектуре NVIDIA CUDA.

Это позволило создать гетерогенный вычислительный сервис **MSM Tools** с удобным пользовательским интерфейсом, с реализацией подхода GPGPU с использованием решений платформы NVIDIA CUDA для поиска оценок параметров смешанных вероятностных моделей. Данная система реализует два ключевых преимущества, актуальных для систем поддержки научных исследований. Во-первых, конечный пользователь не сталкивается с проблемами работы со сторонним программным обеспечением, корректностью использования результатов в рамках различных лицензий, а также необходимостью задействования собственной специфической аппаратной базы (в частности, и с обучением работы с ней). Во-вторых, сервис **MSM Tools** обеспечивает воспроизводимость результатов, так как реализации алгоритмов для всех пользователей полностью идентичны. Таким образом, возможные различия в результатах анализа могут свидетельствовать об особенностях в структуре данных и отличиях в настройках методов, но не являются следствием программистского мастерства конкретного исследователя некоторой предметной области.

Использование средств сервиса для анализа реальных данных продемонстрировано на примере профилировщика среды MATLAB. Сервис **MSM Tools** может быть успешно применен для автоматизации исследований и в других предметных областях, например для ряда задач [19, 20] в физике плазмы.

## Литература

1. Kouzes R. T., Meyers J. D., Wulf W. A. Collaboratories: Doing science on the Internet // Computer, 1996. Vol. 29. Iss. 8. P. 40–46.
2. Cameron K., Ge R., Feng X. High-performance, power-aware distributed computing for scientific applications // Computer, 2005. Vol. 38. Iss. 11. P. 40–47.
3. Iosup A., Ostermann S., Yigitbasi M. N., Prodan R., Fahringer T., Epema D. H. J. Performance analysis of cloud computing services for many-tasks scientific computing // IEEE Trans. Parall. Distr. Syst., 2011. Vol. 22. Iss. 6. P. 931–945.
4. Papadrakakis M., Stavroulakis G., Karatarakis A. A new era in scientific computing: Domain decomposition methods in hybrid CPU-GPU architectures // Comput. Method. Appl. Mech. Eng., 2011. Vol. 200. Iss. 13–16. P. 1490–1508.
5. Brodtkorb A. R., Dyken C., Hagen T. R., Hjelmervik J. M., Storaasli O. O. State-of-the-art in heterogeneous computing // Sci. Programming, 2010. Vol. 185. Iss. 1. P. 1–33.
6. Burger C. M., Kollet S., Schumacher J., Bosel D. Introduction of a web service for cloud computing with the integrated hydrologic simulation platform ParFlow // Comput. Geosci., 2012. Vol. 48. P. 334–336.
7. Chen Z., Chen N., Yang C., Di L. Cloud computing enabled Web processing service for Earth observation data processing // IEEE J. STARS, 2012. Vol. 5. Iss. 6. P. 1637–1649.
8. D'Ambrosio D., Filippone G., Marocco D., Rongo R., Spataro W. Efficient application of GPGPU for lava flow hazard mapping // J. Supercomput., 2013. Vol. 65. Iss. 2. P. 630–644.
9. Yang X., Deka S., Righetti R. A hybrid CPU-GPGPU approach for real-time elastography // IEEE Trans. Ultrason. Ferr., 2011. Vol. 58. Iss. 12. P. 2631–2645.
10. Maia J. D. C., Carvalho G. A. U., Mangueira C. P., Santana S. R., Cabral L. A. F., Rocha G. B. GPU linear algebra libraries and GPGPU programming for accelerating MOPAC semiempirical quantum chemistry calculations // J. Chem. Theory Comput., 2012. Vol. 8. Iss. 9. P. 3072–3081.
11. Королев В. Ю. Вероятностно-статистические методы декомпозиции волатильности хаотических процессов. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 2011. 512 с.
12. Gorshenin A., Korolev V. Modelling of statistical fluctuations of information flows by mixtures of gamma distributions // 27th European Conference on Modelling and Simulation Proceedings. – Dudweiler, Germany: Digitaldruck Pirrot GmbH, 2013. P. 569–572.
13. Горшенин А. К. Концепция онлайн-комплекса для стохастического моделирования реальных процессов // Информатика и её применения, 2016. Т. 10. Вып. 1. С. 72–81.
14. Gorshenin A., Kuzmin V. Online system for the construction of structural models of information flows // 7th Congress (International) on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops Proceedings. — Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2015. P. 216–219.
15. Gorshenin A., Kuzmin V. On an interface of the online system for a stochastic analysis of the varied information flows // AIP Conference Proceedings, 2016. Vol. 1738. 220009. 4 p.

16. *Gorshenin A., Korolev V., Kuzmin V., Zeifman A.* Coordinate-wise versions of the grid method for the analysis of intensities of non-stationary information flows by moving separation of mixtures of gamma-distribution // 27th European Conference on Modelling and Simulation Proceedings. — Dudweiler, Germany: Digitaldruck Pirrot GmbH, 2013. P. 565–568.
17. *Горшенин А. К., Кузьмин В. Ю.* Применение архитектуры CUDA при реализации сеточных алгоритмов для метода скользящего разделения смесей // Системы и средства информатики, 2016. Т. 26. № 4. С. 60–73.
18. *Gorshenin A., Frenkel S., Korolev V.* On a stochastic approach to a code performance estimation // AIP Conference Proceedings, 2016. Vol. 1738. Р. 220010. 4 p.
19. *Горшенин А. К., Королев В. Ю., Малахов Д. В., Скворцова Н. Н.* Анализ тонкой стохастической структуры хаотических процессов с помощью ядерных оценок // Математическое моделирование, 2011. Т. 23. № 4. С. 83–89.
20. *Батанов Г. М., Горшенин А. К., Королев В. Ю., Малахов Д. В., Скворцова Н. Н.* Эволюция вероятностных характеристик низкочастотной турбулентности плазмы // Математическое моделирование, 2011. Т. 23. № 5. С. 35–55.

*Поступила в редакцию 15.02.17*

---

## **MSM TOOLS AS A HETEROGENEOUS COMPUTING SERVICE**

***A. K. Gorshenin<sup>1</sup> and V. Yu. Kuzmin<sup>2</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>Wi2Geo LLC, 3-1 Mira Ave., Moscow 129090, Russian Federation

**Abstract:** It is known that mixed probability models allow high-performance data-flow analysis in the information systems. However, the resulting estimated parameters of the model can vary significantly depending on the actual realization of algorithms. To solve this problem, the heterogeneous computing service MSM Tools implementing a number of methods based on the analysis of mixed probability models has been created. This approach satisfies the requirement of necessary virtualization between the actual hardware of a researcher and that of a computing service; so, it eliminates the necessity to install any additional software, as the computing service requires only a browser to perform calculations. Main architectural and interface solutions that were used in the development of MSM Tools are described. Functionality of the service is demonstrated by the example of a profiler data analysis.

**Keywords:** mixed probability models; moving separation of mixtures; heterogeneous computing; online service

**DOI:** 10.14357/08696527170104

## Acknowledgments

The research was supported by the Russian Foundation for Basic Research (projects 17-07-00851a and 15-07-05316a).

## References

1. Kouzes, R. T., J. D. Meyers, and W. A. Wulf. 1996. Collaboratories: Doing science on the Internet. *Computer* 29(8):40–46.
2. Cameron, K., R. Ge, and X. Feng. 2005. High-performance, power-aware distributed computing for scientific applications. *Computer* 38(11):40–47.
3. Iosup, A., S. Ostermann, M. N. Yigitbasi, R. Prodan, T. Fahringer, and D. H. J. Epema. 2011. Performance analysis of cloud computing services for many-tasks scientific computing. *IEEE Trans. Parall. Distr. Syst.* 22(6):931–945.
4. Papadrakakis, M., G. Stavroulakis, and A. Karatarakis. 2011. A new era in scientific computing: Domain decomposition methods in hybrid CPU-GPU architectures. *Comput. Method. Appl. Mech. Eng.* 200(13–16):1490–1508.
5. Brodtkorb, A. R., C. Dyken, T. R. Hagen, J. M. Hjelmervik, and O. O. Storaasli. 2010. State-of-the-art in heterogeneous computing. *Sci. Programming* 185(1):1–33.
6. Burger, C. M., S. Kollet, J. Schumacher, and D. Bosel. 2012. Introduction of a web service for cloud computing with the integrated hydrologic simulation platform ParFlow. *Comput. Geosci.* 48:334–336.
7. Chen, Z., N. Chen, C. Yang, and L. Di. 2012. Cloud computing enabled Web processing service for Earth observation data processing. *IEEE J. STARS* 5(6):1637–1649.
8. D'Ambrosio, D., G. Filippone, D. Marocco, R. Rongo, and W. Spataro. 2013. Efficient application of GPGPU for lava flow hazard mapping. *J. Supercomput.* 65(2):630–644.
9. Yang, X., S. Deka, and R. Righetti. 2011. A hybrid CPU-GPGPU approach for real-time elastography. *IEEE Trans. Ultrason. Ferr.* 58(12):2631–2645.
10. Maia, J. D. C., G. A. U. Carvalho, C. P. Mangueira, S. R. Santana, Cabral L. A. F., and G. B. Rocha. 2012. GPU linear algebra libraries and GPGPU programming for accelerating MOPAC semiempirical quantum chemistry calculations. *J. Chem. Theory Comput.* 8(9):3072–3081.
11. 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 Publishing House. 512 p.
12. Gorshenin, A. K., and V. Yu. Korolev. 2013. Modelling of statistical fluctuations of information flows by mixtures of gamma distributions. *27th European Conference on Modelling and Simulation Proceedings*. Dudweiler, Germany: Digitaldruck Pirrot GmbH. 569–572.
13. Gorshenin, A. K. 2016. Kontsepsiya 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.
14. Gorshenin, A. K., and V. Kuzmin. 2015. Online system for the construction of structural models of information flows. *7th Congress (International) on Ultra Modern*

- Telecommunications and Control Systems and Workshops Proceedings.* Piscataway, NJ. 216–219.
15. Gorshenin, A., and V. Kuzmin. 2015. On an interface of the online system for a stochastic analysis of the varied information flows. *AIP Conference Proceedings* 1738:220010. 4 p.
  16. Gorshenin, A., V. Korolev, V. Kuzmin, and A. Zeifman. 2013. Coordinate-wise versions of the grid method for the analysis of intensities of non-stationary information flows by moving separation of mixtures of gamma-distribution. *27th European Conference on Modelling and Simulation Proceedings.* Dudweiler, Germany: Digitaldruck Pirrot GmbH. 565–568.
  17. Gorshenin, A. K., and V. Yu. Kuzmin. 2016. Primenenie arkhitektury CUDA pri realizatsii setochnykh algoritmov dlya metoda skol'zyashchego razdeleniya smesey [Application of the CUDA architecture for implementation of grid-based algorithms for the method of moving separation of mixtures]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 26(4):60–73.
  18. Gorshenin, A., S. Frenkel, and V. Korolev. 2016. On a stochastic approach to a code performance estimation. *AIP Conference Proceedings* 1738:220010. 4 p.
  19. Gorshenin, A. K., V. Yu. Korolev, D. V. Malakhov and N. N. Skvortsova. 2011. Analiz tonkoy stokhasticheskoy struktury khaoticheskikh protsessov s pomoshch'yu yadernykh otcenok [Analysis of fine stochastic structure of chaotic processes by kernel estimators]. *Matematicheskoe modelirovanie* [Mathematical Modeling] 23(4):83–89.
  20. 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. *Mathematical Models Computer Simulations* 4(1):10–25.

*Received February 15, 2017*

## **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 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation; agorshenin@frccsc.ru

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

## О НЕКОТОРЫХ ПОДХОДАХ К ПРЕДСТАВЛЕНИЮ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ КАК ОБЛАЧНОГО СЕРВИСА

*К. И. Волович<sup>1</sup>, А. А. Зацаринный<sup>2</sup>, В. А. Кондрасhev<sup>3</sup>, А. П. Шабанов<sup>4</sup>*

**Аннотация:** Рассматриваются вопросы предоставления услуг по проведению научных исследований и подходы к интеграции научных сервисов в облачную инфраструктуру с предоставлением единого интерфейса доступа потребителей к научным услугам как облачным сервисам. Приводятся обзор и анализ известных категорий облачных сервисов: «программа как услуга — SaaS», «платформа как услуга — PaaS», «инфраструктура как услуга — IaaS». Рассмотрены этапы интеграции научного сервиса в облачные вычисления, разработан и представлен вариант облачной ИТ-инфраструктуры с выделением гипервизора для управления единой информационной средой научных исследований. В целом предложенные подходы позволяют обоснованно ввести и использовать на практике новую категорию облачных сервисов — «научное исследование как услуга — RaaS (Research as a Service)».

**Ключевые слова:** облачный сервис; научный сервис; ИТ-услуга; информационные технологии; информационная поддержка деятельности; оперативно-техническое управление; единая информационная среда

**DOI:** 10.14357/08696527170105

### 1 Введение

Важное место в формировании исследовательской инфраструктуры занимают вопросы развития сети центров коллективного пользования научных организаций, подведомственных Федеральному агентству научных организаций (ФАНО) [1]. При этом особую актуальность приобретает система управления научными сервисами, которая позволила бы, с одной стороны, существенно повысить эффективность использования дорогостоящего уникального оборудования научных организаций, а с другой — создать единое информационное пространство научных сервисов, доступное для всех научных организаций и отдельных ученых, с регламентацией процедур доступа на основе самых современных информационных технологий (ИТ). В конечном итоге создание такой системы

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

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

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

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

управления находится в полном соответствии с современными мировыми тенденциями в различных областях науки с интенсивным использованием данных [2, 3].

Современные тенденции развития ИТ направлены на предоставление пользователям как можно более широкого спектра услуг из самых разных областей человеческой деятельности. Область научных исследований не исключение. Определим некоторые понятия в этой области:

- *научный сервис* — услуга, предоставляемая научной организацией для проведения научных исследований, испытаний и измерений с использованием различных материальных ресурсов (приборов, установок, помещений и пр.) и высококвалифицированного персонала, обладающего научноемкими знаниями и навыками;
- *В-сервис* — услуга, предполагающая предоставление ресурсов средств вычислительной техники (СВТ).

Процедуры предоставления и учета использования В-сервисов достаточно широко изучены и описаны, поскольку на протяжении практически всего времени существования СВТ существует понятие их коллективного использования (в том числе в многопользовательском режиме).

В условиях глобализации рыночной экономики возникает очевидная потребность распространить опыт предоставления В-сервисов на область предложения научных сервисов и учета результатов интеллектуальной деятельности. При этом также очевидно, что научные сервисы имеют разнородную природу и в общем случае не являются В-сервисами.

В настоящей статье рассматриваются проблемы унификации и стандартизации подходов к предоставлению разнородных научных сервисов в парадигме модели облачных вычислений.

## **2 Способы предоставления сервисов в среде облачных вычислений**

Современной тенденцией предоставления В-сервисов являются облачные вычисления. Под парадигмой облачных вычислений [4] принято понимать модель предоставления вычислительных ресурсов, обладающую следующими характеристиками:

- самообслуживание по требованию (on-demand self-service);
- стандартный (в том числе гетерогенный) доступ по вычислительной сети (broad network access);
- мультиарендный (multitenant) пул объединенных ресурсов (resource pooling);
- высокая степень масштабируемости (эластичность, rapid elasticity);
- измеримость (мониторируемость) услуги (measured service).

Применение этой модели к предоставлению В-сервисов обеспечивает выделение и предоставление ресурсов вычислительной техники и программного обеспечения по требованию потребителя на необходимый ему период времени из

динамически распределяемого пула ресурсов, обеспечивающего централизованную обработку и хранение данных с высокой степенью их сохранности (информационной безопасности) [5]. Подобная централизация обеспечивает как снижение стоимости предоставления услуги со стороны провайдера, так и удешевление услуги для потребителя.

Услуги в модели облачных вычислений традиционно разделяют на три категории, характеризующиеся предоставляемым пользователю ресурсом.

### 3 Категории облачных В-сервисов

Самой распространенной категорией является так называемая «программа как услуга» (SaaS — Software as a Service). Данная категория услуг предполагает предоставление пользователю собственного экземпляра программного обеспечения, выполняемого на вычислительных средствах облачного провайдера. В этом случае пользователь получает доступ (как правило, удаленный) к интерфейсу прикладного программного обеспечения, позволяющего решать конкретные задачи пользователя.

Важно отметить, что задача, решаемая пользователем, может не относиться напрямую к ИТ-области, а принадлежать к любой сфере человеческой деятельности. Например, услуга предоставления площадки интернет-магазина, услуг по учету и распределению товаров на складе и т. д. Или же иметь более тесное отношение к ИТ-области, например электронная почта, редактор документов, удаленное хранение данных, различного рода сервисы обмена данными и пр. В любом случае SaaS предполагает выделение для пользователя некоторого вычислительного ресурса (включая прикладное программное обеспечение), обеспечивающего информационную поддержку решения задач данного пользователя.

Что касается предоставления научных сервисов с точки зрения SaaS, то в этом случае также производится выделение вычислительных ресурсов и программного обеспечения для решения исследовательских задач. Задачи могут быть связаны как непосредственно с проведением расчетов, требующих загрузки вычислительных ресурсов, так и сопутствующих задач, связанных с поиском информации, обработкой и визуализацией результатов научных исследований (см., например, [6]).

Другой распространенной категорией услуг в рамках облачных технологий является предоставление вычислительной платформы как услуги (PaaS — Platform as a Service). Данная модель предусматривает предоставление пользователю вычислительных ресурсов и системного программного обеспечения с целью развертывания собственного прикладного программного обеспечения, сервисов и иных программных комплексов.

Услуга PaaS очень удобна для коллективов разработчиков (научных и коммерческих) по развертыванию и эксплуатации собственного программного обеспечения на платформе, услуги по поддержанию которой берет на себя облачный провайдер.

В качестве примеров использования PaaS в области ИТ можно привести примеры создания и эксплуатации крупных веб-порталов коммерческих структур.

В области предоставления научных сервисов ярким примером PaaS служит предоставление услуг суперкомпьютеров для выполнения расчетов, требующих больших вычислительных мощностей. Такие расчеты используются во многих областях современной науки, и услуги суперкомпьютерных центров востребованы со стороны научных коллективов самых разных областей знания. Оговоримся, что в общем случае услугу суперкомпьютерного центра по предоставлению вычислителей нельзя в явном виде считать PaaS именно в терминах облачных вычислений. Алгоритмы распределения ресурсов, выделения вычислителей и обслуживания пользователей суперкомпьютеров отличаются от классической работы облачных провайдеров. В частности, для ускорения процессов вычислений в суперкомпьютерах не используется виртуализация и параллельная работа одного вычислительного блока в интересах группы пользователей. Используется пакетная обработка заданий, очереди заданий и другие методы организации вычислительного процесса, позволяющие оптимизировать работу супервычислителя.

Однако если не рассматривать специфику организации вычислительного процесса, то в определенных терминах можно считать, что суперкомпьютерный центр предоставляет платформу, на которой пользователь устанавливает собственное программное обеспечение, т. е. PaaS [7]. Отметим, что суперкомпьютерные центры также могут предоставлять ряд дополнительных услуг класса SaaS, например для визуализации результатов научных исследований.

Третьим типом услуги, предоставляемой облачными технологиями, является инфраструктура как услуга (IaaS — Infrastructure as a Service). В рамках данной услуги пользователь получает вычислительные ресурсы в виде виртуальных машин, виртуального сетевого оборудования и прочих ресурсов (обычно виртуальных), позволяющих создать любую собственную ИТ-инфраструктуру, отвечающую интересам деятельности пользователя. Разворачивание операционных систем, серверного и прикладного программного обеспечения, конфигурирование вычислительных сетей, управление доступом и пр. осуществляются силами потребителя услуг [8].

Услуга IaaS востребована со стороны коммерческих и научных структур для развертывания информационных систем, однако со стороны индивидуальных пользователей спрос на такую услугу меньше в силу больших трудозатрат на поддержание такой инфраструктуры.

Отметим, что в общем случае облачные сервисы позволяют предоставить практически любые услуги из области ИТ.

## **4 Ступени интеграции научного сервиса в облачные вычисления**

Рассмотрим научный сервис как услугу, предоставляемую научным коллективом в рамках своей области знаний и опыта с использованием, возможно, уникального научного оборудования.

Отметим, что научный сервис в общем случае не является В-сервисом, поскольку необязательно предоставляет (использует) ИТ-ресурсы, но, безусловно, является информационным, так как в конечном итоге результатом любого научного исследования является информация: о постановке задачи, о методах ее решения, о конкретных методиках, о полученных результатах, об их практическом применении, о сравнительной оценке с другими результатами и т. д. и т. п. В совокупности эта информация приводит к появлению новых знаний.

Очевидно, что невозможно поставить знак равенства между научным и В-сервисом, однако имеет смысл сопоставить их между собой с целью унификации способов предоставления научных и В-сервисов с последующей интеграцией научных сервисов в ИТ-инфраструктуру облачных вычислений для использования практического опыта и достижений этой модели оказания услуг.

Первой ступенью интеграции научных сервисов в ИТ-инфраструктуру и облачные вычисления можно считать создание информационного ресурса, обеспечивающего централизованное представление описания сервисов, особенностей их использования, предоставления, а также описания задействованного оборудования. Назовем такой ресурс каталогом научных сервисов.

Каталог позволит обеспечить размещение информации о научном сервисе на облачных ресурсах с предоставлением потенциальным пользователям (научным коллективам и отдельным исследователям) возможности интеллектуального поиска необходимого для выбора сервиса, а также заказа сервиса непосредственно у владельца. Заметим, что, хотя каталог и является удобной информационной услугой, поиск и заказ через него научных сервисов не позволяют интегрировать научный сервис в облачную инфраструктуру. Услуга заказа тех или иных сервисов (необязательно научных) предоставляется большим числом информационных систем, в частности CRM-системами (Customer Relationship Management) — системами управления отношениями с клиентами (см., например, [9]), и не является чем-то новым в области ИТ.

Следующей ступенью интеграции научного сервиса в облачные вычисления может стать частичное использование в процессе предоставления научного сервиса облачной ИТ-инфраструктуры провайдера облачных услуг. Заметим, что, несмотря на возможную обособленность научного сервиса от внешних информационных систем, практически невозможно найти научный сервис, при предоставлении которого не используются СВТ и программное обеспечение. Часто средства СВТ и программное обеспечение интегрированы с научными приборами и установками (возможно, с использованием оператора прибора), что создает предпосылки для включения научного сервиса в модель облачных вычислений. Интеграция научного сервиса и облачных вычислений может осуществляться в направлении обработки результатов научных исследований на ресурсах вычислителей, предоставляемых облачным провайдером, хранении больших массивов информации в «облаках», визуализации результатов научных исследований, распространении и публикации результатов среди научного сообщества.

Такая интеграция потребует модификации процессов предоставления научного сервиса, однако, исходя из общей тенденции перехода на использование облачных технологий, может оказаться полезной для коллектива, предоставляющего научный сервис, с точки зрения оптимизации ресурсов [10].

Третьей ступенью интеграции может стать унификация доступа к научным и облачным сервисам со стороны пользователей, а также унификация алгоритмов предоставления данных сервисов.

## **5 Унификация доступа к научным и облачным сервисам**

Как было показано выше, облачный сервис предоставляется по запросу потребителя путем выделения вычислительного ресурса облачного провайдера. Обычно процесс предоставления такого сервиса полностью автоматизирован и сводится к реализации некоторого бизнес-процесса, обеспечивающего резервирование вычислительных ресурсов, управляемых специализированными программными средствами — гипервизорами (далее — В-гипервизор). Программа, реализующая бизнес-процесс предоставления облачного сервиса, запрашивает резервирование ресурсов у подчиненных программ-гипервизоров, подбирает необходимые ресурсы для формирования конкретного экземпляра услуги и предоставляет пользователю доступ к услуге. На сегодняшний день существует ряд реализаций таких программ управления облачными ресурсами — как коммерческих, так и с открытым исходным кодом. Одной из наиболее известных реализаций является программное обеспечение OpenStack [11].

OpenStack по определенным правилам (интерфейсам) взаимодействует с гипервизорами с целью управления ресурсами. В данном случае речь идет о ресурсах вычислительных, однако если изменить уровень абстракции, то можно рассмотреть вариант специализированного гипервизора, управляющего ресурсами, отличными от вычислительных.

Рассмотрим вариант системы оказания услуг, имеющей возможность предоставлять как облачные В-сервисы, так и научные сервисы с использованием единых подходов и интерфейсов (см. рисунок).

Для этого в систему инкорпорируется специализированный гипервизор (назовем его «гипервизор научных сервисов»), который является системой планирования рабочего времени, материальных ресурсов, построения расписаний загрузки приборов с сохранением управляющего интерфейса традиционного В-гипервизора.

В случае такой глубокой интеграции научного сервиса в облачную инфраструктуру станет возможным использование алгоритмов функционирования гипервизора для выполнения бизнес-процессов предоставления научных сервисов, станет возможной формализация учета используемых ресурсов для оптимизации процессов предоставления научного сервиса на основе опыта управления облачными инфраструктурами. В этом случае можно говорить о научном исследовании, как облачной услуге (RaaS — Research as a Service).



Интеграция научного сервиса в облачную инфраструктуру

Глубокая интеграция научных сервисов в облачные вычисления создает условия для решения ряда научно-практических задач в области:

- создания единой информационной среды для научных исследований, обработки и распространения их результатов;
- разработки технологий оперативно-технического управления научными сервисами.

В качестве методической основы для решения таких задач могут быть использованы результаты исследований, проведенных в ФИЦ ИУ РАН в области критических технологий информационных и управляемых систем [12], к которым относятся:

- (1) технология информационной поддержки деятельности организационных систем — органов власти, ведомств, предприятий, учреждений [13];
- (2) комплекс технических решений [14], лежащих в основе данной технологии (см. п. 1), ключевым среди которых является способ поддержки деятельности организационной системы [15], обеспечивающий информационную поддержку независимо от вида деятельности;
- (3) утверждение о возможности реализации данной технологии (см. п. 1) с учетом рекомендаций ITIL (Библиотека инфраструктуры ИТ) и сервисного

подхода к управлению и организации ИТ-услуг — ITSM (IT Service Management) [16];

- (4) обоснование возможности массового применения этой технологии (см. п. 1) для поддержки бизнес-услуг крупных и средних предприятий [17];
- (5) комплекс технических решений [18, 19] в области интерфейсов для подключения ресурсов научных организаций к корпоративному «облаку». Эти решения обеспечивают создание единой информационно-управляемой среды независимо от наличия тождественности используемых в научных организациях кодов данных команд управления и систем адресации.

## **6 Заключение**

1. Интенсивно развивающиеся процессы систематизации научных услуг в самых различных областях научных исследований, унификации и стандартизации доступа пользователей к научным сервисам обусловливают применение в качестве интеграционной платформы технологий облачных вычислений, в том числе и для управления ресурсами на услуги, которые не являются В-сервисами.
2. Основой такой унификации является интеграция систем управления облачными сервисами с В-гипервизорами и гипервизорами научных сервисов на основе единых интерфейсов и протоколов. Предложен подход, основанный на создании гипервизора научных сервисов, алгоритм функционирования которого направлен на решение задач учета потребленных ресурсов научных исследований на основе составления технологических карт предоставления научных сервисов и описания бизнес-процессов.
3. Предметом научного исследования в данном случае является формализация описания научного исследования, разработка методов такого описания, методов учета ресурсов, описания бизнес-процесса предоставления (разделения) времени использования научного оборудования и использования других сервисов (в том числе и облачных) для выполнения данной услуги. При этом гипервизор научных сервисов представляется такой же сущностью, как и В-гипервизоры, что позволяет унифицировать доступ к ресурсам независимо от их природы.
4. Проведенный анализ ступеней интеграции научного сервиса в облачные вычисления позволяет ввести и использовать на практике новую категорию облачных сервисов — «научное исследование как услуга — RaaS (Research as a Service)».

## **Литература**

1. О требованиях к центрам коллективного пользования научным оборудованием и уникальным научным установкам, которые созданы и (или) функционирование которых

- обеспечивается с привлечением бюджетных средств, и правила их функционирования. Постановление Правительства Российской Федерации от 17 мая 2016 года № 429. [http://fano.gov.ru/ru/documents/card/?id\\_4=66276](http://fano.gov.ru/ru/documents/card/?id_4=66276).
2. Аналитика и управление данными в областях с интенсивным использованием данных // XVIII Междунар. конф. DAMDID/RCDL'2016: Тр. конф. / Под ред. Л. А. Калиниченко, Я. Манолопулоса, С. О. Кузнецова. — М.: ФИЦ ИУ РАН, 2016. 428 с.
  3. Послание Президента Российской Федерации В. В. Путина Федеральному Собранию. Ключевые заявления. — РИА Новости, 01.12.2016. <https://ria.ru/politics/20161201/1482577721.html>.
  4. Mell P., Grance T. NIST SP 800-145. The NIST definition of cloud computing. Recommendations of the National Institute of Standards and Technology. — Gaithersburg, September 2011.
  5. Зацаринный А. А., Гаврилов В. Е. 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. 38–50.
  6. Самоваров О. И., Гайсарян С. С. Архитектура и особенности реализации платформы UniHUB в модели облачных вычислений на базе открытого пакета OpenStack // Труды Института системного программирования РАН, 2014. Т. 26. № 1. С. 403–420.
  7. Баранов А. В., Киселёв Е. А., Ляховец Д. С. Квазипланировщик для использования простаивающих модулей многопроцессорной вычислительной системы под управлением СУППЗ // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Сер. Вычислительная математика и информатика, 2014. Т. 3. № 4. С. 75–84.
  8. Aguado D., Andersen T., Avetisyan A., et al. A practical approach to cloud IaaS with IBM SoftLayer: Presentations guide. — IBM Redbooks, 2016. 362 p.
  9. Mackin J. SuiteCRM for developers. — Victoria, British Columbia, Canada: Leanpub, 2015. 137 p.
  10. Лошкарев П. А., Тохиян О. О., Курлыков А. М., Кошкин К. В., Гладков А. П. Развитие ЕТРИС ДЗЗ с применением облачных технологий // Геоматика, 2013. № 4. С. 22–26.
  11. Jackson K., Bunch C., Sigler E. OpenStack cloud computing cookbook. — Birmingham, UK: Packt Publishing, 2015. 436 p.
  12. Зацаринный А. А., Козлов С. В., Шабанов А. П. Об информационной поддержке деятельности в системах управления критическими технологиями на основе ситуационных центров // Системы управления, связи и безопасности, 2015. № 4. С. 98–113.
  13. Зацаринный А. А., Шабанов А. П. Технология информационной поддержки деятельности организационных систем на основе ситуационных центров. — М.: ТОРУС ПРЕСС, 2015. 232 с.
  14. Шабанов А. П. Инновации: от устройств обмена информацией до интегрированных систем управления. Ч. 2. — Управление деятельностью организационных систем // Системы управления, связи и безопасности, 2016. № 3. С. 179–226.
  15. Зацаринный А. А., Сучков А. П., Шабанов А. П. Способ поддержки деятельности организационной системы. Патент RU2532723C2, опубл. 10.11.2014, бул. № 31.

16. ITIL® V3 Glossary Russian Translation v0.92, April 30, 2009. <https://www.axelos.com/best-practice-solutions/itil>.
17. Боганов А. В., Шабанов А. П. Сервисный подход к оценке эффективности принятия решений по информационному обеспечению деятельности компании // Альманах itSMF России. — М.: ItSMF Russia, 2015. С. 84–91.
18. Зацаринный А. А., Шабанов А. П. Передатчик данных. Патент RU165924U1, опубл. 10.11.2016, бюл. № 31.
19. Зацаринный А. А., Шабанов А. П. Приемник данных. Патент RU165993U1, опубл. 10.11.2016, бюл. № 31.

*Поступила в редакцию 26.12.16*

---

---

## **SCIENTIFIC RESEARCH AS A CLOUD SERVICE**

***K. I. Volovich, A. A. Zatsarinnyy, V. A. Kondrashev, and A. P. Shabanov***

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 issues of providing services for scientific research and approaches to the integration of services into the cloud infrastructure are discussed with the provision of a single interface for user access to scientific services to cloud services. An overview and analysis of the known categories of cloud services are presented: “Software as a Service—SaaS;” “Platform as a Service—PaaS;” and “Infrastructure as a Service—IaaS.” The stages of the integration of the scientific service into cloud computing are considered. The stages of the integration of the scientific service into cloud computing are presented. The version of cloud-based IT infrastructure with hypervisor allocation is developed for unified information environment of scientific research. In general, the suggested approaches allow one to introduce and use in practice a new category of cloud services — “Research as a Service — RaaS.”

**Keywords:** cloud service; scientific service; IT-service; information technology; information support of activities; operational and technical management; unified information environment

**DOI:** 10.14357/08696527170105

## **References**

1. Russian Federation Government. 17.05.2016. O trebovaniyah k tsentram kollektivnogo pol'zovaniya nauchnym oborudovaniem i unikal'nym nauchnym ustanovkam, kotorye sozdany i (ili) funktsionirovanie kotorykh obespechivaetsya s privlecheniem byudzhetnykh sredstv, i pravila ikh funktsionirovaniya [On the requirements for the centers of collective use of scientific equipment and unique scientific installations, which are created and (or) the functioning of which is provided with the involvement of budgetary funds, and the rules of their functioning]. Resolution No. 429.

2. Kalinichenko, L., Y. Manolopoulos, and S. Kuznetsov, eds. 2016. *Data analytics and management in data intensive domain*. 18th Conference (International) DAMDID / RCDL'2016 Proceedings. Moscow: FRC CSC RAS. 428 p.
3. Russian President V. V. Putin. 01.12.2016. Poslanie Federal'nomu Sobraniyu. Klyuchevye zayavleniya [Message to the Federal Assembly. Key statements]. Russian News Agency. Available at: <https://ria.ru/politics/20161201/1482577721.html> (accessed December 21, 2016).
4. Mell, P., and T. Grance. September 2011. NIST SP 800-145. The NIST definition of Cloud Computing. Recommendations of the National Institute of Standards and Technology. Gaithersburg.
5. Gavrilov, V. E., and A. A. Zatsarinnyy. 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):38–50.
6. Samovarov, O. I., and S. S. Gaysaryan. 2014. Arkhitektura i osobennosti realizatsii platformy UniHUB v modeli oblachnykh vychisleniy na baze otkrytogo paketa OpenStack [The web-laboratory architecture based on the cloud and the UniHUB implementation as an extension of the OpenStack platform]. *Proceedings of the Institute for System Programming of the RAS* 26(1):403–420.
7. Baranov, A. V., E. A. Kiselev, D. S. Lyakhovets. 2014. Kvaziplanirovshchik dlya ispol'zovaniya prostaivayushchikh moduley mnogoprotsessornoy vyichislitel'noy sistemy pod upravleniem SUPPZ [The quasi-scheduler for utilization of multiproCESSing computing system's idle resources under control of the management system of the parallel jobs]. *South Ural State University Bull. Computational mathematics and software engineering ser.* 3(4):75–84.
8. Aguado, D., T. Andersen, A. Avetisyan, et al. 2016. *A practical approach to cloud IaaS with IBM SoftLayer: Presentations guide*. IBM Redbooks. 362 p.
9. Mackin, J. 2015. *SuiteCRM for developers*. Leanpub, Victoria, British Columbia, Canada. 137 p.
10. Loshkarev, P., O. Tohiyan, A. Kurlykov, K. Koshkin, and A. Gladkov. 2013. Razvitiye ETRIS DZZ s primenieniem oblachnykh tekhnologiy [The development of ETRIS remote sensing using cloud technologies]. *Geomatics* 4:22–26.
11. Jeckson, K., C. Bunch, and E. Sigler. 2015. *Openstack cloud computing cookbook*. Birmingham, UK: Packt Publishing Ltd. 436 p.
12. Zatsarinnyy, A. A., S. V. Kozlov, and A. P. Shabanov. 2015. Ob informatsionnoy podderzhke deyatel'nosti v sistemakh upravleniya kriticheskimi tekhnologiyami na osnove situatsionnykh tsentrov [Information support for the activities of the critical technologies in control systems based on situational centers]. *Sistemy Upravleniy, svyazi i bezopasnosti* [Systems of Control, Communication, and Security] 4:98–113. Available at: <http://scscc.intelgr.com/archive/2015-04/05-Zatsarinnyy.pdf> (accessed December 22, 2016).
13. Zatsarinnyy, A. A., and A. P. Shabanov. 2015. *Tekhnologiya informatsionnoy podderzhki deyatel'nosti organizatsionnykh sistem na osnove situatsionnykh tsentrov*

- [Information technology support for the activities of the organizational systems based on situational centers]. Moscow: TORUS PRESS. 232 p.
- 14. Shabanov, A. P. 2016. Innovatsii: Ot ustroystva obmena informatsiey do integrirovannykh sistem upravleniya. Ch. 2. — Upravlenie deyatel'nostyu organizatsionnykh sistem [Innovation: Sharing devices to integrated management systems. Pt. 2. — Management of organizational systems]. *Sistemy upravleniy, svyazi i bezopasnosti* [Systems of Control, Communication, and Security] 3:179–226. Available at: <http://sccts.intelgr.com/archive/2016-03/05-Shabanov.pdf> (accessed December 9, 2016).
  - 15. Zatsarinnyy, A. A., A. P. Suchkov, and A. P. Shabanov. Sposob podderzhki deyatel'nosti organizatsionnoy sistemy [Method of supporting operation of organizational system]. Patent RF, No. RU2532723C2. Publ. 10.11.2014. Bull. No. 31.
  - 16. ITIL®. April 30, 2009. Glossary terms and definitions. V3 Glossary Russian Translation v0.92. Available at: <https://www.axelos.com/best-practice-solutions/itil> (accessed April 12, 2017).
  - 17. Boganov, A. V., and A. P. Shabanov. 2015. Servisnyy podkhod k otsenke effektivnosti prinyatiya resheniy po informatsionnomu obespecheniyu deyatel'nosti kompanii [Service approach to assessing the effectiveness of the decision-making process on information management activities of the company]. *Almanac itSMF of Russia*. Moscow: ItSMF Russia. 84–91.
  - 18. Zatsarinnyy, A. A., and A. P. Shabanov. Peredatchik dannykh [Data transmitter]. Patent RF RU165924U1. Publ. 10.11.2016. Bull. No. 31.
  - 19. Zatsarinnyy, A. A., and A. P. Shabanov. Priemnik dannykh [Data receiver]. Patent RF RU165993U1. Publ. 10.11.2016. Bull. No. 31.

Received December 26, 2016

## Contributors

**Volovich Konstantin I.** (b. 1970) — 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; KVVolovich@frccsc.ru

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

**Zatsarinnyy 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, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation; AZatsarinny@ipiran.ru

**Shabanov Alexander P.** (b. 1949) — 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; APShabanov@mail.ru

# ПОЛНОФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ПРОЦЕССНЫЙ ПОДХОД К РЕАЛИЗАЦИИ СИСТЕМ СИТУАЦИОННОГО УПРАВЛЕНИЯ

*А. П. Сучков<sup>1</sup>*

**Аннотация:** Создание полнофункциональной модели автоматизированных информационно-аналитических систем управления представляет собой сложную и актуальную научную проблему. Предлагается реализация системного подхода к решению этой проблемы в предметной области ситуационных систем управления, основанная на применении процессного подхода. Обоснована циклическая полнофункциональная модель систем ситуационного управления, включающая пять стадий: целеполагание, мониторинг, анализ, решение, действие. Осуществлено представление автоматизируемых функций обобщенной системы управления в виде совокупности пяти групп основных взаимосвязанных процессов. Приведено формализованное описание основных процессов деятельности системы управления.

**Ключевые слова:** ситуационная система управления; функциональная модель; процессный подход

**DOI:** 10.14357/08696527170106

## 1 Введение

Каждая система управления опирается на ситуационный подход в силу того, что она должна реагировать на изменения обстановки в контролируемом пространстве, зачастую в режиме реального времени, путем управляющих воздействий на имеющиеся в ее распоряжении ресурсы для достижения поставленных целей. Ситуационный подход, реализующий процессы поддержки принятия решений в системах управления, опирается на такие понятия, как событие, обстановка, ситуация, угроза, управление, целеполагание. Ситуация определяется состоянием взаимосвязанных элементов обстановки в контролируемом пространстве; изменения обстановки определяются событиями, образующими некоторые разворачивающиеся во времени наблюдаемые и регистрируемые потоки. При этом под управлением понимается целенаправленное воздействие органа управления на подчиненные ему или взаимодействующие элементы обстановки (ресурсы) [1].

Создание полнофункциональной модели автоматизированных информационно-аналитических систем управления представляет собой сложную и актуальную научную проблему. В статье предлагается реализация системного подхода к ре-

---

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

шению этой проблемы в предметной области ситуационных систем управления, основанная на применении процессного подхода.

В ИСО 9004:2000 «Системы менеджмента качества — Руководящие указания по улучшению деятельности» о процессном подходе говорится следующее: «Для результативного и эффективного функционирования организация должна определить и управлять многочисленными взаимосвязанными видами деятельности. Деятельность, использующая ресурсы и управляемая с целью преобразования входов в выходы, может рассматриваться как процесс. Часто выход одного процесса образует непосредственно вход следующего. Применение в организации системы процессов, наряду с их идентификацией и взаимодействием, а также менеджмент процессов могут считаться «процессным подходом». Преимущество процессного подхода состоит в непрерывности управления, которое он обеспечивает на стыке между отдельными процессами в рамках системы процессов, а также при их комбинации и взаимодействии».

Поставленная проблема предполагает решение следующих задач:

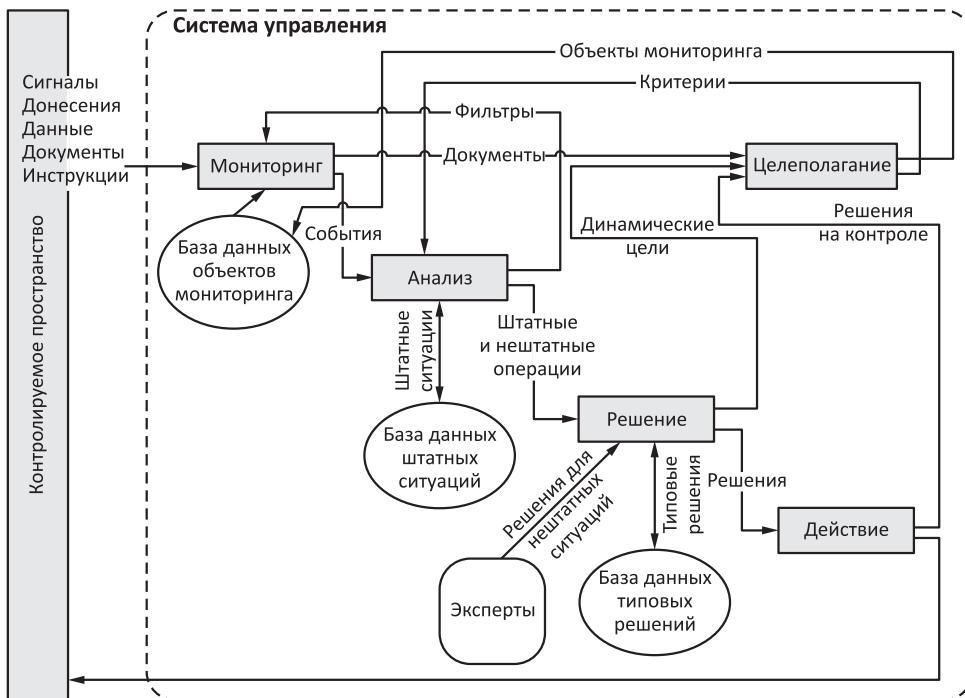
1. Систематизация функциональных задач в соответствии с современными представлениями о законах функционирования систем управления с целью обеспечения их полнофункционального описания.
2. Представление автоматизируемых функций обобщенной системы управления в виде совокупности взаимосвязанных процессов.
3. Описание основных процессов деятельности системы управления.

## **2 Систематизация функциональных задач системы управления**

В самом общем виде функциональные задачи системы управления образуют три группы.

1. Основные — обеспечивают эффективное функционирование системы управления.
2. Вспомогательные — обеспечивают автоматизацию функциональных задач системы управления в объеме, необходимом для эффективного функционирования основных процессов.
3. Обеспечивающие — поддерживают функционирование инфраструктуры системы управления, включая информационную безопасность, управление информационными и техническими ресурсами, управление данными, управление задачами, эксплуатацию систем.

Суть группы основных функциональных задач состоит в реализации процессов управления. В [2–4] обоснована циклическая функциональная модель систем ситуационного управления, включающая пять стадий: целеполагание (Ц), мониторинг (М), анализ (А), решение (Р), действие (Д). В развитие этого подхода предлагается **полнофункциональная модель системы управления**, ориентированная на процессный подход (рис. 1).



**Рис. 1** Функциональная модель ситуационной системы управления

**Целеполагание.** Деятельность системы управления является целесообразной и определяется нормативно-правовыми документами, регламентирующими процессы ее функционирования. Система целей обычно формализуется в виде целевых показателей (ЦП) путем установления количественных и временных критериев их целевых значений (планирование) [3]. Кроме того, при ситуационном управлении возможно установление динамических целей и корректировка стратегических и тактических целей.

**Мониторинг.** На данной стадии управления обеспечивается сбор информации об обстановке в контролируемом пространстве и окружающей среде, включая состояние ЦП. Мониторинг опирается на сенсорную составляющую системы управления, включая объективные и субъективные средства наблюдения, а также различные сканеры информационного пространства. На стадии М учитываются данные стадий Ц и А и осуществляется поддержка стадий Р и Д.

**Анализ.** Здесь осуществляется оценка ситуации (штатная, нештатная) и формирование гипотез о состоянии обстановки, а также анализ и учет существующего опыта. Стадия А опирается на методы декомпозиции складывающихся ситуаций на известные или достаточно простые ситуации для нормализации с помощью

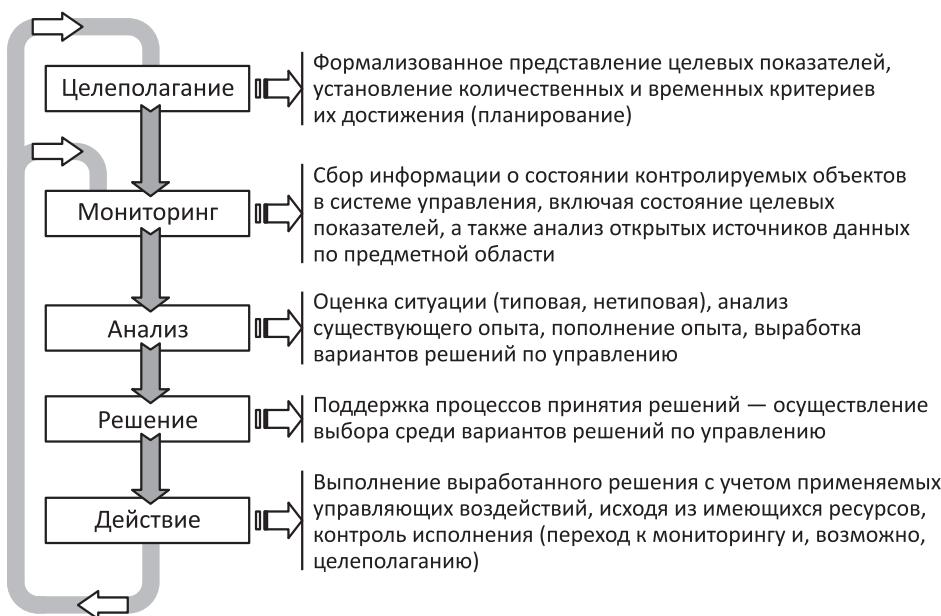
ресурсов системы. Стадия А обеспечивает внутреннюю поддержку стадии М по корректировке параметров и фильтров мониторинга [5].

**Решение.** Осуществляется выбор среди гипотез о состоянии окружающей среды и возможной реакции на него, осуществляется выработка вариантов решений и их сравнительный анализ. Стадия Р опирается на данные стадии А и обеспечивает корректировку состава и параметров объектов мониторинга, возможна корректировка ЦП (стадия Ц) [6].

**Действие.** Осуществляется выполнение выработанного решения с учетом применяемых управляющих воздействий, исходя из имеющихся ресурсов. Действие принимает данные от стадии А, также оно напрямую связано со стадиями Р, М и Ц.

Пять стадий управления реализуют **основной** цикл управления с обратной связью, так как после применения управляющих воздействий осуществляется переход к стадии мониторинга для контроля исполнения и, возможно, к стадии целеполагания для корректировки динамических целей системы (рис. 2)

На всех уровнях управления осуществляются, во-первых, реализация функций мониторинга контролируемого пространства и организации учета контролируемых объектов (стадия М), во-вторых, специальный анализ фактографических данных о конкретных элементах обстановки, формализованных в виде временных



**Рис. 2** Структура основного цикла управления

рядов (массовые потоки событий) или семантической сети (дискретная модель), позволяющий выявлять статистические закономерности и неочевидные связи между элементами обстановки, определять схожие пространственно-событийные ситуации, выявлять ассоциативные связи и закономерности с целью поддержки процессов принятия решений (стадия А), в-третьих, процессы принятия решений по планированию применения сил и средств на период времени и по складывающейся обстановке в соответствии с указаниями вышестоящих органов (стадии Р и Д) [6, 7].

### **3 Процессы, реализующие основные, вспомогательные и обеспечивающие функции**

Таким образом, **основной процесс управления** подразделяется на пять процессов: целеполагание, мониторинг, анализ данных мониторинга, поддержка процессов принятия решений в системе управления, реализация принятых решений. В свою очередь, основные процессы включают ряд **вспомогательных внутренних подпроцессов**. Исходя из выделения пяти основных процессов, предлагается следующая структура процессов, реализующих основную функциональную задачу:

(1) процесс целеполагания (процесс А1), состоящий из следующих подпроцессов:

- подпроцесс учета и доступа к нормативно-правовым документам (подпроцесс А1.1);
- подпроцесс формирования системы ЦП системы управления (подпроцесс А1.2), включая:
  - (а) ЦП, определенные нормативно-правовыми документами федерального уровня;
  - (б) ЦП, определенные нормативно-правовыми документами ведомственного уровня;
  - (в) ЦП, определенные подведомственными организациями;
- подпроцесс определения критериев оценки ЦП всех уровней (пороговые значения и временная привязка), планирования и учета динамических целей (подпроцесс А1.3);

(2) процесс мониторинга (процесс А2), состоящий из следующих подпроцессов:

- подпроцесс учета объектов мониторинга (подпроцесс А2.1);
- подпроцесс мониторинга ЦП (подпроцесс А2.2);
- подпроцесс событийного и регламентного мониторинга контролируемого пространства (подпроцесс А2.3);

- подпроцесс мониторинга исполнения принятых решений (подпроцесс А2.4);
  - подпроцесс мониторинга неструктурированной информации: новостных лент, сайтов научных организаций, сайтов взаимодействующих ведомств (подпроцесс А2.5);
  - подпроцесс визуализации данных мониторинга с индикацией событий и ситуаций в режиме реального времени (подпроцесс А2.6);
- (3) процесс анализа данных мониторинга (процесс А3), состоящий из следующих подпроцессов:
- подпроцесс ситуационного анализа по данным мониторинга, выявление штатных и нештатных ситуаций (подпроцесс А3.1);
  - подпроцесс анализа текущего состояния и прогноза степени реализации плановых показателей (подпроцесс А3.2);
  - подпроцесс анализа эффективности функционирования системы управления и выявления узких мест (подпроцесс А3.3);
  - подпроцесс визуализации аналитических данных с использованием деловой графики (подпроцесс А3.4);
- (4) процесс поддержки процессов принятия решений в системе управления (процесс А4), состоящий из следующих подпроцессов:
- подпроцесс информационно-аналитической поддержки выработки вариантов решений по планированию и по штатным и нештатным ситуациям (подпроцесс А4.1);
  - подпроцесс формирования базы типовых решений по штатным ситуациям (подпроцесс А4.2);
  - подпроцесс формирования динамических целей по принятым решениям (подпроцесс А4.3);
- (5) процесс доведения до подведомственных организаций принятых решений (процесс А5), состоящий из следующих подпроцессов:
- подпроцесс передачи инструкций своим и взаимодействующим силам и средствам (подпроцесс А5.1);
  - подпроцесс формирования сводной отчетности (подпроцесс А5.2).

**Обеспечивающие процессы** технологического управления реализуют следующие функции управления инфраструктурой:

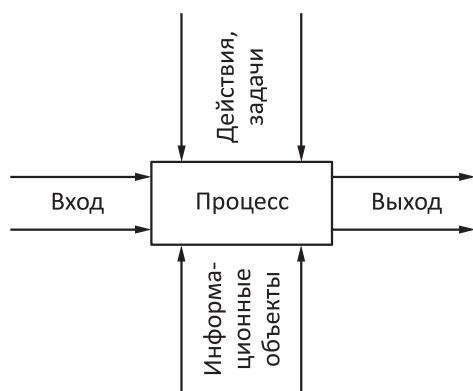
- управление информационными ресурсами;
- организация сетевого взаимодействия;
- обеспечение информационной безопасности и управление доступом к ресурсам.

Исходя из этого, можно выделить и детализировать следующие пять групп обеспечивающих процессов:

- (1) процесс управления задачами, включающий следующие подпроцессы:
  - формирование и управление учетом объектов и задачами мониторинга;
  - формирование и управление базой данных (БД) целевых (плановых) показателей;
  - формирование и управление БД штатных ситуаций;
  - формирование и управление БД типовых решений;
  - формирование и управление списками внешних информационных ресурсов: новостных лент, сайтов научных организаций, сайтов взаимодействующих ведомств;
  - формирование и управление каталогом нормативно-правовых документов;
- (2) процесс обеспечения информационной безопасности, включающий следующие подпроцессы:
  - управление доступом к ресурсам на ролевой основе;
  - управление пользователями и назначение ролей;
  - ведение журналов работы пользователей;
- (3) процесс управления информационными ресурсами, включающий следующие подпроцессы:
  - редактирование справочников и классификаторов;
  - редактирование модели и форм ввода данных;
  - редактирование отчетных и аналитических форм документов;
  - управление интеллектуальным поиском научных сервисов;
  - формирование и управление системами импорта / экспорта данных;
  - контроль логической целостности информационных ресурсов;
- (4) процесс обеспечения и контроля функционирования среды электронного взаимодействия, включающий следующие подпроцессы:
  - управление веб-сервером;
  - управление настройками портала;
  - управление настройками БД;
  - управление настройками системы документооборота;
- (5) процесс управления техническими ресурсами и эксплуатацией системы, включающий следующие подпроцессы:
  - обеспечение бесперебойной работы аппаратных и программных компонентов;
  - регламентное и аварийное техническое обслуживание.

Для обеспечения унифицированного описания процессов согласно ГОСТ Р ИСО / МЭК 24774 (Руководство для описания процесса), используются следующие элементы процесса:

- **название** — описывает достижение процесса;
- **цель** — описывает цель выполнения процесса;
- **выходы** (выходные результаты) — выражают заметные результаты, ожидаемые от успешного выполнения процесса;
- **действия** — перечень действий, которые могут использоваться для достижения выходных результатов. Каждое действие может быть в дальнейшем переработано в группу взаимодействующих действий более низкого уровня;
- **задачи** — специальные действия, которые могут осуществляться для выполнения какого-то действия. Множество взаимосвязанных задач часто объединяется в пределах какого-то действия;
- **информационные объекты** — отдельно идентифицируемые содержательные части информации, произведенные и сохраненные для использования человеком в течение жизненного цикла системы или программных средств.



**Рис. 3** Представление процессов в виде диаграмм SADT/IDEF0

Для наглядного представления процессов используем диаграммы вида SADT/IDEF0 (рис. 3).

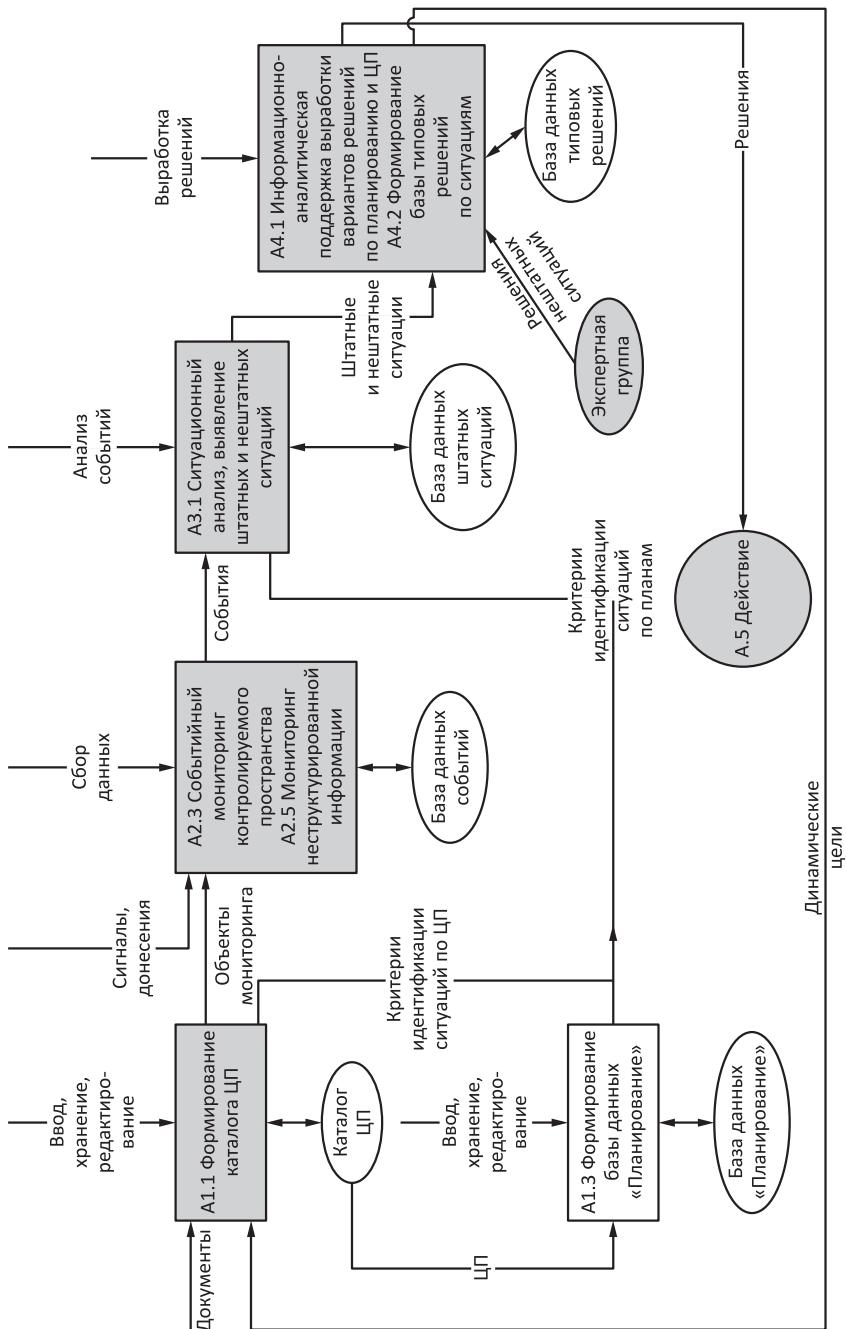
В дальнейшем используются примеры реализации процессов на основе осуществляющей ФИЦ ИУ РАН НИР «Исследование вопросов управления результатами научно-исследовательской деятельности организаций, подведомственных ФАНО России, и научными сервисами сети ЦКП ФАНО» в рамках государственного задания (тема № 0063-2016-0012).

## 4 Описание основных процессов деятельности

Рассмотрим основные взаимосвязанные процессы деятельности ситуационной системы управления (рис. 4).

### Процесс А1. Целеполагание в системе управления

**Подпроцесс А1.1** выполняет **формирование каталога ЦП** системы управления, обеспечивает возможности ввода, хранения и корректировки системы ЦП.



**Рис. 4** Основные процессы деятельности системы управления

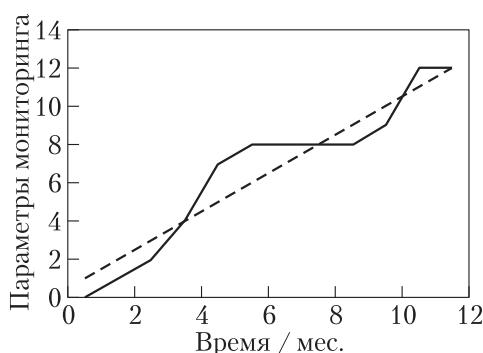
Пример структуры каталога ЦП для системы управления научными сервисами

Наименование	Вид	Параметры	Формула	Единицы измерения	Критерий	Критическое отклонение
Загрузка оборудования и (или) УНУ в интересах бюджетных проектов за год	ЦП, определенные федеральными нормативно-правовыми документами	1. Время суммарной загрузки оборудования ( $t_c$ ) 2. Максимально возможное время работы оборудования ( $t_m$ )	$\frac{100t_c}{t_m}$	%	Не менее 70% за год	20%

В каталоге ЦП представлены следующие атрибуты: наименование, вид, параметры (ссылка на информационные ресурсы данных мониторинга), формула вычисления (значение), единицы измерения, критерий, критическое значение (см. пример в таблице).

Необходимо заметить, что способ задания ЦП определяет перечень объектов контроля системы управления, в данном примере это время суммарной загрузки оборудования ( $t_c$ ) и максимально возможное время работы оборудования ( $t_m$ ), а также задает критерии для идентификации критических ситуаций по управлению ЦП.

**Подпроцесс А1.3 — формирование БД «Планирование»** системы управления (обеспечение возможности ввода, хранения и корректировки показателей планирования).



**Рис. 5** Особенности изменения параметров мониторинга УНУ за год

Атрибуты БД «Планирование»: ЦП; критерий ( $\ll=$ ,  $\ll\leq$ ,  $\ll\geq$ ); плановое значение; текущее значение; единица измерения; срок (временная градация); критическое отклонение. Планирование ЦП должно учитывать объективные «сезонные колебания», обусловливающие неравномерность их изменения в планируемом периоде (1 год) для получения возможности текущего контроля ЦП. Планирование обычно осуществляется с учетом показателей предыдущих плановых периодов. Так, например, в системе управления научными сервисами за-

грузка уникальной научной установки (УНУ) в течение года в силу особенностей бюджетного финансирования выглядит как на рис. 5.

В подпроцессе А1.3 формируются критерии для идентификации критических ситуаций по управлению плановыми значениями ЦП.

## Процесс А2. Мониторинг

**Подпроцесс А2.3 — событийный мониторинг контролируемого пространства** и обеспечение сбора данных мониторинга в режиме реального времени, по запросу или по установленному регламенту. Осуществляется мониторинг объектов контролируемого пространства, определенных исходя из данных целеполагания. В общем случае осуществляется мониторинг следующих объектов [5]:

- целевая обстановка (совокупность целевых состояний обстановки, состояние динамических целей, контроль исполнения решений);
- контролируемые объекты (объекты, состояние которых подлежит контролю с точки зрения целей управления);
- контролируемые ресурсы (объекты управления, например свои или взаимодействующие ресурсы);
- неконтролируемые факторы, например противоборствующие ресурсы (силы, средства), элементы окружающей среды (природные, техногенные, социальные, политические и экономические факторы контролируемого пространства).

Под событием (инцидентом) понимается изменение состояния объекта мониторинга. Источники данных — агенты или ручной ввод. Данные мониторинга помещаются в соответствующую БД. Осуществляется автоматическая индикация событий в подсистеме визуализации данных мониторинга.

**Подпроцесс А2.5 — мониторинг неструктурированной информации** (новостные ленты, сайты научных организаций, сайты взаимодействующих ведомств). Обеспечивается возможность анализа интернет-ресурсов с целью отбора данных по тематике научных сервисов. Осуществляется ведение **БД «Новости»** («Новостная лента») с осуществлением следующих действий: настройка поисковой системы; пополнение; просмотр; автоматическая индикация; пополнение в автоматизированном режиме путем сканирования контента заданных сайтов.

## Процесс А3. Анализ данных мониторинга

**Подпроцесс А3.1 — ситуационный анализ по данным мониторинга, выявление штатных и нештатных ситуаций** на основе данных мониторинга объектов учета. Поддерживаются следующие виды анализа обстановки:

- оценка параметров ненаблюдаемых (скрытых) элементов обстановки на основе выборочных или косвенных данных по результатам мониторинга, выявление фактов;
- оперативный анализ обстановки путем ее сравнения с прошлым периодом (без изменений, хуже, лучше, аномалия) с целью выявления ситуаций, требующих немедленного реагирования;
- оценка ситуации с целью определения необходимости выработки решений по ее нормализации и степени сложности ситуации — штатная, критическая, чрезвычайная.

Анализ взаимосвязей на дискретной математической модели:

- визуализация и навигация по семантической сети;
- поиск неочевидных взаимосвязей (путей на графе);
- поиск схожих конфигураций событий (идентификация ситуаций).

Анализ массовых потоков событий:

- экспресс-анализ ситуаций;
- динамическое моделирование ситуаций;
- прогнозирование ситуаций, сценарное прогнозирование.

Формирование аналитического отчета с возможностью его настройки, его корректировки, просмотра. Виды отчетов:

- анализ тенденций заявок;
- ранжирование текущих заявок;
- прогноз заявок.

#### **Процесс А4. Поддержка процессов принятия решений**

**Подпроцесс А4.1 информационно-аналитической поддержки выработки вариантов решений по планированию и по штатным и нештатным ситуациям с использованием системы управления событиями.** Определяется:

- прогнозирование изменения обстановки — без управляющего воздействия, с управляющим воздействием, сценарное прогнозирование с учетом внешних факторов;
- поддержка процессов принятия управленческих решений — адаптация типовых решений и выработка нетиповых решений (с учетом прогнозирования).

Под ситуацией понимается достижение ЦП заданного критического значения, характеризующего его существенное отклонение от нормального или планового значения. В случае штатной ситуации применяются наработанные в системе типовые решения с привязкой их к конкретной обстановке, а в случае нештатных ситуаций осуществляется информационно-аналитическая поддержка экспертных групп для выработки новых решений с использованием следующих методов:

1. Анализ на непрерывной математической модели:
  - моделирование физических процессов;
  - решение задач оптимального управления;
  - многоокритериальный выбор;
  - трехмерная визуализация.
2. Анализ массовых потоков событий:
  - формирование выборок, рядов и OLAP-кубов; анализ временных рядов;
  - статистическая оценка характеристик потоков событий.
3. Информационно-расчетные задачи (ИРЗ):
  - картометрические ИРЗ;
  - ИРЗ тематических зон;
  - ИРЗ зон достижимости и оптимальных маршрутов;
  - расчет вероятностей выполнения задач.

**Подпроцесс А4.2 — формирование базы типовых решений по ситуациям.** Обеспечивается ведение БД «Типовые решения», содержащей описание алгоритмов действий для нормализации штатных ситуаций.

## Процесс А5. Реализация принятых решений

**Подпроцесс А5.1 передачи инструкций своим и взаимодействующим системам и средствам.** Обеспечивается средствами электронного документооборота. Формализованное решение содержит описание действия, ответственного за исполнение и срок исполнения.

**Подпроцесс А5.2 — формирование сводной отчетности.** Осуществляется формирование отчетов по функционированию системы управления за период времени с возможностью настройки отчета, его корректировки, выбор отчета и его просмотр.

## 5 Заключение

В статье обоснована полнофункциональная модель автоматизированных информационно-аналитических систем управления и предлагается реализация системного подхода к решению этой проблемы в предметной области ситуационных систем управления, основанная на применении процессного подхода. С этой целью решен ряд задач.

1. Обоснована циклическая полнофункциональная модель систем ситуационного управления, включающая пять стадий: целеполагание, мониторинг, анализ, решение, действие.

2. Осуществлено представление автоматизируемых функций обобщенной системы управления в виде совокупности пяти групп основных взаимосвязанных процессов.
3. Приведено формализованное описание основных процессов деятельности системы управления.

## Литература

1. Ивлев А. А. Основы теории Бойда. Направления развития, применения и реализации. 2008. 64 с.<http://www.slideshare.net/defensenetwork/ss-10380168>.
2. Grant T., Kooter B. Comparing OODA & other models as operational view C2 architecture // The Future of C2: 10th Command and Control Research and Technology Symposium (International) Proceedings. — McLean, VA, USA, 2005. 15 p.
3. Сучков А. П. Формирование системы целей для ситуационного управления // Системы и средства информатики, 2013. Т. 23. № 2. С. 171–182.
4. Сучков А. П. Аналитические аспекты мультиагентных распределенных систем управления // Системы и средства информатики, 2014. Т. 24. № 2. С. 166–177.
5. Сучков А. П. Некоторые подходы к интеграции аналитических данных существующих и перспективных систем поддержки принятия решений // Системы и средства информатики, 2015. Т. 25. № 3. С. 201–211.
6. Зацаринный А. А., Козлов С. В., Сучков А. П. Система поддержки принятия решений как компонент перспективной автоматизированной системы управления // Качество и жизнь, 2016. № 3(11). Приложение. С. 23–26.
7. 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.

*Поступила в редакцию 30.01.17*

---

## A FULLY FUNCTIONAL PROCESS-BASED APPROACH TO THE IMPLEMENTATION OF SITUATIONAL CONTROL SYSTEMS

*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

**Аннотация:** Creating a fully functional model of automated information-analytical control systems is a complex scientific problem of current importance. The article proposes the implementation of the systematic approach to the solution of this problem in the subject area of case control systems based on the process approach. The article proposes and justifies the cyclic fully functional model of systems of situational management, which includes five stages: Goal setting,

Monitoring, Analysis, Decision, and Action. The automated functions of the generalized control system are represented as a set of five groups of interrelated processes. The article describes the main processes of a situational control system.

**Keywords:** situational control system; functional model; process approach

**DOI:** 10.14357/08696527170106

## References

1. Ivlev, A. A. 2008. *Osnovy teorii Boyd. Napravleniya razvitiya, primeneniya i realizatsii* [Fundamentals of the theory of Boyd. Areas of development, application and implementation]. 64 p. Available at: <http://www.slideshare.net/defensenetwork/ss-10380168> (accessed March 3, 2017).
2. Grant, T., and B. Kooter. 2005. Comparing OODA & other models as operational view C2 architecture. *The Future of C2: 10th Command and Control Research Technology Symposium (International) Proceedings*. June 2005. McLean, VA. 15 p. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/268058405\\_Comparing\\_OODA\\_other\\_models\\_as\\_Operational\\_View\\_C2\\_Architecture\\_Topic\\_C4ISR2\\_Architecture](https://www.researchgate.net/publication/268058405_Comparing_OODA_other_models_as_Operational_View_C2_Architecture_Topic_C4ISR2_Architecture) (accessed March 3, 2017).
3. Suchkov, A. P. 2013. Formirovanie sistemy tseley dlya situatsionnogo upravleniya [The formation of the objective system to situational management]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 23(2):171–182.
4. Suchkov, A. P. 2014. Analiticheskie aspekty mul'tiagentnykh raspredelennykh sistem upravleniya [Analytical aspects of multiagent distributed control systems]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 24(2):166–177.
5. Suchkov, A. P. 2015. Nekotorye podkhody k integratsii analiticheskikh dannykh sushchestvuyushchikh i perspektivnykh sistem podderzhki prinyatiya resheniy [Some approaches to the analytical data integration of the existing and future decision support systems]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 25(3):201–211.
6. Zatsarinnyy, A. A., S. V. Kozlov, and A. P. Suchkov. 2016. Sistema podderzhki prinyatiya resheniy kak komponent perspektivnoy avtomatizirovannoy sistemy upravleniya [The decision-making system as a component of the perspective control system]. *Kachestvo i zhizn'* [The Quality and Life] 3((11) App.):23–26.
7. Zatsarinnyy, A. A., and A. P. Suchkov. 2016. Sistemotekhnicheskie podkhody k sozdaniyu sistemy podderzhki prinyatiya 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.

Received January 30, 2017

## 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; [apsuchkov@ipiran.ru](mailto:apsuchkov@ipiran.ru)

## ОБ ОСНОВНЫХ ТИПАХ СВЯЗАННОСТИ МЕЖДУ ТЕКСТОВЫМИ ДОКУМЕНТАМИ\*

*М. М. Шарнин<sup>1</sup>, Н. В. Сомин<sup>2</sup>*

**Аннотация:** Рассматривается вопрос связанности естественно-языковых текстов по текстуальным признакам (фрагментам). Выявлены два типа связанных текстов: явная связанность, когда тексты связаны библиографическими ссылками, и неявная связанность, когда тексты связаны между собой через общие текстовые фрагменты. Обсуждаются преимущества и области применения неявной связаннысти. Показано, что использование неявной связаннысти значительно повышает область применения основанных на связаннысти методов обработки текстов. Предложены меры явной и неявной связаннысти. Проведен эксперимент с корпусом текстов по предметной области «компьютерная графика». На основе эксперимента показано, что оба типа связаннысти коррелированы между собой. Найдены параметры обработки текстов, когда корреляция максимальна и достигает примерно 55%. Приводятся планы по дальнейшему развитию предложенного метода сравнения и уточнению полученных результатов.

**Ключевые слова:** связаннысть текстов; явная связаннысть; неявная связаннысть; мера связаннысти; коллекция текстов; корреляция

**DOI:** 10.14357/08696527170107

### 1 Характеристика задач, использующих связаннысть текстов

Насколько два текста связаны между собой? По каким параметрам текстов эта связаннысть может быть объективно определена? Такие вопросы все чаще и чаще возникают у исследователей, занимающихся задачами нахождения смысловой зависимости между текстами.

Дело в том, что в связи с возрастанием объема текстов, доступных для автоматического анализа, становится все более и более актуальным решение таких задач, как:

- автоматическое рубрицирование текстов;
- выявление плагиата [1];

\*Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты 16-07-00756, 16-29-09527 и 15-07-06586).

<sup>1</sup>Институт проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук, mc@keywen.com

<sup>2</sup>Институт проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук, chri-soc@yandex.ru

- выявление и классификация некорректных псевдотекстов («фальштекстов») [1];
- получение «онтологии текстов», т. е. выявление основных тем в наборе текстов и иерархии тем по степеням общности;
- получение рефератов, привязанных к какой-либо тематике [2–6];
- определение по опубликованным статьям вклада того или иного ученого в решение (постановку) определенной задачи [7];
- определение терминологических «портретов» предметных областей [8];
- приоритет в публикации новых научных идей [7] и др.

Все эти задачи, как правило, требуют обработки больших массивов документов (big data) и, как следствие, эффективных процедур обработки текстов. Кроме того, они опираются на понятие связанности текстов, которое будет уточнено ниже.

## 2 Связанность текстов — явная и неявная

Под связанностью текстов понимается зависимость между двумя текстами (связь), которую можно обнаружить на уровне текстовых совпадений, т. е. выявления тождественности тех или иных фрагментов рассматриваемых текстов.

Будем рассматривать два вида связанности: явную и неявную.

Под явной связанностью понимается наличие библиографической ссылки на другой текст. Действительно, если один текст в виде явной ссылки ссылается на другой, то это значит, что автор, употребивший в своем тексте ссылку, знает статью-референта и удостоверяет, что между его статьей и статьей-референтом существует некая семантическая связь.

Под неявной связанностью понимается наличие в обоих текстах некоторого числа совпадающих фрагментов. Под этими совпадающими фрагментами подразумеваются термины — однословные и многословные, а также общие фразы и предложения. Эти фрагменты будем называть «терминами», хотя далеко не все из них будут совпадать с настоящими, общеупотребительными научными терминами. Чем больше таких совпадающих фрагментов, тем больше сравниваемые тексты похожи друг на друга. Поэтому меру неявной связанности иногда называют мерой подобия текстов. Также чем больше таких совпадающих терминов, тем выше, как представляется, вероятность явной связанности текстов. Разумеется, этот тезис необходимо обосновать. Собственно, этому и посвящена настоящая статья.

Отметим, что явная связанность давно используется для выявления содержательной взаимозависимости текстов, например в разного рода рейтингах публикаций и авторов по различным предметным областям, таких как индекс цитируемости SCI (Science Citation Index) и др. Метод использования явных связей давно себя зарекомендовал с хорошей стороны, поскольку он отражает

широко используемые в мировой практике нормы и правила цитирования. Использование неявных ссылок такой легитимностью пока не обладает. Но если удастся показать наличие достаточно высокой корреляции между явной и неявной связанныстями, то можно использовать неявную связанность вместо явной. Это может дать значительные преимущества при анализе текстов.

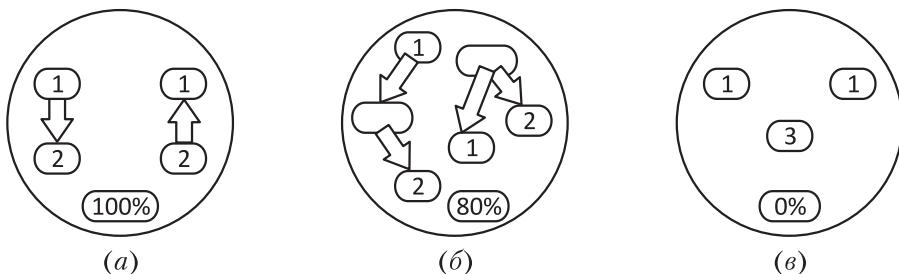
Главное — значительно расширяется сфера применения методов анализа, основанных на связанности. Дело в том, что дисциплина явных ссылок на ассоциированные статьи достаточно строго соблюдается только в сфере научных публикаций. Публикации в других сферах — публицистике, научно-популярной литературе, средствах массовой информации, деловых документах — требованием обязательного цитирования не отягощены, и потому использование явных ссылок в этих сферах неэффективно. Поэтому рейтинги типа индексов цитирования (ИЦ) распространяются только на строго научную литературу. Выявление же неявных ссылок возможно для любых типов текстов, даже тех, где явных ссылок нет вовсе.

Кроме того, заметим, что корректность цитирования полностью возлагается на порядочность авторов статей и автоматически не подлежит корректному верифицированию. Но, увы, в современном мире порядочность далеко не всегда является атрибутом человека, поэтому, например, ради повышения рейтинга зачастую организуются кампании по употреблению ссылок к определенному тексту, что, безусловно, некорректно. Однако выявить эту некорректность объективными методами пока не удается. С другой стороны, может быть легко организовано умалчивание работ другой научной школы или лица, чем-либо не угодившего определенной связанной между собой группе. Этим способом вполне можно занизить рейтинг конкурента, и опять-таки верифицировать такой прием практически невозможно. Поэтому необходима разработка методов создания рейтингов, свободных от этих недостатков и позволяющих более объективно судить о научном вкладе того или иного ученого. Такие методы вполне могут быть разработаны на базе использования неявной связанности. Отметим, что такой индекс цитируемости на основе неявной связанности будем называть индексом контекстного научного цитирования (ИКНЦ). Представляется, что он обладает большей объективностью, чем обычный ИЦ.

### **3 Меры явной и неявной связанности**

Явные ссылки могут быть прямыми — два текста соединены прямой ссылкой, если в одном из текстов есть явная ссылка на другой текст. Но могут быть и ссылки через посредника, когда одна статья ссылается на другую через промежуточный текст или обе статьи ссылаются на один и тот же промежуточный текст. Типы явных ссылок иллюстрирует рис. 1.

Будем считать, что мера явной связанности по прямой ссылке равна 100%, а ссылки через промежуточный текст — 80%. Это значение 80% рассчитано из максимума корреляции между явной и неявной связанностью, что будет



**Рис. 1** Мера явной связанности двух текстов: (а) связаны напрямую; (б) связаны через посредника; (в) не связаны

подробнее описано ниже. Разумеется, мера явной связанности не связанных явно текстов равна 0%.

Мера неявной связанности (мера подобия) вычисляется по следующей формуле:

$$\text{Мера н.с.} = \frac{S_{\text{пересечения}}}{\min(S_{\text{текста1}}, S_{\text{текста2}})} \cdot 100\%,$$

где  $S_{\text{пересечения}}$  — сумма весов всех терминов, входящих в оба текста;  $S_{\text{текста1}}$  — сумма весов первого текста;  $S_{\text{текста2}}$  — сумма весов второго текста.

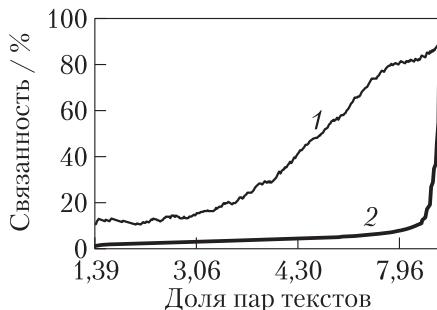
Мера неявной связанности двух идентичных текстов равна 100%.

Веса терминов подбираются так, чтобы наиболее значимые термины получили наибольший вес и попали в начало списка. В данном исследовании веса терминов полагались равными их длине, т. е. числу букв, содержащихся в терминах. В дальнейшем планируются исследования, где учитываются частоты встречаемости этих терминов в рассматриваемой коллекции, а также в большой внешней коллекции. Частоты встречаемости терминов в большой внешней коллекции моделируют частоту терминов в целом в языке и позволяют понизить веса наиболее частых терминов, таких как предлоги.

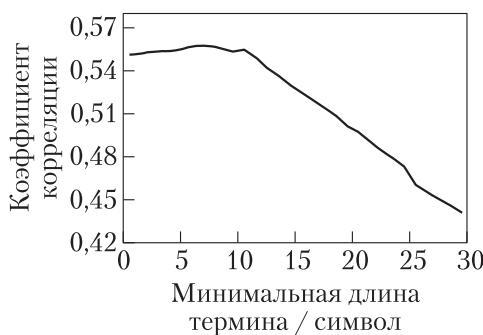
#### 4 Сравнение явной и неявной связанности

Предложенные меры связанности позволяют сравнить явную связанность с неявной. Исследовалась коллекция текстов (по предметной области «компьютерная графика») из 892 полнотекстовых документов, в которых выявлено более 6000 явных ссылок, причем из них было 119 внутренних ссылок, которые связывали между собой 141 документ из коллекции. Общий объем текстов во всех документах составил 43 МБ.

На рис. 2 графически представлено сравнение явной и неявной связанности. По оси абсцисс отложена 581 пара текстов, в число которых вошли 119 пар



**Рис. 2** Сравнение явной (1) и неявной (2) связанности: 1 — мера похожести; 2 — вероятность связи



**Рис. 3** Зависимость коэффициента корреляции между явной и неявной связанностью от минимальной длины терминов

с явной связанностью 100%, 112 пар со связанностью 80%, а также 350 несвязанных пар. Из вышеупомянутого множества размером в 141 документ можно составить более 9 тысяч несвязанных пар. Из них случайным образом было выбрано 350 несвязанных пар так, чтобы это число было несколько больше общего числа (231) связанных пар, что позволило сделать график более наглядным. Выбранные пары упорядочены в порядке возрастания неявной связанности. Мера их неявной связанности показана кривой 2. Кривая 1 демонстрирует поведение явной связанности (ради наглядности кривая подверглась сглаживанию; поэтому можно считать, что она выражает вероятность явной связанности).

По поведению этих кривых видно, что явная и неявная связанность коррелируют между собой. Это значит, что меру явной связанности можно определить через неявную связанность. Так, при неявной связанности более 8% вероятность наличия библиографических ссылок составляет более 70%.

## 5 Максимизация корреляции в зависимости от минимальной длины словосочетаний

Следует отметить, что корреляцию можно максимизировать, если должным образом подобрать длину терминов. На рис. 3 показан график коэффициента корреляции в зависимости от минимальной длины терминов (в символах). График показывает, что:

- максимум корреляции 55,7% достигается при условии игнорирования словосочетаний длиной меньше 8 букв;
- игнорирование более длинных словосочетаний приводит к уменьшению корреляции.

Отметим, что в данном эксперименте корреляция рассчитана при игнорировании 5% пар текстов с наибольшей неявной связанностью, т. е. было про-

игнорировано 29 пар с неявной связанностью более 20%. На графике рис. 2 это соответствует нелинейной части кривой 2, когда неявная связанность резко возрастает. По сути дела, все эти 29 пар должны иметь явную связанность 100%, так как они содержат много общих фраз, несмотря на то что авторы этих текстов не всегда формально связывают статьи (например, встречались почти идентичные статьи с разными названиями). Игнорирование данных 5% пар текстов позволило сделать график неявной связанности более линейным, что увеличило корреляцию.

Также принцип максимума корреляции применялся для определения значения меры связанности через промежуточный текст. Были опробованы значения 10%, 20%, . . . , 80%, 90%, 100%. Максимум корреляции 55,7% достигался при условии, что связанность через промежуточный текст принималась равной 80%. Это значение меры связности через промежуточный текст (80%) и было взято в качестве оптимального.

## 6 Дальнейшие исследования

Полученные результаты дают основание для развития предложенного метода по следующим направлениям:

- создание ИКНЦ, учитывающего неявные ссылки в других публикациях и корпусе интернет-текстов;
- увеличение размера коллекции до нескольких тысяч статей с помощью автоматического поиска в Интернете и автоматической классификации;
- использование процедуры морфологического анализа для более достоверного вычисления неявной связанности;
- сопоставление полученных ИЦ для статей коллекции с ИЦ других баз цитирования (РИНЦ, Scopus, WoS, Google Scholar);
- расчет ИКНЦ статей коллекции для разных параметров неявных ссылок и максимизация корреляции ИКНЦ с ИЦ по базе данной коллекции и по другим базам цитирования.

## Литература

1. Михеев М. Ю., Сомин Н. В., Галина И. В., Золотарев О. В., Козеренко Е. Б., Морозова Ю. И., Шарнин М. М. Фальштексты: классификация и методы опознания текстовых имитаций и документов с подменой авторства // Информатика и её применения, 2014. Т. 8. Вып. 4. С. 70–77.
2. Шарнин М. М., Кузнецов И. П. Автоматическое формирование электронных энциклопедий и справочных пособий по информации из сети «Интернет» // Системы и средства информатики, 2004. Вып. 14. С. 210–223.
3. Charnine M. M., Kuznetsov I. P., Kozerenko E. B. Semantic navigator for Internet search // Conference (International) on Machine Learning Proceedings. — Las Vegas, NV, USA: CSREA Press, 2005. Р. 60–65.

4. *Charnine M., Charnine V.* Keywen category structure. — Indianapolis, IN, USA: Wordclay, 2008. 60 p.
5. *Kuznetsov I. P., Charnine M. M., Kozerenko E. B., Somin N. V., Nikolayev V. G., Matskevich A. G.* Intelligent tools for the semantic Internet navigator design // Электронные библиотеки: перспективные методы и технологии, электронные коллекции: Тр. XIV Всеросс. научн. конф. RCDL'2012. — Переславль-Залесский: УГП, 2012. С. 274–283.
6. *Charnine M.* Keywen automated writing tools. — Booktango, 2013. 129 p.
7. *Charnine M., Klimenko S.* Measuring of “idea-based” influence of scientific papers // Conference (International) on Information Science and Security Proceedings. — Seoul, South Korea, 2015. P. 160–164.
8. Галина И. В., Козеренко Е. Б., Морозова Ю. И., Сомин Н. В., Шарнин М. М. Ассоциативные портреты предметной области — инструмент автоматизированного построения систем Big Data для извлечения знаний: теория, методика, визуализация, возможное применение // Информатика и её применения, 2015. Т. 9. Вып. 2. С. 93–110.

*Поступила в редакцию 29.10.16*

---

## **ON THE MAIN TYPES OF RELATEDNESS BETWEEN TEXT DOCUMENTS**

***M. M. Charnine and N. V. Somin***

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:** This paper considers the question of relatedness of natural language texts based on textual features (fragments). Two types of relatedness are revealed: first, explicit relatedness, when the texts are linked by bibliographic references, and, second, implicit relatedness, when the texts are linked through common text fragments. The advantages and applications of implicit relatedness are discussed. It is shown that the use of implicit relatedness increases the scope of text processing techniques based on relatedness of texts significantly. Measures of explicit and implicit relatedness are proposed. An experiment was conducted on a set of texts from the subject area of “computer graphics.” On the basis of the experiment, it was shown that both types of relatedness are correlated with each other. The authors found the parameters of text processing when the correlation was at maximum and reached about 55%. The plan for further development of the proposed method of texts comparison and refinement of the results is suggested.

**Keywords:** relatedness between texts; explicit relatedness; implicit relatedness; measure of relatedness; collection of texts; correlation

**DOI:** 10.14357/08696527170107

## Acknowledgments

The work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (projects 16-07-00756, 16-29-09527, and 15-07-06586).

## References

1. Mikheev, M. Yu., N. V. Somin, I. V. Galina, O. V. Zolotaryev, E. B. Kozerenko, Yu. I. Morozova, and M. M. Charnine. 2014. Fal'shteksty: Klassifikatsiya i metody opoznaniya tekstovyykh imitatsiy i dokumentov s podmenoy avtorstva [False texts: Classification and methods of identification of text documents with imitations and substitution of authorship]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 8(4):70–77.
2. Charnine, M. M., and I. P. Kuznetsov. 2004. Avtomaticheskoe formirovaniye elektronnykh entsiklopediy i spravochnykh posobiy po informatsii iz seti Internet [Automatic creation of electronic encyclopedias and handbooks based on information from the Internet]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 14:210–223.
3. Charnine, M. M., I. P. Kuznetsov, and E. B. Kozerenko. 2005. Semantic navigator for Internet search. *Conference (International) on Machine Learning Proceedings*. Las Vegas, NV: CSREA Press. 60–65.
4. Charnine, M., and V. Charnine. 2008. *Keywen category structure*. Indianapolis, IN: Wordclay. 60 p.
5. Kuznetsov, I. P., M. M. Charnine, E. B. Kozerenko, N. V. Somin, V. G. Nikolayev, and A. G. Matskevich. 2012. Intelligent tools for the semantic Internet navigator design. *Conference (International) RCDL Proceedings*. Pereslavl-Zalesky. 274–283.
6. Charnine, M. 2013. *Keywen automated writing tools*. Booktango. 129 p.
7. Charnine, M., and S. Klimenko. 2015. Measuring of “idea-based” influence of scientific papers. *Conference (International) on Information Science and Security Proceedings*. Seoul, South Korea. 160–164.
8. Galina, I. V., E. B. Kozerenko, Yu. I. Morozova, N. V. Somin, and M. M. Charnine. 2015. Assotsiativnye portrety predmetnoy oblasti — instrument avtomatizirovannogo postroeniya sistem Big Data dlya izvlecheniya znanii: Teoriya, metodika, vizualizatsiya, vozmozhnoe primenie [Associative portraits of subject areas as a tool for automated construction of Big Data systems for knowledge extraction: Theory, methods, visualization, and application]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 9(2):93–110.

Received October 29, 2016

## Contributors

**Charnine Mikhail M.** (b. 1959)— Candidate of Science (PhD) in technology, senior scientist, Institute of Informatics Problems, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation; mc@keywen.com

**Somin Nicolay V.** (b. 1947) — Candidate of Science (PhD) in physics and mathematics, 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; chri-soc@yandex.ru

## СПОСОБ ОРГАНИЗАЦИИ ОБРАБОТКИ ПАКЕТОВ В ИНТЕГРИРОВАННЫХ СЕТЕВЫХ ПРОЦЕССОРАХ

*В. Б. Егоров<sup>1</sup>*

**Аннотация:** Предлагается способ организации обработки пакетов внутри многоядерного интегрированного сетевого процессора (ИСП) с традиционной архитектурой процессорных ядер. Пакеты обрабатываются на неком внутреннем «виртуальном» конвейере, ступенями которого служат наличные аппаратные ресурсы прибора. Специальный выделенный ресурс — классификатор — определяет маршрут конкретного пакета, после чего тот движется по заданному маршруту под управлением другого выделенного ресурса — диспетчера очередей. Помимо общего управления конвейером диспетчер очередей разрешает конфликты доступа к разделенным аппаратным ресурсам и обеспечивает пакетам требуемое качество обслуживания. Взаимодействие диспетчера очередей с аппаратными ресурсами, вовлекаемыми во внутренний конвейер, осуществляется унифицированно через комбинированные очереди описателей буферов, кадров и пакетов. Тело комбинированной очереди распологается в системной памяти, а начало очереди или, в зависимости от направления, ее конец реализуется в виде аппаратного FIFO (First-In/First-Out), позволяющего согласовать ритмы работы диспетчера очередей и управляемого аппаратного ресурса внутреннего конвейера.

**Ключевые слова:** виртуальный конвейер; диспетчер очередей; интегрированный сетевой процессор; обработка пакетов; очередь описателей

**DOI:** 10.14357/08696527170108

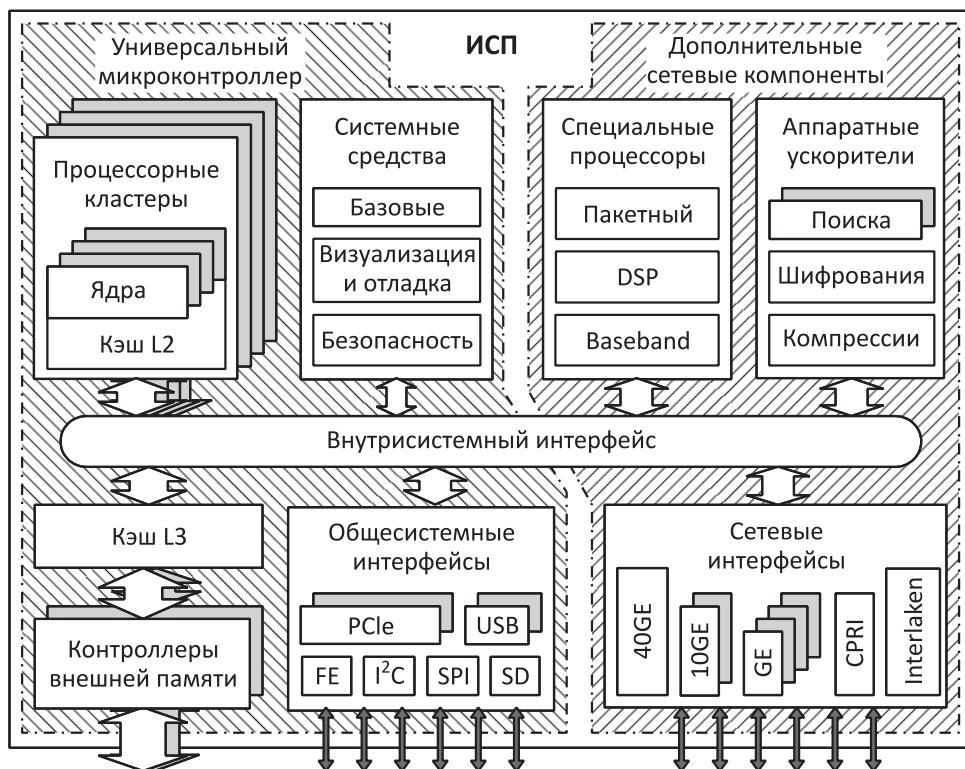
### 1 Введение

Для современных пакетных сетей характерно постоянное усложнение алгоритмической поддержки коммутации и маршрутизации, а также рост требований к качеству обслуживания и сетевой безопасности. Эти объективные тенденции стимулируют разработчиков аппаратуры сетевой инфраструктуры во все большей степени использовать методы интеллигентной коммутации (soft switching) вместо аппаратного продвижения пакетов (hard forwarding), активно применяя разного рода программируемые сетевые кристаллы [1]. В последнее время широкое распространение в качестве микроэлектронной основы устройств в пакетных сетях получили ИСП. Сегодня этот термин охватывает широкий круг самых разнообразных высокointегрированных микроэлектронных приборов [2, 3], но при всем их разнообразии общей чертой подавляющего большинства ИСП

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

оказывается интеграция в одном приборе большого числа процессорных ядер, универсальных и специализированных [4], число которых может исчисляться десятками, и множества современных высокоскоростных сетевых интерфейсов. Современные ИСП, давно преодолев рубеж 100 Гбит/с [5], достигают суммарной пропускной способности 400 Гбит/с [6].

Процессоры внутри ИСП могут быть организованы самым разным образом. Серийно выпускаемые ИСП являются примерами конвейерных, матричных и более традиционных процессорных архитектур [7], в том числе с потенциальной поддержкой многопоточности (multithreading). Последние превалируют на рынке благодаря более удобному традиционному программированию, а также доступности и лучшему качеству средств разработки и отладки программного обеспечения (ПО). На рис. 1 показана обобщенная структура ИСП с многоядерным процессором традиционной архитектуры, вобравшая в себя основные характерные черты двух ведущих поставщиков такого рода приборов — Freescale Semiconductor (с 2015 г. NXP) и Cavium Networks [8–11].



**Рис. 1** Обобщенная структура ИСП с традиционной архитектурой процессора

«Обобщенный» ИСП включает в себя типовой универсальный высокопроизводительный микроконтроллер, дополненный набором специальных сетевых компонентов: коммуникационных и сетевых интерфейсов, специализированных программируемых процессоров и аппаратных ускорителей. Сложность архитектуры, многопроцессорность, наличие спецпроцессоров и ускорителей объективно ставят задачу эффективной организации процесса обработки кадров и пакетов внутри ИСП.

## **2 Внутренний конвейер интегрированного сетевого процессора**

Изготовители ИСП, как правило, не раскрывают фирменных секретов организации процесса обработки кадров и пакетов внутри своих изделий. Возможно, у некоторых из них секретов вообще нет. Например, Cavium Networks предпочитает отдавать «голый кремний» на откуп потребителю. Другие компании рекламируют эффективность фирменных механизмов внутренней обработки сетевого трафика, таких, например, как «архитектура ускорения путей данных» DPAA (Data Paths Acceleration Architecture) у Freescale [12, 13] или некий «виртуальный конвейер» у компании LSI (с 2015 г. Avago Technologies, с 2016 г. Broadcom Limited) [14], но при этом не уточняют механизмы достижения этой эффективности. Между тем они не очевидны. Современные ИСП — весьма сложные интеллектуальные системы, способные выполнять самые разные виды обработки кадров и пакетов. Ниже приведены только некоторые наиболее типичные из них:

- простое продвижение кадров с входного сетевого интерфейса на выходной, но по сложным и меняющимся правилам коммутации;
- «глубокое» буферирование пакетов с управлением многоуровневыми очередями для достижения требуемого качества обслуживания;
- коммутация кадров в виртуальную локальную сеть (VLAN — Virtual Local Area Network) с интеллигентной модификацией заголовков;
- коммутация пакетов в виртуальную частную сеть (VPN — Virtual Private Network) с шифрованием данных, в том числе «на лету»;
- протокольный обмен пакетами с отработкой сложных протоколов, например при маршрутизации или резервировании ресурсов в сети;
- глубокая инспекция пакетов (DPI — Deep Packet Inspection) для обеспечения сетевой безопасности;
- поддержка баз данных, например адресной для маршрутизации или ресурсной для выделения требуемых полос пропускания.

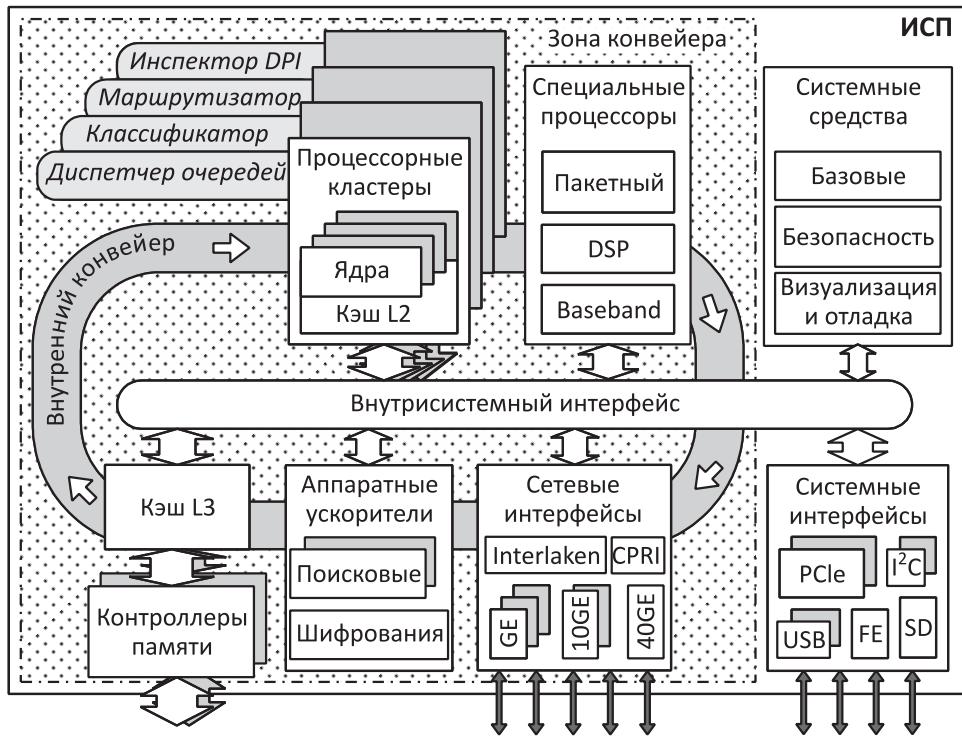
На рис. 2 показаны некоторые примеры возможных маршрутов пакетов внутри ИСП со структурой, изображенной на рис. 1.



**Рис. 2** Примеры маршрутов пакетов внутри ИСП

Из рис. 2 видно, что связующим элементом всех этапов любого маршрута оказываются внутренние очереди: на разбор заголовков, обработку или шифрование данных, передачу и т. д. Поэтому естественным представляется поручить организацию продвижения пакетов внутри ИСП некоему выделенному ресурсу управления очередями — **диспетчеру очередей**. Важная роль такого диспетчера в организации процесса обработки пакетов внутри ИСП, а также дополнительные выгоды от введения такого функционального блока уже отмечались ранее [15]. Диспетчер очередей позволяет не только реализовать процесс последовательной, по возможности без простояев, обработки пакетов внутри ИСП, но и получить ряд дополнительных удобств: «глубокое» буферирование кадров и пакетов, предоставление требуемого качества обслуживания, исключение неразрешимых конфликтов доступа к разделяемым ресурсам ИСП и др. Организуемый с помощью диспетчера очередей вариантный поэтапный процесс обработки пакетов последовательно в разных функциональных блоках ИСП по существу может рассматриваться как **внутренний «виртуальный» конвейер обработки пакетов**.

На рис. 3 структура типового ИСП перерисована так, чтобы выделить компоненты, которые могут включаться в такой внутренний конвейер. В зону конвейера естественно попадают все специальные сетевые компоненты ИСП, а также некоторые универсальные компоненты, непосредственно участвующие в буферировании и обработке кадров и пакетов: универсальный многоядерный



**Рис. 3** Компоненты, включаемые во внутренний конвейер ИСП

процессор, кэши всех уровней и либо интегрированная оперативная память, либо встроенный контроллер внешней памяти большого объема.

Как правило, универсальные многоядерные процессоры, в том числе процессоры ИСП, имеют тенденцию к группированию процессорных ядер в кластеры. Кластеризация уменьшает количество кэшей второго уровня и, как следствие, количество абонентов внутрисистемного интерфейса; в результате существенно уменьшается площадь кремния и снижается потребление прибором энергии. Но, в отличие от универсальных процессоров, процессоры ИСП дополнительно проявляют тенденцию к специализации процессорных кластеров за счет специфического для каждого отдельного кластера ПО [15]. Это не только повышает эффективность использования кэшей второго уровня, но и предоставляет уникальную возможность совершенствования ИСП заменой универсальных процессорных кластеров специализированными процессорами (или также их кластерами) и/или аппаратными ускорителями. Примерами программной специализации универсальных процессорных кластеров могут служить показанные на рис. 3 классификатор, маршрутизатор и инспектор DPI. Как и прочие

функциональные узлы ИСП, выделенный диспетчер очередей тоже может быть реализован либо на универсальном процессорном кластере специализированным ПО, как показано на рис. 3, либо на отдельном спецпроцессоре.

### 3 Внутренние очереди интегрированного сетевого процессора

На внутреннем конвейере ИСП кадры и пакеты последовательно проходят через различные функциональные блоки (см. рис. 2 и 3), причем к каждому аппаратному ресурсу ИСП, будь то процессорный кластер, спецпроцессор, аппаратный ускоритель или сетевой интерфейс, диспетчер очередей организует очередь или даже насколько очередей по приоритетам в случае поддержки на внутреннем конвейере качества обслуживания.

В типичном случае элементами внутренних очередей ИСП являются описатели — структуры определенного формата и назначения. В дальнейшем будем иметь дело с описателями:

- буферов, дающими ссылки на пустые буферы в памяти, готовые принять очередные входящие кадры;
- кадров, характеризующими либо принятые входящие кадры, либо готовые к передаче исходящие кадры;
- пакетов, описывающими пакеты, находящиеся в процессе обработки на внутреннем конвейере ИСП.

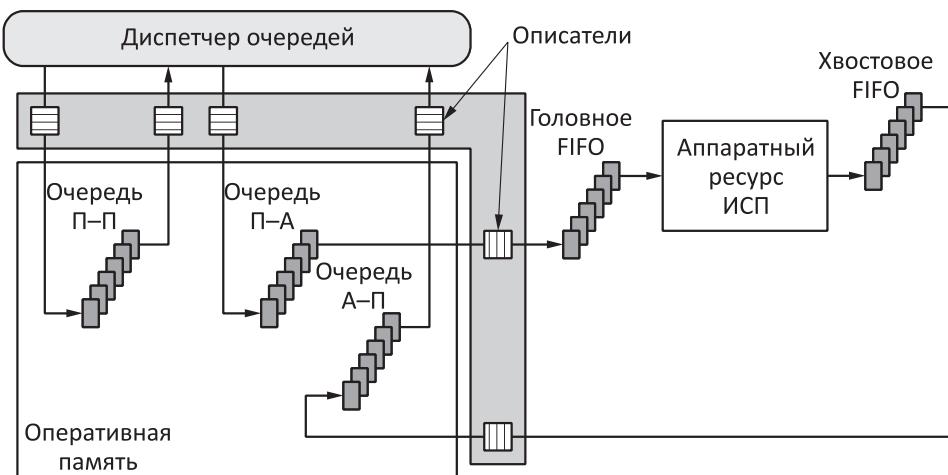
Описатели могут содержать, как показано на рис. 4, ссылки на буфер, кадр или пакет, их размер и некие параметры: интерфейс, маршрут и пр.

С описателями буферов (ОБ) и кадров (ОК) помимо диспетчера очередей имеют дело сетевые интерфейсы, а описатели пакетов (ОП) произвольно используются прочими аппаратными ресурсами ИСП.

Очереди описателей в зависимости от типа могут организовываться как в системной памяти, так и в аппаратных буферах FIFO. Очереди из программных ресурсов ИСП в другие программные ресурсы (тип П–П на рис. 5) располагаются целиком в оперативной памяти, формируются и управляются только диспетчером

Описатель буфера	Описатель кадра	Описатель пакета
Адрес буфера	Адрес кадра	Адрес пакета
Длина буфера	Длина кадра	Длина пакета
Параметры	Интерфейс	Маршрут
	Параметры	Параметры

**Рис. 4** Типичные описатели



**Рис. 5** Типы внутренних очередей ИСП

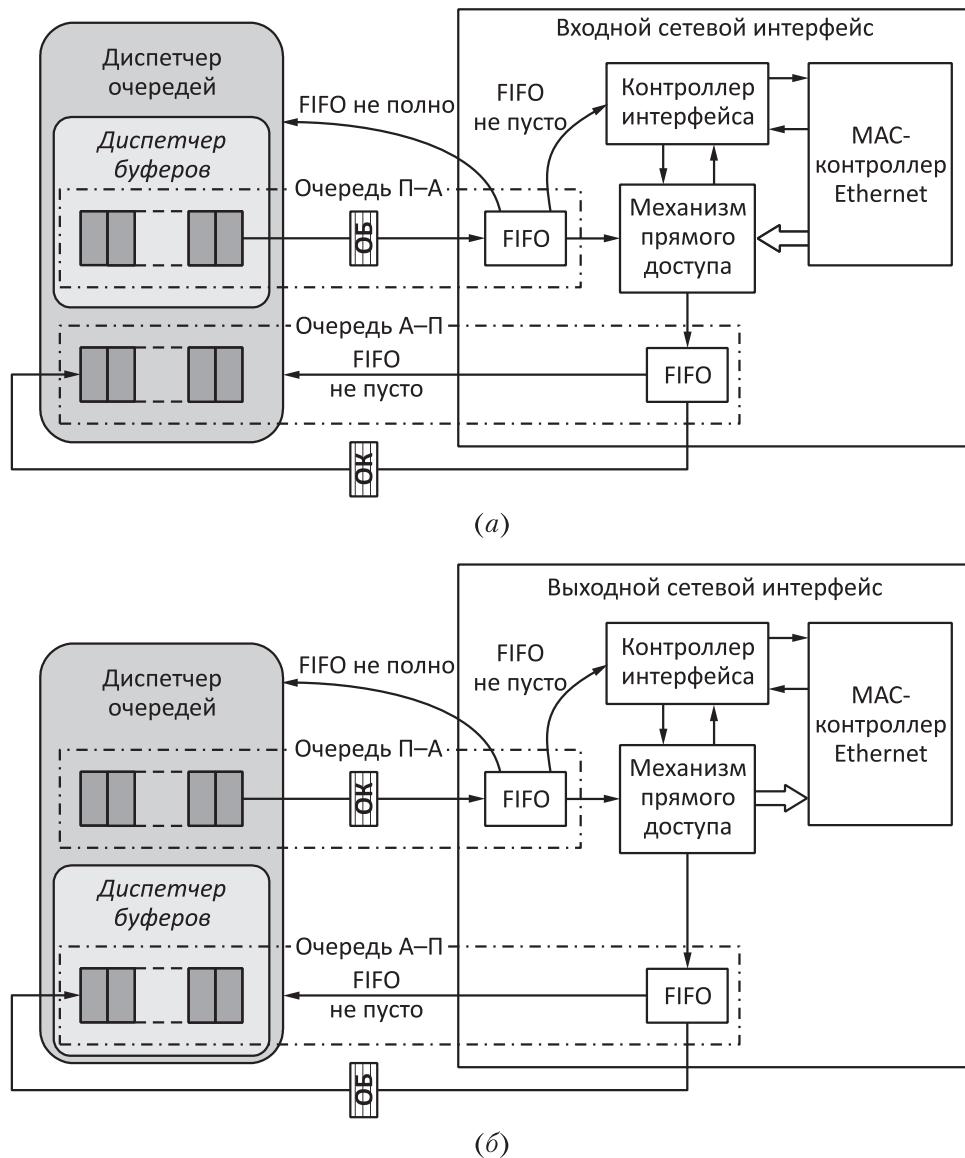
очередей. Очереди из программных ресурсов в аппаратные ресурсы ИСП (тип П–А на рис. 5) могут помимо контролируемого диспетчером тела очереди в памяти включать еще «головной» аппаратный буфер FIFO, управляемый диспетчером по входу и соответствующим аппаратным ресурсом по выходу. Для очередей из аппаратных в программные ресурсы (тип А–П на рис. 5) картина зеркальна — с аппаратным «хвостовым» FIFO.

#### 4 Механизмы взаимодействия диспетчера очередей с аппаратными ресурсами интегрированного сетевого процессора

Диспетчеру очередей в процессе управления внутренним конвейером приходится взаимодействовать с аппаратными ресурсами, входящими в зону конвейера. Ниже предлагается некоторый унифицированный механизм такого взаимодействия, незначительно модифицируемый с учетом особенностей конкретного ресурса.

Возможный механизм взаимодействия диспетчера очередей с сетевыми интерфейсами — входным и выходным — проиллюстрирован соответственно на рис. 6, а и 6, б. К особенностям взаимодействия с конкретно сетевыми интерфейсами можно отнести появление дополнительного функционального элемента — диспетчера буферов, который может быть частью диспетчера очередей или самостоятельным блоком.

На рис. 6, а диспетчер буферов непрерывно формирует очередь описателей свободных буферов типа П–А с головным FIFO во входном сетевом интерфейсе. Пока головное FIFO не полно, диспетчер буферов продвигает очередь, стараясь



**Рис. 6** Механизм взаимодействия диспетчера очередей с входным (a) и выходным (б) интерфейсом

его заполнить. В свою очередь, входной интерфейс опорожняет FIFO по мере приема кадров, используя извлеченные из него ОБ при буферировании принятых кадров, например обычным механизмом прямого доступа в память. После корректного приема очередного кадра входной интерфейс преобразует использованный для этого ОБ в ОК, заносит в него параметры принятого кадра и возвращает ОК диспетчеру очередей через хвостовое FIFO очереди типа А–П.

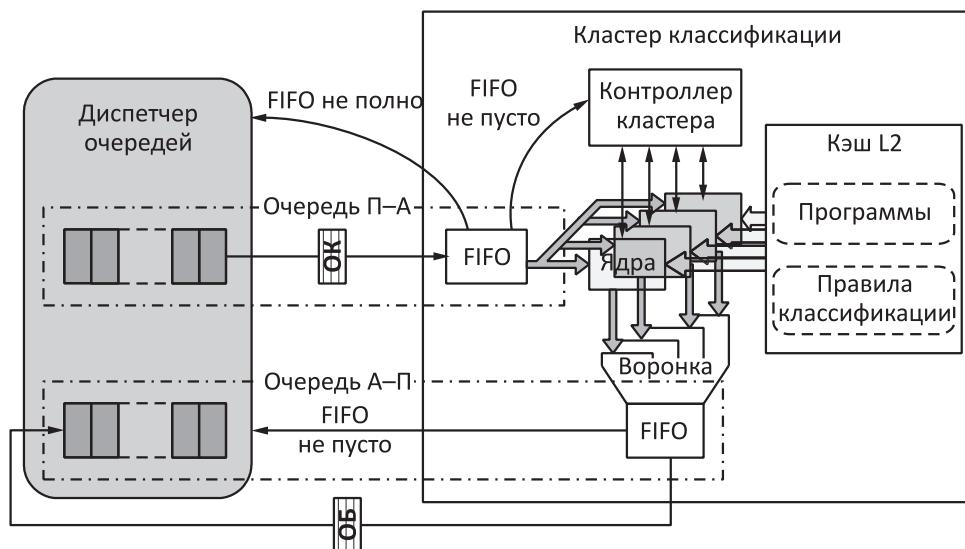
Диспетчер очередей перемещает полученные ОК в те или иные очереди на обработку. В простейшем случае это может быть общая очередь к классификатору, однако интеллигентный диспетчер позволяет дифференцировать очереди в зависимости от входного интерфейса, откуда получен конкретный ОК, или типа кадра, частично выполняя работу классификатора и ускоряя в целом процесс обработки. В частности, принятые кадры могут направляться в очереди с разными приоритетами, а протокольные кадры маршрутизации — прямо в очередь (очереди) к маршрутизатору, минуя классификатор.

На рис. 6, б диспетчер очередей формирует для выходного сетевого интерфейса очередь описателей готовых к отправке кадров, в том числе с учетом требований качества обслуживания и управления трафиком, полисингом или шейпингом потока. Организация очереди типа П–А и взаимодействие диспетчера буферов с выходным интерфейсом в целом те же, что и в случае входного интерфейса. Выходной интерфейс выбирает из головного FIFO по очереди ОК и передает в сеть описанные ими кадры. После успешной передачи очередного кадра интерфейс преобразует использованный ОК в ОБ и отсылает последний диспетчеру буферов для дальнейшего использования освободившегося буфера.

Взаимодействие диспетчера очередей с кластерами процессорных ядер показано на рис. 7 на примере кластера классификации.

Очередь типа П–А описателей из диспетчера очередей в процессорные кластеры, в том числе кластер классификации, и очередь типа А–П обратно организуются и управляются диспетчером очередей аналогично соответствующим очередям в сетевые интерфейсы и из них.

Если головное FIFO очереди П–А не пусто, контролер кластера включает в работу любое простаивающее ядро; включенное ядро извлекает из FIFO очередной ОК, выполняет классификацию соответствующего кадра, после чего вновь возвращается в «спящий» режим с индикацией контроллеру кластера о готовности принять очередной ОК. Если результатом выполненной классификации оказывается простая коммутация и кадр подлежит отправке без обработки, то через очередь А–П диспетчеру возвращается текущий ОК с указанием в нем выходного интерфейса. Диспетчеру очередей остается только переправить этот ОК в нужную очередь. В случае необходимости обработки пакета классификатор заменяет ОК на ОП с указанием в нем маршрута пакета по внутреннему конвейеру. В соответствии с назначенным маршрутом диспетчер очередей помещает полученный ОП в очередь к первой ступени внутреннего конвейера и в дальнейшем контролирует прохождение пакета по остальным ступеням.



**Рис. 7** Механизм взаимодействия диспетчера очередей с кластером классификации

Следует заметить, что вход хвостового FIFO очереди А–П в многоядерном кластере оказывается разделенным ресурсом между процессорными ядрами и концептуально для каждого ядра следовало бы организовать собственную очередь А–П к диспетчеру очередей [15]. Однако в данном случае это выглядит явным излишеством с точки зрения и аппаратных затрат, и временных потерь диспетчера на управление дополнительными очередями. Так как все ядра кластера равноправны и выполняют одну и ту же работу, для диспетчера нет никакого различия между очередями А–П от разных ядер одного и того же кластера. Поэтому логичным будет объединение таких очередей в одну с предоставлением права разрешать конфликты на входе в общую очередь небольшой аппаратной добавке — «воронке» на рис. 7, благо задача последней облегчается небольшим числом типов и фиксированной структурой конфликтующих описателей.

## 5 Заключение

В статье предложен способ организации обработки пакетов в ИСП в форме внутреннего «виртуального» конвейера, управляемого специальным выделенным ресурсом — диспетчером очередей, в качестве которого может выступать выделенный кластер универсальных процессорных ядер со специальным ПО или отдельный спецпроцессор. Такой конвейер позволяет организовать внутри ИСП эффективную обработку пакетов, в том числе с применением апробированных методов обеспечения качества обслуживания и разрешением конфликтов

доступа к аппаратным ресурсам ИСП. Последнее необходимо, так как разные пакеты требуют разной обработки и проходят внутри ИСП по разным маршрутам, которые могут пересекаться на одних и тех же аппаратных ресурсах. Следовательно, у одновременно находящихся на внутреннем конвейере пакетов возможны конфликты доступа к таким ресурсам.

Предлагаемый механизм взаимодействия диспетчера очередей с аппаратными ресурсами внутреннего конвейера основывается на очередях к этим ресурсам; элементами очередей могут быть описатели буферов, кадров или пакетов. Очереди могут быть комбинированными и состоять из тела очереди в оперативной памяти, причем такое тело может быть любого размера и произвольной структуры, и относительно небольшого аппаратного буфера FIFO, выступающего в роли «головы» или «хвоста» логически единой очереди. Такие FIFO, управляемые, с одной стороны, диспетчером очередей, а с другой — аппаратным ресурсом, позволяют согласовать ритмы работы взаимодействующих через FIFO программного и аппаратного компонентов.

Очевидное достоинство предложенного внутреннего конвейера и механизма управления им — их универсальность. В маршрут пакета на внутреннем конвейере могут в равной мере включаться как универсальные программируемые процессоры (кластеры ядер), так и специализированная аппаратура. Диспетчер очередей одинаковым образом взаимодействует и с универсальными процессорными кластерами, и со специализированными процессорами, и с аппаратными ускорителями, и с сетевыми интерфейсами. Такая индифферентность, в частности, дает возможность совершенствования ИСП постепенной заменой универсальных процессорных кластеров более производительными и экономичными специализированными аппаратными блоками без нарушения общего процесса функционирования внутреннего конвейера.

## **Литература**

1. Вейс Р. Сетевые кристаллы — основа телефонных и информационных сетей нового поколения // Мир компьютерной автоматизации On-Line, 2000. № 2. <http://www.mka.ru/?p=40108>.
2. Егоров В. Б. Аппаратные платформы пакетной коммутации и маршрутизации на основе интегрированных коммуникационных микроконтроллеров. — М.: ИПИ РАН, 2010. 147 с.
3. Егоров В. Б. Современные интегрированные сетевые процессоры: архитектура, возможности, средства разработки. — М.: ФИЦ ИУ РАН, 2016. 103 с.
4. Беляев А., Путря Ф., Солохина Т., Юдинцев В. Многоядерные процессоры для устройств связи. Перспективы и проблемы // Электроника НТБ, 2011. Вып. 8. С. 90–104.
5. Broadcom Introduces Industry's First 100 Gbps Full Duplex Network Processor. <http://www.broadcom.com/press/release.php?id=s666869>.
6. Cisco Unveils nPower, World's Most Advanced Network Processor. <http://newsroom.cisco.com/release/1262342>.

7. Егоров В. Б. Подходы к архитектуре интегрированных многоядерных сетевых процессоров. — М.: ИПИ РАН, 2012. 108 с.
8. T4240: QorIQ T Series T4240 / T4160 24 / 16 Virtual Core Communications Processors. [http://www.freescale.com/webapp/sps/site/prod\\_summary.jsp?code=T4240&nodeld=018rH325E40180](http://www.freescale.com/webapp/sps/site/prod_summary.jsp?code=T4240&nodeld=018rH325E40180).
9. OCTEON III CN7XXX Multi-Core MIPS64 Processors. [http://cavium.com/OCTEON-III\\_CN7XXX.html](http://cavium.com/OCTEON-III_CN7XXX.html).
10. Егоров В. Б. Многоядерные интегрированные сетевые процессоры высокой пропускной способности // Электронные компоненты, 2009. № 7. С. 29–33.
11. Егоров В. Б. Архитектурные инновации в многоядерных ИКМ QorIQ // Электронные компоненты, 2010. № 10. С. 66–72.
12. Layerscape Architecture. A look inside the next-generation QorIQ LS Series SoCs. [http://cache.freescale.com/files/32bit/doc/white\\_paper/LAYARCHTECHOVWP.pdf](http://cache.freescale.com/files/32bit/doc/white_paper/LAYARCHTECHOVWP.pdf).
13. Егоров В. Б. Интегрированные сетевые процессоры Freescale с ARM-ядрами // Электронные компоненты, 2013. № 4. С. 85–89.
14. Егоров В. Б. Коммуникационные процессоры Axxia от LSI // Электронные компоненты, 2014. № 4. С. 78–83.
15. Егоров В. Б. Современные тенденции в развитии архитектур интегрированных сетевых процессоров // Системы и средства информатики, 2014. Т. 24. № 3. С. 78–90.

Поступила в редакцию 29.11.16

---

---

## A METHOD OF PACKET PROCESSING IN INTEGRATED NETWORK PROCESSORS

*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:** The article introduces a method of packet processing in integrated network processors with conventional core architectures. Packets are processed in an internal “virtual” pipeline, with available hardware resources being its stages. The classifier determines the route of a specific packet, and the latter follows the route under control of an assigned resource — the queue manager. In addition to general pipeline control, the manager resolves access contentions to hardware resources and provides packets with quality of service. Interaction between the queue manager and hardware resources involved into the internal pipeline is carried out uniformly through composite queues of buffer, frame, and packet descriptors. Bodies of the composite queues are arranged in a system memory while their heads or tails (depends on the queue direction) are implemented as hardware FIFO (First-In/First-Out) aligning processing rates of the queue manager and managed hardware resources of the internal pipeline.

**Keywords:** descriptor queue; integrated network processor; packet processing; queue manager; virtual pipeline

**DOI:** 10.14357/08696527170108

## References

1. Weiss, R. 2000. Setevye kristally — osnova telefonnykh i informatsionnykh setey novogo pokoleniya [Network chips as a base of new generation information networks]. *Mir komp'uternoy avtomatizatsii On-Line* [The Computer Automation World On-Line] 2. Available at: <http://www.mka.ru/?p=40108> (accessed April 20, 2017).
2. Egorov, V. 2010. *Apparatnye platformy paketnoy kommutatsii i marshrutizatsii na osnove integrirovannykh kommunikatsionnykh mikrokontrollerov* [Hardware platforms for packet switching and routing based on integrated communication microcontrollers]. Moscow: IPI RAN. 147 p.
3. Egorov, V. 2016. *Sovremennye integrirovannye setevye protsessory: Arkhitektura, vozmozhnosti, sredstva razrabotki* [Modern integrated network processors: Architecture, facilities, and design tools]. Moscow: FRC CSC of RAS. 103 p.
4. Belyaev, A., F. Putrya, T. Solokhina, and V. Yudintsev. 2011. Mnogoyadernye protsessory dlya ustroystv syvazi. Perspektivy i problemy [Multicore processors for communication devices: Perspectives and problems]. *Elektronika NTB* [NTB Electronics] 8:90–104.
5. Broadcom Introduces Industry's First 100 Gbps Full Duplex Network Processor. Available at: <http://www.broadcom.com/press/release.php?id=s666869> (accessed November 29, 2016).
6. Cisco Unveils nPower, World's Most Advanced Network Processor. Available at: <https://newsroom.cisco.com/press-release-content?articleId=1262342> (accessed November 29, 2016).
7. Egorov, V. 2012. *Podkhody k arkhitekture integrirovannykh mnogoyadernykh setevykh protsessorov* [Approaches to the integrated multicore network processors architecture]. Moscow: IPI RAN. 147 p.
8. T4240: QorIQ T Series T4240/T4160 24/16 Virtual Core Communications Processors. Available at: <http://www.nxp.com/products/microcontrollers-and-processors/power-architecture-processors/qoriq-platforms/t-series/qoriq-t4240-t4160-t4080-multicore-communications-processors:T4240> (accessed November 29, 2016).
9. OCTEON III CN7XXX Multi-Core MIPS64 Processors. Available at: [http://cavium.com/OCTEON-III\\_CN7XXX.html](http://cavium.com/OCTEON-III_CN7XXX.html) (accessed November 29, 2016).
10. Egorov, V. 2009. Mnogoyadernye integrirovannye setevye protsessory vysokoy propusknoy sposobnosti [Multicore integrated high throughput network processors]. *Elektronnye komponenty* [Electronic Components] 7:29–33.
11. Egorov, V. 2010. Arkhitekturnye innovatsii v mnogoyadernykh IKM QorIQ [Architectural innovations in the multicore ICM QorIQ]. *Elektronnye komponenty* [Electronic Components] 10:66–72.
12. Layerscape Architecture. A look inside the next-generation QorIQ LS Series SoCs. Available at: [http://cache.freescale.com/files/32bit/doc/white\\_paper/LAYARCTECHOVWP.pdf](http://cache.freescale.com/files/32bit/doc/white_paper/LAYARCTECHOVWP.pdf) (accessed November 29, 2016).

13. Egorov, V. 2013. Integrirovannye setevye protsessory s ARM-yadrami [Integrated network processors with ARM cores]. *Elektronnye komponenty* [Electronic Components] 4:85–89.
14. Egorov, V. 2014. Kommunikatsionnye protsessory Axxia ot LSI [Communication processors Axxia from LSI]. *Elektronnye komponenty* [Electronic Components] 4:78–83.
15. Egorov, V. 2014. Sovremennye tendentsii v razvitiu arkhitektur integrirovannykh setevykh protsessorov [Up-to-day trends in evolution of integrated network processor architectures]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 24(3):78–90.

*Received November 29, 2016*

## 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 119333, Russian Federation; VEGorov@ipiran.ru

## ОКАЗАНИЕ МЕДИЦИНСКОЙ ПОМОЩИ НАСЕЛЕНИЮ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОБИЛЬНЫХ ТЕЛЕМЕДИЦИНСКИХ СИСТЕМ

*Г. Я. Илюшин<sup>1</sup>, В. И. Лиманский<sup>2</sup>*

**Аннотация:** Рассмотрены подходы к повышению доступности и улучшению качества медицинской помощи, предоставляемой жителям труднодоступных и удаленных населенных пунктов РФ, реализуемые с помощью мобильных телемедицинских комплексов (МТК) в рамках проекта по созданию телемедицинских систем (ТМС). Основу классической ТМС составляют два сегмента, взаимодействующих между собой посредством телекоммуникационных линий связи. Первый сегмент включает в себя сеть стационарных телемедицинских консультационно-диагностических центров, а второй — множество МТК различного назначения. Проведен анализ возможных архитектур ТМС, выявлены недостатки двухсегментной ТМС, главным из которых является обособленность системы от сети существующих в регионах РФ амбулаторных лечебно-профилактических учреждений (ЛПУ). Показано, что реализация такого решения ведет к созданию дублирующих контуров предоставления медицинских услуг населению, к передаче части функций амбулаторных ЛПУ в стационары ТМС и, как следствие, к нарушению установленных правил медицинского документооборота, к повышению стоимости создания и эксплуатации ТМС. Предложена трехсегментная архитектура ТМС, включающая в схему информационного взаимодействия помимо МТК и стационаров ТМС существующие амбулаторные лечебные учреждения. Предлагаемое решение свободно от недостатков двухсегментной ТМС, и ее функционирование укладывается в рамки существующего законодательства по организации оказания медицинской помощи населению в РФ.

**Ключевые слова:** телемедицинские центры; мобильные телемедицинские комплексы (МТК); лечебно-профилактические учреждения (ЛПУ); первичная медико-санитарная помощь; телекоммуникационный центр ТМС

**DOI:** 10.14357/08696527170109

### 1 Введение

На ранних этапах использования информационно-коммуникационных технологий (ИКТ) в медицине наиболее распространенными пилотными телемедицинскими проектами были проекты федеральных и региональных телемедицинских

---

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

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

центров, обеспечивающих удаленные консультации врачей и пациентов, причем считалось, что за этими проектами большое будущее [1, 2]. Однако со временем стало понятно, что отвлечение медицинских светил от их основной деятельности только лишь для удаленного обучения и консультаций врачей (а тем более пациентов) на регулярной основе экономически нецелесообразно, допустимо в исключительных случаях (медицина катастроф), а оплата возможна только вне рамок обязательного медицинского страхования (ОМС). Примером такого проекта может служить проект компании Divisy удаленных консультаций в процессе реабилитации пострадавших в результате теракта в г. Беслане в 2004 г. [3].

В крупных городах с развитой системой здравоохранения использование телемедицинских технологий не является критически важным при повседневной деятельности ЛПУ (за исключением внутрибольничной телемедицины), при том что сетевая инфраструктура позволяет развернуть как взаимодействие между врачами, так и удаленное наблюдение за пациентами при реабилитации, в том числе видеоконсультации. В Москве, например, накоплен значительный опыт pilotных проектов, включающих как телемедицинские консультации врачей ведущими федеральными медицинскими центрами, так и информационный обмен DICOM-файлами между ЛПУ (диагностическими центрами и стационарами). Успешными зарекомендовали себя проекты организации обмена цифровыми лабораторными данными между ЛПУ (в частности, диагностическим центром и поликлиниками на уровне округа) [4]. В крупных городах пациентам доступны сервисы платных экспресс-лабораторий, осуществляющих передачу пациенту результатов его анализов в электронном виде с использованием Интернета.

Современное понимание сфер применения ТМС можно классифицировать следующим образом:

1. Клиническая телемедицина — внутрибольничная телемедицина, а также организация и оказание консультативно-диагностической помощи из ведущих федеральных, региональных российских и зарубежных медицинских центров пациентам в местах их лечения и проживания.
2. Профилактическая телемедицина — мониторинг и управление эпидемической ситуацией, организация и проведение диспансеризации населения, профилактических медицинских осмотров работников предприятий в сельской местности, удаленных и труднодоступных районах с использованием телемедицинских технологий и мобильных телемедицинских лабораторий, в том числе для профилактики туберкулеза и других социально опасных заболеваний.
3. Персональная и домашняя телемедицина — медицинское обслуживание пожилых людей, людей с ограниченными возможностями, хронических больных, больных в послеоперационный период на дому.
4. Медицина катастроф — организация и оказание медицинской помощи при массовых поражениях в результате природных и техногенных катастроф,

включая оказание помощи пострадавшим в начальный период ликвидации последствий чрезвычайной ситуации.

## 5. Дистанционное обучение, повышение квалификации медицинских кадров.

В целом, телемедицина — это комплекс организационных, финансовых и технологических мероприятий, обеспечивающих деятельность системы оказания дистанционной консультационно-диагностической медицинской услуги, при которой пациент или врач, непосредственно проводящий обследование или лечение пациента, получает дистанционную консультацию другого специалиста, используя современные ИКТ.

## 2 Двухсегментная модель построения телемедицинской системы

В упрощенном виде ТМС можно представить в виде двух частей (сегментов). Один сегмент представляет собой сеть телемедицинских консультационно-диагностических центров, создаваемых на базе стационарных медицинских учреждений различных уровней для проведения телемедицинских консультаций и предоставления других телемедицинских услуг, а второй — множество стационарных и амбулаторных лечебных учреждений (ЛПУ), врачи которых нуждаются в получении таких консультаций у ведущих экспертов по различным направлениям. Телемедицинские центры связаны между собой и с ЛПУ высокопроизводительными линиями связи для передачи первичных цифровых медицинских данных и организации видеоконференций. Консультации могут проводиться как в «отложенном» режиме, так и в режиме реального времени.

Новый шаг в развитии ТМС, в повышении качества и доступности медицинской помощи был сделан с появлением МТК [1, 5, 6]. Мобильные телемедицинские комплексы представляют собой автономные передвижные телемедицинские лабораторно-диагностические комплексы различной специализации, смонтированные на разных средствах доставки (автомобили, поезда, речные, морские и воздушные суда). Мобильные телемедицинские комплексы снабжены средствами телекоммуникационной связи, вплоть до космической, и могут оперативно прибывать в любую точку, где возникает потребность в оказании населению медицинской помощи. Мобильные телемедицинские комплексы предназначены для решения широкого спектра медицинских задач и оказания медицинских услуг жителям сельской местности в удаленных и труднодоступных районах.

Одной из важных областей возможного применения МТК является медицинское обслуживание групп населения, ведущего мигрирующий или полуоседлый образ жизни, например сельских жителей, занимающихся отгонным скотоводством, работников вахтовых бригад и т. п. — словом, во всех тех случаях, когда людям по месту их временного проживания может потребоваться некоторый спектр медицинских услуг, включая лечение, обследования и диагностику. Неоценимую помощь МТК могут оказать при возникновении техногенных или природных катастроф или эпидемий, а также при проведении военных учений

или спецопераций [7]. Во всех перечисленных случаях МТК, функционирующие в рамках ТМС, выступают в качестве передвижных миниклиник, связанных по телекоммуникационным линиям связи со стационарными телемедицинскими центрами, для оказания населению срочной медицинской помощи под телемедицинским контролем специалистов телемедицинских центров.

Еще одной важной областью возможного применения МТК является представление плановой медицинской помощи жителям удаленных и труднодоступных населенных пунктов, проведение диспансеризации и периодических осмотров. Однако в данном случае МТК уже будут работать на «территории» и выполнять функции по охране здоровья населения, возложенные на сеть стационарных амбулаторно-поликлинических лечебных учреждений данного региона, и обособленное от этих ЛПУ функционирование МТК в составе двух сегментной ТМС не укладывается в рамки существующего законодательства [8, 9].

Первичная медико-санитарная помощь является основой системы оказания медицинской помощи и включает в себя мероприятия по профилактике, диагностике, лечению заболеваний и состояний, медицинской реабилитации, наблюдению за течением беременности, формированию здорового образа жизни, в том числе снижению уровня факторов риска заболеваний, и санитарно-гигиеническому просвещению [9]. Первичная медико-санитарная помощь оказывается в плановой и неотложной формах.

Территориально-участковый принцип организации оказания первичной медико-санитарной помощи заключается в формировании групп обслуживаемого контингента по признаку проживания (пребывания) на определенной территории. В целях обеспечения права граждан на выбор врача и медицинской организации [8] допускается прикрепление граждан, проживающих вне зоны обслуживания медицинской организации, к участковым врачам-терапевтам, врачам общей практики (семейным врачам) для медицинского наблюдения и лечения с учетом рекомендуемой численности прикрепленных граждан.

Поликлиники являются самостоятельными медицинскими организациями или структурным подразделением медицинской организации (ее структурного подразделения), оказывающей первичную медико-санитарную помощь, и организуются для оказания первичной доврачебной медико-санитарной помощи, первичной врачебной медико-санитарной помощи, первичной специализированной медико-санитарной помощи, а также паллиативной медицинской помощи населению. Первичная медико-санитарная помощь оказывается амбулаторно, в том числе в медицинской организации, либо по месту выезда мобильной медицинской бригады.

Мобильная медицинская бригада организуется в структуре медицинской организации, оказывающей первичную медико-санитарную помощь, для оказания первичной медико-санитарной помощи населению, в том числе для жителей населенных пунктов с преимущественным проживанием лиц старше трудоспособного возраста либо расположенных на значительном удалении от медицинской организации и(или) имеющих плохую транспортную доступность. Состав мобильной

медицинской бригады формируется руководителем медицинской организации из числа врачей и медицинских работников со средним медицинским образованием исходя из цели ее формирования и возложенных задач. В состав мобильной медицинской бригады по согласованию могут включаться медицинские работники других медицинских организаций.

Таким образом, все задачи, возлагаемые на МТК в рамках ТМС, уже решаются силами амбулаторных ЛПУ и мобильных медицинских бригад. Следует также обратить внимание на еще один аспект. В структуре двухуровневой модели ТМС все сведения, собранные МТК в процессе обследования населения, передаются в стационарные медицинские учреждения сети ТМС.

Результаты обследования (лабораторные и инструментальные исследования, заключения врачей общей практики и узкопрофильных специалистов) в абсолютном своем большинстве будут касаться пациентов, которым срочная госпитализация не требуется, а среди выявленных случаев заболеваний необходимая медицинская помощь может быть предоставлена пациентам в рамках амбулаторных ЛПУ, к которым эти пациенты прикреплены. Согласно установленному порядку все сведения, полученные при обследовании населения и в процессе оказания медицинской помощи, должны заноситься в медицинские карты пациентов. Медицинские карты хранятся в ЛПУ по местам прикрепления пациентов, на регистратуры которых возлагается задача систематизированного хранения медицинской документации пациентов, обеспечение своевременного подбора и доставки медицинской документации в кабинеты врачей [9].

В итоге из числа обследованных бригадами МТК жителей труднодоступных населенных пунктов лишь незначительная часть пациентов будет действительно нуждаться в лечении в условиях стационаров ведущих медицинских клиник и регионов, на базе которых и будут создаваться стационарные телемедицинские консультационно-диагностические центры. При этом согласно действующему законодательству [9] в большинстве случаев специализированная медико-санитарная помощь в стационарах и специализированных центрах оказывается пациентам по направлениям медицинских работников, оказывающим этим пациентам первичную врачебную медико-санитарную помощь, т. е. по направлениям врачей ЛПУ, к которым эти пациенты прикреплены.

Таким образом, система оказания медицинской помощи населению с использованием МТК в двухсегментной архитектуре ТМС входит в конфликт с существующим законодательством и имеет следующие основные недостатки:

1. Создаются дублирующие контуры оказания первичных медицинских услуг жителям удаленных и труднодоступных населенных пунктов, которые действуют параллельно с системой амбулаторных ЛПУ и независимо от них, что ведет к увеличению затрат на оказание медицинской помощи населению.
2. Высококвалифицированные специалисты стационарных центров ТМС отвлекаются на рутинный анализ большого числа медицинских документов, полученных в процессе сплошного обследования населения, выполняя, по сути, работу сотрудников амбулаторных ЛПУ.

3. Полученные бригадами МТК в процессе обследования населения медицинские документы изымаются из документооборота амбулаторных ЛПУ, что затрудняет их использование в процессе непрерывного наблюдения за состоянием здоровья прикрепленных к этим ЛПУ пациентов.

### **3 Трехсегментная модель телемедицинской системы**

Описанная ранее двухсегментная модель построения ТМС (МТК и телемедицинские центры), функционирующая в отрыве от существующей сети медицинских организаций местного и регионального уровня, в том числе от амбулаторно-поликлинических ЛПУ, предоставляющих первичную медицинскую помощь прикрепленному населению, не эффективна. Реализация такой модели ведет к созданию дублирующих контуров оказания медицинских услуг населению, возлагает часть функций персонала амбулаторных ЛПУ на сотрудников стационарных телемедицинских центров, увеличивает общие затраты на предоставление медицинских услуг, а также нарушает действующие потоки медицинского документооборота.

Предлагается рассмотреть трехсегментную модель построения ТМС, в которую наряду с МТК и телемедицинскими центрами включены амбулаторные ЛПУ. Такая система свободна от указанных ранее недостатков, снижает затраты на внедрение мобильной телемедицинской помощи населению и не требует изменения действующего законодательства и нормативных актов в сфере предоставления медицинских услуг населению.

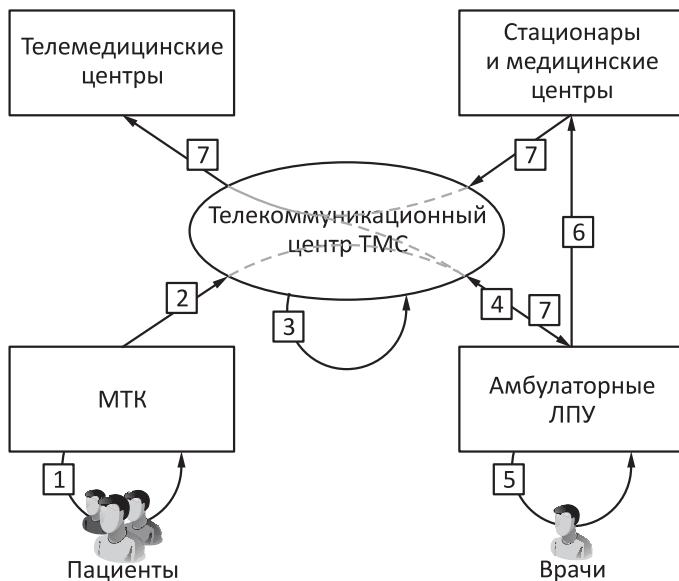
Необходимо также рассмотреть вопрос об организации деятельности МТК, определить, в чьем ведении будут находиться эти комплексы, кто их будет обслуживать и кто ими будет управлять. Предлагается на территории каждого региона РФ создавать станции МТК, на балансе которых будут находиться все МТК региона, которые будут осуществлять их содержание и техническое обслуживание. Станции МТК, по аналогии со станциями скорой помощи, будут действовать на территории данного региона и по заявкам руководителей ЛПУ и органов здравоохранения региона обслуживать население удаленных и труднодоступных регионов.

Телемедицинская система, построенная на основании трехсегментной модели, будет включать следующие основные компоненты:

1. *Стационарные телемедицинские центры*, создаваемые на базе ведущих федеральных и региональных лечебных учреждений. Организация и оказание лечебной и консультативно-диагностической помощи населению в данном сегменте ТМС ничем не отличается от двухсегментной модели, за исключением правил формирования потока поступающих на лечение пациентов, который складывается из пациентов, направляемых из амбулаторных и стационарных ЛПУ, необязательно входящих в состав ТМС.

2. *Мобильные телемедицинские лабораторно-диагностические комплексы* различной специализации. Их назначение и основные функции такие же, как и в двухсегментной модели — оказание медицинских услуг населению в сельской местности, удаленных и труднодоступных районах. Отличие заключается в том, что все медицинские данные, получаемые в процессе обследования населения, передаются в амбулаторные ЛПУ, к которым прикреплены обследованные пациенты.
3. *Станции МТК* — укомплектованные МТК разной специализации, размещаемые на различных средствах доставки: на автотранспортных средствах, железнодорожном транспорте, на базе авиации, судов речного или морского флота. Станции МТК предназначены для содержания и организации работы МТК. Комплектация МТК лабораторно-диагностическим оборудованием и состав средств доставки МТК определяются географией региона, обслуживаемого данной станцией. Выезд бригад МТК для проведения обследований жителей конкретных населенных пунктов должен осуществляться по заявкам руководителей ЛПУ, органов местного здравоохранения или, при возникновении чрезвычайных ситуаций, руководителями органов МЧС. Комплектация бригад МТК может осуществляться по смешанному принципу: как медицинскими работниками станции, так и сотрудниками ЛПУ, в интересах которого выполняется обследование населения.
4. *Телекоммуникационный центр ТМС* предназначен для приема от МТК полученной в результате обследования жителей населенных пунктов медицинской информации с использование различных каналов связи, имеющихся в районе проводимых обследований: кабельных, сотовых или спутниковых. Полученные от МТК данные сортируются в телекоммуникационном центре ТМС для отправки их в ЛПУ по месту прикрепления пациентов и преобразуются в формат, приемлемый для обработки в соответствующих ЛПУ. Передача подготовленных пакетов данных по месту назначения осуществляется с учетом имеющихся в распоряжении конкретных ЛПУ каналов связи (сетей здравоохранения, Федерального фонда ОМС и др.). В экстренных случаях полученные по определенным пациентам медицинские данные могут передаваться непосредственно в стационарные центры ТМС.
5. *Амбулаторно-поликлинические ЛПУ* предназначены для приема, обработки и хранения медицинских данных, полученных в ходе проводимых с помощью МТК обследований пациентов. На основании анализа полученных медицинских данных могут быть выявлены случаи заболевания пациентов, которым назначается амбулаторное лечение или лечение в условиях стационаров, не входящих в состав ТМС. При необходимости пациенты направляются для прохождения лечения или дальнейшей диагностики в стационарные телемедицинские центры ТМС.

На рисунке представлена архитектура ТМС регионального уровня, построенная на базе трехсегментной модели. Станции МТК и контуры управления МТК на рисунке не показаны.



Архитектура трехсегментной модели ТМС: 1 — обследование пациентов; 2 — передача данных из МТК; 3 — сортировка и форматирование данных МТК; 4 — передача данных МТК в ЛПУ; 5 — анализ медицинских данных МТК; 6 — направление на лечение в стационары; 7 — направление на лечение в темедицинские центры

#### 4 Телекоммуникационный центр телемедицинской системы

Телекоммуникационный центр ТМС является центральным технологическим узлом системы, осуществляющим взаимодействие между всеми основными функциональными компонентами (сегментами) ТМС. Телекоммуникационный центр предназначен для приема медицинских данных от МТК, для их сортировки, обработки и передачи в ЛПУ для анализа и постоянного хранения. Для выполнения возложенных на него функций центр ТМС должен включать в свой состав следующие подсистемы:

- комплекты телекоммуникационных устройств, осуществляющих прием данных от МТК по кабельным, сотовым и космическим каналам связи;
- сервисы приема пакетов медицинских данных, содержащих информацию о результатах оказанных населению с использованием МТК медицинских услуг;
- серверы сортировки, обработки и временного хранения медицинских данных обследованных пациентов;
- линейки адаптеров, осуществляющих подготовку и передачу данных в ЛПУ для их анализа и постоянного хранения;

- видеосерверы, осуществляющие организацию видеосвязи при проведении телемедицинских консультаций между телемедицинскими центрами, МТК и ЛПУ.

Учитывая большой объем, разнообразие получаемых от МТК данных и необходимость обеспечения возможности их автоматической обработки, пакеты поступающих от МТК данных должны быть представлены в XML-формате, а их прием должен осуществляться с помощью веб-сервисов. Каждый пакет поступающих от МТК данных должен содержать заголовок и множество секций с результатами оказанных пациентам медицинских услуг. Заголовок пакета должен содержать сведения о дате и месте проводимого обследования и бригаде МТК. В каждой секции данных пациента должны содержаться сведения о пациенте, его страховом полисе и об оказанных ему услугах, включая первичные данные проведенных анализов и инструментальных исследований.

Поступившие от МТК данные с результатами обследования пациентов должны сортироваться по месту их назначения (по ЛПУ для передачи на постоянное хранение) и передаваться на серверы центра для временного хранения. В зависимости от режима работы МТК — плановое обследование пациентов в интересах некоторых ЛПУ или экстренный выезд в точку чрезвычайного происшествия — адрес места назначения определяется по-разному. В случае плановой работы МТК по обследованию пациентов, прикрепленных к тем или иным ЛПУ, место назначения каждой секции данных пациента определяется по страховому полису, т. е. секции данных пациента перераспределяются по пакетам ЛПУ в соответствии с местами их прикрепления. В случае выезда по экстремальным ситуациям весь полученный от МТК пакет данных перенаправляется в ЛПУ (телецентрический центр или иную клинику), ответственное за ликвидацию данного ЧП. Информация о режиме работы МТК (плановый или экстренный) передается в заголовке пакета данных МТК.

Отсортированные по месту назначения данные после переформатирования передаются в соответствующие ЛПУ с помощью линейки адаптеров. Формат данных с результатами обследования пациентов выбирается в соответствии с возможностями системы автоматизации ЛПУ назначения. Каждый адаптер осуществляет преобразование в определенный формат данных. При отсутствии в ЛПУ назначения какой-либо системы автоматизации данные для передачи оформляются в соответствии с требованиями бумажного документооборота.

При необходимости организации телемедицинской консультации МТК должен подключиться к телекоммуникационному центру ТМС, серверы и персонал которого обеспечат организацию телемоста с нужным или нужными телемедицинскими центрами ТМС.

Организация единого телекоммуникационного центра позволит сконцентрировать в одной точке дорогостоящее оборудование, квалифицированных специалистов и обслуживающий персонал, что обеспечит снижение стоимости создания и эксплуатации ТМС и повысит надежность функционирования ТМС. При

необходимости по мере распространения применения МТК по различным регионам РФ телекоммуникационные центры могут масштабироваться, размещаясь, например, по центрам федеральных округов или регионов.

## 5 Заключение

Рассмотрено применение МТК для повышения доступности и улучшения качества медицинской помощи, предоставляемой жителям удаленных и труднодоступных населенных пунктов. Предложена трехсегментная архитектура ТМС, включающая три основных функциональных сегмента (стационарные телемедицинские центры, МТК и амбулаторные ЛПУ) и два технологических компонента системы — станции МТК и телекоммуникационный центр. Станции МТК обеспечат эффективную эксплуатацию и оперативное управление мобильными комплексами, а телекоммуникационный центр позволит оптимизировать процессы обмена информацией между объектами основных функциональных сегментов системы. Предложенная архитектура применима для организации работы МТК как в режиме оказания экстренной медицинской помощи, так и при проведении плановых медицинских обследований населения.

## Литература

1. Шашенкова Е. Информационные технологии на службе у медиков МПС // Intelligent Enterprise/RE (Корпоративные системы), 2001. № 4(21). <https://www.iemag.ru/projects/detail.php?ID=17131>.
2. Анализ развития и использования ИКТ в субъектах Российской Федерации: Аналитический доклад. — М.: Институт развития информационного общества, 2008. С. 162–165.
3. Мобильные телемедицинские системы DiViSy. <http://www.divisy.ru/Solutions/620>.
4. Владимирова С. Ю., Резников Р. С. От универсального программного комплекса «Уникум» до автоматизированной информационной системы (АИС) «Диагностический центр» // Сб. научн. тр. Диагностического центра № 4. — М., 2004. С. 16–24.
5. Натензон М. Я. Новое поколение мобильных телемедицинских комплексов для оказания медицинских услуг населению в удаленных и труднодоступных районах // Int. Rev. Armed Forces Medical Services, 2012. № 4. С. 60–69.
6. Натензон М. Я. Национальная телемедицинская система — эффективное средство повышения уровня медицинского обслуживания населения Российской Федерации. 2014. [http://arctelemed.ru/docs/Натензон%20М.Я.%20\(2\).pdf](http://arctelemed.ru/docs/Натензон%20М.Я.%20(2).pdf).
7. Мобильный телемедицинский комплекс — придуман русскими, а пользоваться будут в НАТО? // Оружие России. <http://www.arms-expo.ru/news/archive/mobilnyy-telemedicinskiy-kompleks-priduman-russkimi-a-pol-zovat-sya-budut-v-nato-03-04-2012-12-16-00>.
8. Об основах охраны здоровья граждан в Российской Федерации: Федеральный закон от 21.11.2011 № 323-ФЗ.

9. Об утверждении Положения об организации оказания первичной медико-санитарной помощи взрослому населению: Приказ Министерства здравоохранения и социального развития Российской Федерации от 15 мая 2012 г. № 543н.

Поступила в редакцию 24.10.16

---

## DELIVERY OF HEALTH CARE TO THE POPULATION USING MOBILE TELEMEDICINE SYSTEMS

**G. Y. Ilushin and V. I. Limansky**

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 approaches to increasing accessibility and improving quality of the medical care provided to inhabitants of hardly accessible and remote settlements of the Russian Federation, realized by means of mobile telemedicine units (MTU) within the project of creation of telemedicine systems (TMS) are considered. The basis of classical TMS is made by two segments interacting among themselves by means of telecommunication lines. The first segment includes a network of stationary telemedicine consulting and diagnostic centers, and the second — a set of MTU performing different functions. The analysis of possible architecture of TMS is carried out. Shortcomings of two-segment TMS, from which the main one is isolation of a system from a network of the out-patient polyclinics existing in regions of the Russian Federation, are revealed. It is shown that implementation of such decision results in creation of duplicating circuits of provision of medical services to the population, transmission of a part of functions of polyclinics to hospitals of TMS, violation of the rules of medical documents flow, and increase in cost of creation and operation of TMS. The paper proposes three-segment architecture of TMS, which includes existing polyclinics as well as MTUs and hospitals of TMS. The proposed solution is free from shortcomings of two-segment TMS, and its functioning conforms to the existing legislation on the organization of delivery of health care to the population of the Russian Federation.

**Keywords:** telemedicine center; mobile telemedicine module (MTU); primary sanitarian help of the physician; telemedicine system (TMS); telecommunication center of TMS

**DOI:** 10.14357/08696527170109

## References

1. Shashenkova, E. 2001. Informatonnnye tekhnologii na sluzhbe u medikov MPS [Information technologies on service of physicians of Ministry of Railways]. *Korporativnye sistemy* [Intelligent Enterprise] 4(21). Available at: <https://www.iemag.ru/projects/detail.php?ID=17131> (accessed February 2, 2017).

2. Analiz razvitiya i ispol'zovaniya IKT v sub"ektakh Rossiiyskoy Federatsii [The analysis of development and use of ICT in subjects of the Russian Federation]. 2008. Moscow: Institute of the Information Society. Analytical Report. 162–165.
  3. Mobil'nye telemeditsinskie sistemy DiViSy [Mobile DiViSy telemedicine systems]. Available at: <http://www.divisy.ru/Solutions/620/> (accessed February 2, 2017).
  4. Vladimirova, S. Yu., and R. S. Reznikov. 2004. Ot universal'nogo programmnogo kompleksa "Unikum" do avtomatizirovannoy informatsionnoy sistemy (AIS) "Diagnosticheskiy tsentr" [From the universal program Unique Person complex to the automated information system (AIS) "Diagnostic center"]. *Sb. nauchn. tr. Diagnosticheskogo tsentra No. 4* [Collection of scientific works of Diagnostic center No. 4]. Moscow. 16–24.
  5. Natenzon, M. Ya. 2012. New generation of mobile telemedicine units creates new possibilities for medical services to population in the remote and hard-to-access districts. *Int. Rev. Armed Forces Medical Services* 4:60–69.
  6. Natenzon, M. Ya. 2014. Natsional'naya telemeditsinskaya sistema — effektivnoe sredstvo povysheniya urovnya meditsinskogo obsluzhivaniya naseleniya Rossiyskoy Federatsii [National telemedicine system — an effective remedy of increase in level of medical attendance of the population of the Russian Federation]. Available at: [http://arctelemed.ru/docs/Натензон%20М.Я.%20\(2\).pdf](http://arctelemed.ru/docs/Натензон%20М.Я.%20(2).pdf) (accessed February 2, 2017).
  7. Mobil'nyy telemeditsinskiy kompleks — priduman russkimi, a pol'zovat'sya budut v NATO? [The mobile telemedicine complex — is invented by Russians, and will be used in NATO?] Available at: <http://www.arm-expo.ru/news/archive/mobilnyy-telemedicinskiy-kompleks-priduman-russkimi-a-pol-zovat-sya-budut-v-nato-03-04-2012-12-16-00/> (accessed February 2, 2017).
  8. Ob osnovakh okhrany zdorov'ya grazhdan v Rossiyskoy Federatsii [About bases of protection of public health in the Russian Federation]. 2011. Federal'nyy zakon ot 21.11.2011 No. 323-FZ [Federal law dated 21.11.2011 No. 323-FZ].
  9. Ob utverzhdenii Polozheniya ob organizatsii okazaniya pervichnoy mediko-sanitarnoy pomoshchi vzroslomu naseleniyu [About the adoption of the Provision on the organization of rendering primary health care to adult population]. 2012. Prikaz Ministerstva zdravookhraneniya i sotsial'nogo razvitiya Rossiyskoy Federatsii ot 15 maya 2012 g. No. 543n [The order of the Ministry of Health and Social Development of the Russian Federation dated May 15, 2012 No. 543n].

*Received October 24, 2016*

## Contributor

**Ilushin Gennadiy Y.** (b. 1947) — Candidate of Science (PhD) in technology, Head of Laboratory, 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; ilushin@ipiran.ru

**Limansky Valery I.** (b. 1952)— Candidate of Science (PhD) in technology, senior scientist, Institute of Informatics Problems, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119333, Moscow, Russian Federation; vlimansky@ipiran.ru

## ПРИКЛАДНЫЕ АСПЕКТЫ КОГНИТИВНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ СЛОЖНЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ

*Г. В. Лукьянов<sup>1</sup>, Д. А. Никишин<sup>2</sup>*

**Аннотация:** Статья посвящена прикладным аспектам информационного моделирования при проектировании информационных систем (ИС) сложных (комплексных) предметных областей. Приведена логическая схема проектирования ИС, рассмотрены основные этапы проектирования. Представлен гибридный — каскадно-циклический — алгоритм формирования мониторинговой ИС, призванный компенсировать недостатки как каскадной, так и итерационной парадигмы проектирования и обеспечить качество и жизнеспособность ИС в условиях краткосрочного планирования.

**Ключевые слова:** когнитивное моделирование информационных систем; методы моделирования и разработки информационных систем; условные и безусловные связи

**DOI:** 10.14357/08696527170110

### 1 Введение

Роль моделирования и моделей в современной науке и технике заключается в возможности исследования важнейших свойств и характеристик моделируемой предметной области с экономически обоснованными затратами материальных, финансовых, людских и временных ресурсов. Независимо от степени сложности предметной области моделирование объектов и процессов предметной области позволяет изучать их в более благоприятной обстановке, например в лабораторных условиях. При этом становится возможным изучение одного и того же объекта или процесса параллельно несколькими исследователями, а также многократно воспроизводить необходимые условия функционирования предметной области [1].

Особую специфику моделирование приобретает при проектировании современных ИС, особенно в тех случаях, когда автоматизации в результате внедрения ИС подлежит сложная, многогранная и масштабная деятельность. Как

---

<sup>1</sup>Институт проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук, gena-mslu@mail.ru

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

показывает опыт создания подобных систем [1–3], в этот процесс в подавляющем большинстве случаев приходится вовлекать разнородные, территориально распределенные ведомства и учреждения, которые работают по различным методикам, инструкциям и регламентам. Такая ситуация возникает, например, в процессе автоматизации в масштабе отдельной отрасли народного хозяйства, когда информационный процесс охватывает сотни разнородных показателей, которые формируются на основе десятков часто несовместимых методик. В этом и подобных случаях к качеству проектирования предъявляются повышенные требования, так как последующая переделка недостаточно тщательно проработанного проекта ИС связана не только со значительными затратами финансовых, материальных и людских ресурсов, но и с потерей времени, что является критичным в системе государственного и военного управления.

В связи с этим обеспечение необходимого качества проектирования невозможно без тщательно разработанной модели предметной области, что, в свою очередь, требует наличия соответствующей методологии моделирования, что и обуславливает актуальность данной статьи.

Цель исследования состояла в изучении прикладных аспектов моделирования при проектировании сложных ИС, когда одним из решающих условий процесса моделирования становится учет когнитивного фактора.

Для достижения сформулированной цели были поставлены следующие основные задачи:

1. Анализ направлений когнитивных исследований в мировой практике.
2. Раскрытие общих и частных характеристик модели предметной области и модели ИС.
3. Выделение наиболее значимых направлений постановки задач при проектировании сложных ИС.
4. Анализ специфики процесса разработки ИС сложных и комплексных предметных областей, преимуществ и недостатков существующих методов проектирования и формирование практически применимого подхода к проектированию сложных ИС.

## **2 Современные направления когнитивных исследований в структуре мировой науки**

Когнитивная тематика достаточно давно находится в центре внимания ученых и исследователей [4–9]. За истекшие 10–15 лет даже появилась новая отрасль знаний — «когнитивная информатика», которая наиболее полно отвечает научным представлениям о взаимосвязи и взаимозависимости мыслительной деятельности человека и информационного процесса.

Значительная доля исследований посвящена изучению умственных механизмов восприятия и обработки информации и принятия на этой основе решений [10].

Опора в научных изысканиях делается, во-первых, на психологические, биологические и физиологические аспекты деятельности человека, что вполне объяснимо. В качестве яркого примера таких исследований может служить работа японских ученых Ф. Мицогуши, Х. Нишиама и Х. Ивасаки «Новый подход к обнаружению потери внимания водителем на основе данных о движении его глаз» [11].

Во-вторых, используются результаты работ в области искусственного интеллекта и лингвистики в части структурного анализа текстовой, аудио- и визуальной информации, а также распознавания образов. Этому направлению на конференциях, симпозиумах и семинарах, как правило, посвящается отдельная сессия, секция или круглый стол, так как исследования здесь носят сильный междисциплинарный характер и по своему содержанию серьезно отличаются от прочих направлений в области когнитивной информатики. Например, в период формирования форума на I Международной конференции, посвященной когнитивной информатике и когнитивной обработке данных, была проведена специальная сессия «Искусственный интеллект» [12]. В дальнейшем эта традиция с некоторыми вариациями в названиях неизменно соблюдалась.

Наконец, в-третьих, исследования ведутся в области (автоматизированной) интеллектуальной обработки больших массивов неструктурированных данных. Усилия здесь сосредоточены на разработке программных средств, имитирующих умственную деятельность человека и позволяющих выявлять неявные функциональные зависимости и неочевидные тенденции на основе анализа больших информационных массивов в интересах разработки объективных и долгосрочных прогнозов, а также принятия на этой основе адекватных решений. Например, на 13-й Международной конференции по когнитивной информатике и когнитивной обработке данных этому направлению было посвящено несколько докладов.

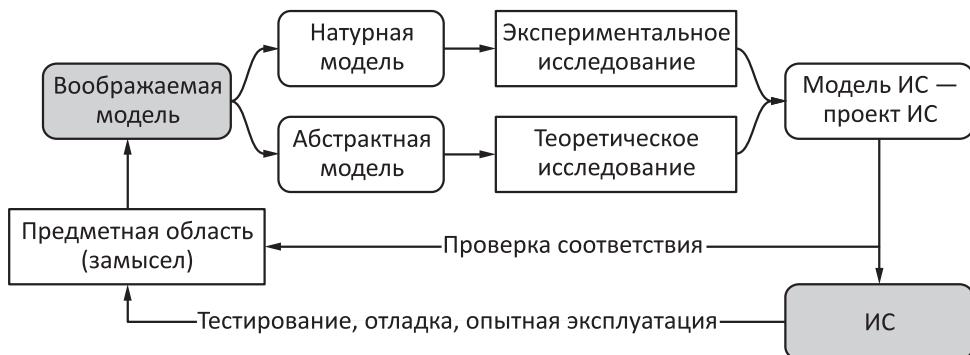
Вместе с тем ученые и исследователи пока обходят стороной когнитивные аспекты проектирования в целом и проектирования и создания ИС в частности. Хотя именно ИС на современном этапе исторического развития служат основным инструментом поддержки принятия решений, и от эффективности их работы в значительной мере зависит качество и оперативность принимаемых решений [2]. Разработка современных сложных и многофункциональных ИС, например для мониторинга и оценки национальной безопасности Российской Федерации (НБРФ), — это многогранный, многоэтапный и длительный процесс, предусматривающий взаимодействие различных структурных подразделений исполнителя работ и, соответственно, многих аналитиков, разработчиков и администраторов, при этом чаще всего функционально разделенных и пространственно распределенных [1, 3]. И когнитивный аспект в этой работе играет не последнюю роль.

Таким образом, исследования роли и значения когнитивной составляющей и ее учета в процессе проектирования ИС даже в плане формулирования проблемы и постановки задачи является новым, неизученным и перспективным вопросом.

### 3 Этапы моделирования

Моделирование при проектировании и создании ИС имеет некоторые особенности по сравнению с другими сферами [13]. Так, в самолетостроении модель представляет собой образ еще не существующего материального объекта — самолета. При проектировании же ИС модель прежде всего является образом уже существующей сущности (причем как материальной, так и виртуальной) и отражает эту сущность в части автоматизации происходящих в ней процессов за счет внедрения ИС. В данном случае модель предметной области служит основой для разработки модели, прототипа, проекта будущей ИС.

Исходя из этой специфики и основываясь на теоретических изысканиях в области применения моделей и моделирования, логику проектирования, разработки и создания ИС можно представить в виде последовательности действий, изображенной на рис. 1.



**Рис. 1** Логическая схема проектирования ИС

Из представленной на рис. 1 логической схемы проектирования ИС следует, что по результатам экспериментальных либо теоретических исследований предметной области, отраженных в ее модели, разрабатывается модель собственно ИС. Затем проводится проверка соответствия проекта ИС целям и задачам проектирования, специфике предметной области. На основании этой проверки уточняется воображаемая модель, а полученные изменения воплощаются в натурной или абстрактной модели с последующей корректировкой проекта ИС.

Описанная выше логика моделирования диктует целесообразность следующих этапов моделирования [14, 15].

**Содержательная постановка задачи.** На этом этапе четко формулируются цели и ставятся задачи моделирования. При этом определяются объекты, которые относятся к решаемой задаче, а также ситуация, которую нужно реализовать в результате ее решения. Для того чтобы задачу можно было описать количественно и использовать при ее решении вычислительную технику, нуж-

но произвести качественный и количественный анализ объектов и ситуаций, имеющих к ней отношение. При этом осуществляется декомпозиция сложных объектов на составные части (элементы), определяются взаимосвязи этих элементов, их свойства и количественные и качественные значения этих свойств, количественные и логические соотношения между ними, выражаемые в виде уравнений, неравенств. В результате решения этой задачи системного анализа объект оказывается представленным в виде системы.

**Математическая постановка задачи.** В процессе математической постановки задачи осуществляется построение математической модели объекта и определение методов (алгоритмов) получения решения задачи. На этом этапе может оказаться, что ранее проведенный системный анализ привел к такому набору элементов, свойств и соотношений, для которого нет приемлемого метода решения задачи, и в результате приходится возвращаться к этапу системного анализа. Как правило, решаемые на практике задачи стандартизованы, системный анализ производится в расчете на известную математическую модель и алгоритм ее решения, проблема состоит лишь в выборе подходящего метода.

**Разработка программы решения задачи на ЭВМ.** Для сложных объектов, состоящих из большого числа элементов и обладающих большим числом свойств, может потребоваться применение специализированных пакетов для информационного моделирования, обеспечивающих ведение базы данных, средств работы с ней, методов извлечения необходимых для расчетов данных [16–18]. Для стандартных задач может быть использован подходящий пакет прикладных программ и систем управления базами данных.

На заключительном этапе производится опытная эксплуатация модели и на основе анализа полученных результатов реализуется окончательный вариант ИС.

## 4 Связи между объектами

Если проводится глубокая декомпозиция предметной области, в результате которой образуется множество объектов [16, 18], то отношения между различными классами и экземплярами объектов отражаются в информационных моделях как связи. Каждая связь задается в модели определенным именем. В графической форме связь представляется как линия со стрелками между связываемыми объектами и обозначается идентификатором связи (например, ER-диаграмма, или диаграмма «сущность–связь»).

Существуют три вида связи: связь «один к одному» реализуется в том случае, когда один экземпляр одного объекта связан с единственным экземпляром другого; связь «один ко многим» возникает тогда, когда один экземпляр первого объекта связан с одним или более экземплярами второго объекта, но каждый экземпляр второго объекта связан только с одним экземпляром первого; связь «многие ко многим» существует, когда один экземпляр первого объекта связан с одним или несколькими экземплярами второго и каждый экземпляр второго связан с одним или многими экземплярами первого.

Связи подразделяются на безусловные и условные. В безусловной связи для участия в ней требуется каждый экземпляр объекта. В условной связи принимают участие не все экземпляры объекта. Связь может быть условной как с одной, так и с обеих сторон.

Все связи в информационной модели требуют описания, которое как минимум включает:

- идентификатор связи;
- формулировку сущности связи;
- вид связи (ее множественность и условность);
- способ описания связи с помощью вспомогательных атрибутов объектов.

Наиболее известная структура, объединенная однонаправленной связью, — это очередь. Возможными обобщениями информационных моделей являются циклическая структура, таблица, стек.

Очень важную роль играет древовидная информационная модель, являющаяся одной из самых распространенных типов классификационных структур. Эта модель строится на основе связи, отражающей отношение части к целому, т. е. связи типа «один ко многим». Таким образом, типы данных в программировании тесно связаны с определенными информационными моделями данных [17].

Еще более общей информационной моделью служат так называемые графовые структуры, которые лежат в основе решения многих задач информационного моделирования.

## 5 Практическая реализация когнитивной составляющей моделирования

Как было показано в ряде предыдущих работ [11, 12, 19, 20], опыт создания сложных ИС, предназначенных для решения междисциплинарных задач и задач управления на стратегическом уровне, выявил ряд проблем, затрудняющих эффективное проектирование и разработку таких ИС. Речь прежде всего идет о высоком уровне фрагментарности и несогласованности связанной с этой деятельностью информации между экспертами, разработчиками и администраторами. В научной литературе степень такой согласованности принято называть уровнем когнитивной интероперабельности [21–23].

По определению проблему когнитивной интероперабельности позволяет преодолеть тщательно разработанная модель предметной области [20], которая должна предоставить всем участникам проекта, независимо от их ведомственной принадлежности и пространственного расположения, целостное и однозначное представление о самой предметной области, о целях и задачах проектирования, а также о функциях, возложенных на ИС. Однако наличие такой модели является необходимым, но не достаточным условием. Даже в случае идеальной модели предметной области не удается избавиться от неоднозначного понимания тех или

иных вопросов проектирования, которые оказывают существенное влияние на ход разработки и на функционирование собственно ИС. Это происходит в силу особенностей персональных знаний экспертов, разработчиков и администраторов, их профессионального опыта. Эти особенности восприятия касаются как модели предметной области, так и проекта ИС, что еще больше усугубляет ситуацию.

В качестве эффективного и наиболее результативного способа преодоления этой проблемы предлагается ввести в регламенты разработки модели предметной области и проектирования ИС раздел, посвященный вопросам согласования отдельных частей модели предметной области и проекта. В этом разделе должны быть предусмотрены следующие важнейшие элементы взаимодействия между всеми заинтересованными подразделениями и участниками проектирования:

- вопросы, подлежащие обязательному согласованию;
- порядок изменения (сокращения, расширения) перечня вопросов, подлежащих согласованию;
- формы документов, передаваемых в порядке согласования между участниками проектирования, предусматривающие возможно полное и однозначное описание сути подлежащих согласованию вопросов;
- жесткие и конкретные сроки согласования, включая и возможность согласования «по умолчанию» в том случае, если ответ на запрос не поступил в установленный срок;
- порядок разрешения спорных вопросов в случае невозможности достичь согласованного решения между участниками проектирования.

## **6 Особенности разработки информационных систем в целях мониторинга и управления в сложных предметных областях**

Говоря о создании ИС, важнейшим компонентом которой с точки зрения функциональности является ее программное обеспечение (ПО), необходимо отметить ряд широко известных методологий (методов и моделей) процесса разработки ПО (*англ. software development process, software process*), которые в общем виде можно распространить и на разработку ИС в целом, поэтому в дальнейшем речь будет идти о разработке ИС, подразумевая, в частности, разработку соответствующего ПО.

Индустрия разработки автоматизированных ИС (АИС) управления зародилась в середине XX в., прошла в своем развитии ряд этапов и приобрела достаточно развитую теоретическую базу для организации процессов разработки ИС [24]. К началу XXI в. стало ясно, что достаточно дорогостоящие системы, такие как CAD (Computer Aided Design), CAM (Computer Aided Manufacturing), PDM (Product Data Management), FRP (Finance Requirements Planning), MRP

(Material Requirements Planning), MES (Management Execution System), ориентированные на локальную автоматизацию и формирование традиционных баз данных, уже не соответствуют требованиям создания единого информационного пространства, предназначенного для синхронизированного обмена данными всеми участниками информационного процесса [25] и комплексного использования корпоративных данных для целей управления и планирования деятельности [24]. Таким образом, возникла насущная необходимость формирования новой методологии построения ИС.

В настоящее время ПО АИС предприятия разрабатывается на основе концепции PLM (Product Lifecycle Management). Анализ возможностей российских и зарубежных PLM-систем [25] показывает, что в них в той или иной степени реализована интеграция CAD, CAM и тому подобных систем. В то же время для осуществления взаимодействия в настоящее время используются методы интеграции на основе бумажной технической документации, программного обмена через структурированные файлы данных или API (Application Programming Interface). Применение таких методов интеграции приводит к многочисленным ошибкам и потере актуальности данных, существенному затруднению рабочих процессов, увеличению стоимости внедрения и сопровождения. Это обуславливает научную проблему, имеющую важное значение для Российской промышленности в условиях постоянного роста конкуренции на мировом рынке научноемкой продукции, — разработку и практическую апробацию моделей и методов создания интегрированных АИС, обеспечивающих комплексную автоматизацию предприятия [25].

Вместе с тем сложность и подводные камни процесса проектирования объясняют тот факт, что в настоящее время в общем потоке проектов достаточно мала доля проектов, выполненных в заявленные сроки и в рамках заданного объема финансирования. Так, согласно статистическим данным, собранным аналитической компанией Standish Group (США), из обследованных в США в 1994 г. 8380 проектов, общая стоимость которых превышала 80 млрд долларов, неудачными оказались более 30% проектов [24]. При этом оказались выполненными в срок лишь 16% от общего числа проектов, а перерасход средств составил 189% от запланированного бюджета. Из 30 000 проектов АИС, обследованных в США в период 1994–2011 гг., успешными (выполненными в срок и в рамках заданного объема финансирования) оказались не более 24%. Анализ причин этого показывает [25], что большинство неудач связано с отсутствием или неправильным применением методологии создания АИС, отвечающей современным требованиям предприятий.

Основными проблемами инженерии ПО становятся ускорение изменений и, соответственно, необходимость быстрой адаптации к новым условиям, обеспечение, с одной стороны, высокой степени гибкости и возможности настройки создаваемых систем на быстро меняющиеся потребности различных категорий пользователей и условия эксплуатации, а с другой — функциональной надежности разрабатываемых ИС.

Кроме того, поскольку крупные ИС охватывают все сферы деятельности предприятий, необходимым условием создания эффективных систем управления, повышения оперативности их адаптации, снижения трудоемкости сопровождения является необходимость привлечения к разработке и модификации моделей специалистов в различных предметных областях.

Также при создании сложных ИС зачастую возникает необходимость разработки семейств моделей, описывающих различные стороны функционирования системы и/или реализации многоуровневых моделей, описывающих систему с разной степенью абстракции [16].

Среди множества существующих методологий проектирования ИС можно выделить три основных подхода [24].

**Каскадная разработка**, или так называемая «модель водопада» (*англ. waterfall model*), которая выглядит как некий поток работ, последовательно проходящий следующие этапы:

- определение требований к создаваемой ИС;
- проектирование будущей ИС, в ходе которого создается проектная документация, описывающая способы и план реализации определенных выше требований;
- реализация, т. е. собственно создание ИС как аппаратно-программного комплекса;
- тестирование и отладка ИС — на этой стадии в некоторой степени могут быть устраниены недочеты, проявившиеся на предыдущих стадиях разработки, однако устранение ошибок в требованиях и проекте ИС представляется весьма проблематичным;
- внедрение ИС и ее последующая поддержка, осуществляемая в процессе эксплуатации, в основном направленная на устранение ошибок и добавление новой функциональности в ИС.

Каскадный подход в чистом виде предполагает, что переход к следующему этапу происходит только после полного и успешного завершения предыдущего, т. е. возврат к предыдущим этапам или их параллельное выполнение не предусматривается. При управлении большими проектами выполнение этапов проекта в строгой последовательности позволяет кардинально снизить многие риски проекта и сделать более прозрачной его реализацию, а также дает возможность оценивать качество продукта на каждом этапе. Тем не менее это обуславливает недостаточную гибкость такого подхода и объявление самоцелью формальное управление проектом, зачастую в ущерб срокам, стоимости или качеству. Для устранения этих недостатков был разработан ряд различных модификаций каскадного подхода (например, модель водоворота), в основном заключающихся в обеспечении возможности возврата к предыдущим этапам, но все они, тем не менее, сопряжены со значительным увеличением материальных и временных затрат на разработку.

**Сpirальная модель** жизненного цикла была предложена для преодоления этих проблем. На этапах анализа и проектирования реализуемость технических решений и степень удовлетворения потребностей заказчика проверяется путем создания прототипов. Каждый виток спирали соответствует созданию работоспособного фрагмента или версии системы. Это позволяет уточнить требования, цели и характеристики проекта, определить качество разработки, спланировать работы следующего витка спирали. Таким образом углубляются и последовательно конкретизируются детали проекта и в результате выбирается обоснованный вариант, который удовлетворяет действительным требованиям заказчика и доводится до реализации. Основная проблема спирального цикла — определение момента перехода на следующий этап. Для ее решения вводятся временные ограничения на каждый из этапов жизненного цикла, и переход осуществляется в соответствии с планом, даже если не вся запланированная работа окончена. Планирование производится на основе статистических данных, полученных в предыдущих проектах, и личного опыта разработчиков.

**Итеративная разработка** (англ. iteration — повторение) отражает объективно существующий спиральный цикл создания сложных систем и предполагает выполнение каждого из перечисленных выше этапов в режиме постоянного анализа полученных результатов и корректировки предшествующих этапов работы. Создаваемая таким образом ИС на каждом этапе проходит повторяющийся цикл PDCA (plan—do—check—act cycle: планирование—реализация—проверка—оценка). В ходе разработки могут быть изменены существующие или выдвинуты дополнительные требования и ограничения, связанные с принятыми техническими решениями. Именно при итеративной разработке их удается учесть в наиболее полной мере, поскольку именно при таком подходе все участники проекта в полной мере готовы к изменениям. Разновидностями каскадного подхода являются V-модель, спиральная модель, прототипирование.

К преимуществам итеративного подхода также относятся:

- непрерывное итеративное тестирование, раннее обнаружение конфликтов между требованиями, моделями и реализацией проекта, снижение воздействия ошибок проектирования на ранних стадиях проекта, что ведет к минимизации затрат на их устранение;
- эффективная обратная связь между участниками проекта, в частности проектной команды с заказчиком ИС, обеспечивающая максимально полное удовлетворение его потребностей, эффективное использование накопленного опыта;
- возможность оценить степень реализации проекта и, как следствие, большая уверенность заказчиков и исполнителей в его успешном завершении, возможность акцентировать усилия на наиболее важных и критичных направлениях проекта;
- более равномерная загрузка участников проекта, более равномерное и предсказуемое распределение затрат по всему периоду создания ИС.

Основным недостатком такого подхода является затрудненность формального и поступательного управления проектом, отсутствие в полной мере завершенных стадий практически до самого конца периода разработки, что затрудняет детальное распределение бюджета проекта между различными этапами и не позволяет отчитаться о завершении каждого из них до окончания всего процесса работы. Это требование не столь существенно в бизнес-структурах, поскольку все работы зачастую могут выполняться одним самостоятельным коллективом исполнителей, а заказчик может позволить себе не требовать формирования промежуточной отчетности, но в сфере госзаказа, в условиях жесткого контроля за финансами, это требование может стать существенным, а кроме того, в таких проектах зачастую задействовано множество независимых коллективов-исполнителей, что требует четкого распределения между ними задач и финансовых средств.

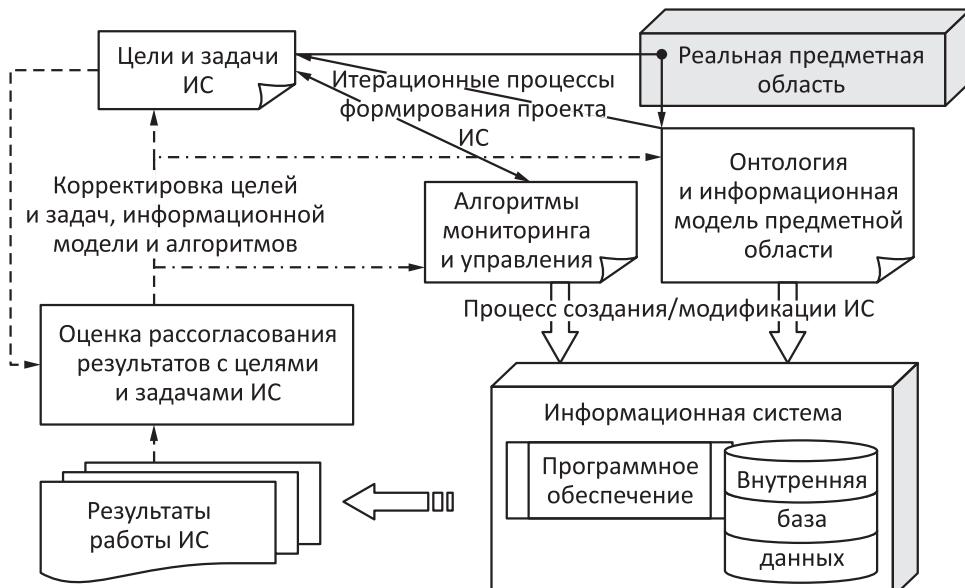
Все же из-за своих преимуществ итеративный подход сейчас является наиболее распространенным. Так, в стандарте PMBoK (Project Management Body of Knowledge), разрабатываемом всемирной некоммерческой организацией «Институт управления проектами» (Project Management Institute, PMI), в 3-й версии формально была закреплена только методика «каскадной модели» [26]. Начиная с PMBoK 4-й версии [27] (вышедшей в 2013 г.) предлагаются как каскадный, так и итеративный подходы, а также сочетающая их гибридная методология управления проектами. К тому же, как будет показано ниже, разработка ИС для сложных предметных областей практически невозможна без применения итеративного подхода.

## **7 Гибридный (каскадно-циклический) алгоритм формирования информационной системы**

Обращаясь к проблематике оценивания и мониторинга состояния дел в сложных предметных областях (мультидисциплинарных и / или междисциплинарных, а также носящих комплексный характер), следует отметить, что эти предметные области зачастую далеко не в полной мере изучены или же изучены фрагментарно. Следствием этого является отсутствие достаточно полных, но в то же время общепринятых и практически полезных онтологий (концептуальных схем) и информационных моделей объектов и процессов, обеспечивающих информационное описание этих предметных областей в создаваемой ИС. Более того, возможно также практическое отсутствие очевидных или в достаточной мере проработанных методов и моделей самого процесса мониторинга сложной программно-целевой деятельности (а также процесса управления ею), учитывающих причинно-следственные зависимости и обеспечивающих правильную постановку целей и задач мониторинга и управления. Отсутствие таких онтологий, моделей и методов вызывает необходимость применения методов когнитивного моделирования, которые, по сути, заложены в описываемом ниже алгоритме формирования проекта ИС.

В связи со сказанным выше разработка качественной ИС сложной предметной области с ходу, методом каскадного проектирования, является делом затруднительным, если не сказать невозможным, и требует применения итерационных методов. С другой стороны, итерационный подход в чистом виде (описанном выше) носит достаточно общий характер, плохо поддается формализации в плане управления и бюджетирования. Вследствие этого необходимо его конкретизировать применительно как к основной задаче мониторинга сложной предметной области, так и к возможной задаче управления ею (или ее отдельными субъектами, имеющими соответствующие рычаги управления). В связи с этим предполагается применение гибридного — каскадно-циклического — алгоритма формирования мониторинговой (или мониторингово-управляющей) ИС для сложных предметных областей. Примером такого применения может служить организация мониторинга обеспечения НБРФ, в предметную область которой входят практически все без исключения сферы общественной жизни, причем существующие в условиях быстро меняющихся внутренних и внешних условий, приоритетов и ряда других факторов [11, 19, 20, 28].

На рис. 2 представлена блок-схема этого алгоритма, предназначенного для мониторинга и оценивания сложных и комплексных (мультидисциплинарных) предметных областей.



**Рис. 2** Алгоритм каскадно-циклического процесса формирования ИС мониторинга и управления в сложной предметной области

Представленные на рис. 2 блоки имеют различную природу:

- A. Блок «Реальная предметная область» представляет собой объекты и процессы (физические, социальные и др.), являющиеся предметом мониторинга и управления.
- B. Блоки «Цели и задачи ИС», «Онтология и информационная модель предметной области» и «Алгоритмы мониторинга и управления», по сути, представляют собой комплект проектной документации, в котором должно быть формально отражено:
  - о в первом — цели и задачи процесса мониторинга (и управления), которые одновременно являются целями и задачами соответствующей ИС;
  - о во втором — онтология (или концептуальная схема) и конкретная информационная модель объектов и процессов предметной области, реализованная по крайней мере в той части, которая необходима и достаточна для стоящих целей и задач;
  - о в третьем — соответствующие целям и задачам алгоритмы процессов оценивания и мониторинга, а также алгоритмы управляющих воздействий, если для ИС предусматривается такая функциональность в виде подсистемы управления.
- C. Блок «Информационная система» представляет собой аппаратно-программное воплощение перечисленных выше документов, включающее в себя<sup>1</sup> базу данных, построенную на основе информационной модели, и программные модули, реализующие алгоритмы мониторинга (и, при необходимости, управления).
- D. Блок «Результаты работы» представляет собой генерируемые в результате практической работы ИС формальные документы<sup>2</sup> — статистические и аналитические отчеты о состоянии и динамике предмета мониторинга и управления.
- E. Блок «Оценка рассогласования» также представляет собой документ (отчет), который отражает степень достижения целей и задач мониторинга и управления, формально — расхождения между требуемыми или запланированными значениями и реально достигнутыми оценками показателей — результатами мониторинга программно-целевой деятельности. Структура этих расхождений более подробно будет рассмотрена ниже<sup>3</sup>.

<sup>1</sup> Естественно, следует помнить об организационных и технических (надежность, безопасность и т. п.) вопросах создания и функционирования ИС, но в данном контексте они оставлены за рамками рассмотрения.

<sup>2</sup> Поскольку речь идет об автоматизированном процессе проектирования, то под термином «документ» в первую очередь следует понимать документы, существующие и используемые в электронном виде и которые лишь при необходимости могут представляться в бумажном виде.

<sup>3</sup> Вообще говоря, полученные расхождения характеризуют не только процесс мониторинга, но и качество процесса управления (если такой функционал предусмотрен в ИС). Однако если механизм управления не предусматривается, то в сухом остатке остается только оценка качества мониторинга.

С этими блоками связаны следующие процессы.

1. Итерационный процесс формирования<sup>1</sup> проекта ИС (тонкие сплошные стрелки). Поскольку речь идет о сложных предметных областях, то создание качественной проектной документации с ходу, методом каскадного проектирования, по изложенным выше причинам является делом затруднительным, если не сказать невозможным. В связи с этим предполагается применение итерационного циклического подхода уже на данном этапе проектирования в следующей общей последовательности:
  - (а) предварительно определяются цели и задачи мониторинга<sup>2</sup>;
  - (б) в соответствии с целями и задачами производится изучение предметной области на предмет выделения в ней объектов/процессов, установления причинно-следственных связей между объектами и процессами, в результате чего строится/уточняется информационная модель данной предметной области (определяется терминология и формируется иерархическая структура объектов и процессов);
  - (в) производится анализ полученной информационной модели, на основе которого уточняются цели и задачи ИС (т. е. осуществляется переход вновь к пункту (а) и, при необходимости дальнейшего уточнения, к следующей итерации — пунктам (б) и (в)).

Аналогичный процесс выполняется и для подбора алгоритмов работы ИС, однако алгоритмы обычно носят более абстрактный характер, их методология достаточно хорошо проработана, поэтому фаза обращения к соответствующей предметной области в общем случае не нужна (поэтому этот цикл показан на рис. 2 одной двусторонней стрелкой).

2. После достаточно тщательной проработки проекта запускается процесс создания ИС (или модификации уже существующей). Этот процесс, показанный на рис. 2 толстыми сплошными стрелками, включает разработку технической документации, собственно программирование и развертывание ПО на аппаратных платформах, информационное наполнение ИС и сдачу ее в эксплуатацию.
3. Основным результатом функционирования мониторинговой ИС является периодическое создание информационных отчетов о состоянии предмета мониторинга (возможный управляющий функционал ИС в данной работе оставлен за рамками рассмотрения). Процесс создания отчетов обозначен на рис. 2 толстой штриховой стрелкой. Основой таких отчетов являются таблицы, которые могут дополняться графиками или текстовыми разъяснениями. Примером формы такого отчета могут служить статистические таблицы в сборниках Роскомстата.

---

<sup>1</sup>Здесь и далее под термином «формирование» понимается, что речь идет не только о создании (проекта, модели, ИС), но и о его непрерывной последующей модификации.

<sup>2</sup>Опирающиеся на достаточно очевидные представления о предмете мониторинга и управления.

4. На основе сформированных мониторинговых отчетов формируются вторичные отчеты — таблицы рассогласования, отражающие различия между запланированными и реальными значениями показателей предмета мониторинга (этот процесс показан на рис. 2 пунктирными стрелками). В общем случае причинами того, что некоторые из результатов (значений показателей) оказываются не достигнутыми, могут стать:

- неправильная постановка целей и задач управления;
- несовершенство системы управления;
- некорректный подход к оцениванию или мониторингу результатов.

Таким образом, на основе величины рассогласования может быть сделан вывод о качестве системы мониторинга, но при этом обязательно должно быть исключено влияние несовершенства постановки целей и задач, а также системы управления предметом мониторинга<sup>1</sup>. Процесс разделения величин рассогласования по представленным выше факторам и оценивание степени влияния каждого из них в настоящее время представляется трудно формализуемым, в связи с чем его основным инструментом представляется метод экспертного оценивания.

5. На основе анализа рассогласований вырабатываются корректирующие воздействия (показаны на рис. 2 штрихпунктирными стрелками), оказываемые, во-первых, на формулировку целей и задач ИС, а во-вторых, на дальнейшее уточнение информационной модели и алгоритмов мониторинга и оценивания (а также управления), с последующей реализацией всех этих изменений на аппаратно-программном уровне ИС.

Представленные блоки и процессы образуют «большой» цикл каскадно-циклического (итерационного) алгоритма формирования ИС, предназначенного для мониторинга и оценивания сложных предметных областей. Этот алгоритм был сформирован и в настоящее время практически используется в процессе разработки макетного образца системы мониторинга и оценивания в сфере НБРФ.

## 8 Заключение

Процесс информационного моделирования должен обеспечивать адекватность создаваемой модели целям и задачам ИС, экономическую целесообразность ее реализации, гибкость и масштабируемость модели и ИС в целом в условиях

<sup>1</sup>Образно говоря, можно представить следующую ситуацию: если некий водитель имеет целью ускорить движение своего автомобиля, но при этом давит на педаль тормоза, а мониторинг этого процесса осуществляется только по показаниям часов, то он может прийти к иллюзии, что процесс ускорения в принципе идет, хотя и не с ожидаемой динамикой (и усиливает давление на тормоз). Этот гротеск призван проиллюстрировать опасность формального отношения к процессу оценивания и исключительно неоднозначную взаимосвязь между перечисленными факторами программно-целевой деятельности.

меняющихся целей и задач функционирования. Для этого были рассмотрены традиционный цикл информационного моделирования и специфика моделей, на примере которых были проведены параллели между классами и особенностями моделей и решаемыми на их основе реальными практическими задачами. На этой основе намечены подходы к пониманию сущности и особенностей моделирования при проектировании ИС. Дальнейшее совершенствование информационного моделирования связано с развитием представлений о связях, структурах и задачах, которые могут быть решены на базе этих связей и структур.

В качестве эффективного и наиболее результативного способа преодоления проблемы неоднозначного понимания различных аспектов проектирования, которые оказывают существенное влияние на ход разработки и на функционирование собственно ИС, предлагается ввести в регламенты разработки модели предметной области и проектирования ИС раздел, посвященный вопросам согласования отдельных частей модели предметной области и проекта.

В работе также было показано, что при создании сложных ИС высокого уровня применение в чистом виде традиционных каскадных или циклических методов разработки затруднительно. Одной из причин этого является отсутствие или недостаточная разработанность соответствующих концептуальных схем и информационных моделей. С другой стороны, в условиях программно-целевого подхода к разработке и созданию подобных ИС, особенно при краткосрочном планировании, наиболее подходящим является каскадный подход, что не только снижает качество создаваемой ИС, но и прерывает жизненный цикл такой ИС. В связи с этим в статье рассмотрен алгоритм каскадно-циклического проектирования, призванный устранить перечисленные проблемы и обеспечить качество и жизнеспособность ИС в условиях краткосрочного планирования. Представленная схема позволяет понять роль и место каждого метода проектирования, а также целесообразность их применения и сочетания в различных условиях и обстоятельствах. Этот алгоритм нашел свое практическое применение в процессе разработки макетного образца системы мониторинга и оценивания в сфере НБРФ.

Таким образом, сформулированная цель исследования была достигнута, а поставленные задачи решены. Кроме того, в работе в схематичном виде представлен алгоритм каскадно-циклического проектирования сложных ИС, учитывающий когнитивные особенности этого вида деятельности.

## Литература

1. Лукьянов Г. В., Никишин Д. А. Когнитивные аспекты информационного моделирования при проектировании сложных информационных систем // Системы и средства информатики, 2016. Т. 26. № 2. С. 158–170.
2. Авдеева З. К., Коврига С. В., Макаренко Д. И., Максимов В. И. Когнитивный подход в управлении // Control Sciences, 2007. № 3. С. 2–8.

3. *Лукьянов Г. В., Никишин Д. А., Веревкин Г. Ф., Косарик В. В.* Нормативные и методологические аспекты организации информационного мониторинга национальной безопасности // Системы и средства информатики, 2015. Т. 25. № 3. С. 225–241.
4. *Axelrod R.* Schema theory: An information processing model of perception and cognition // Am. Political Sci. Rev., 1973. Vol. 67. No. 4. P. 1248–1266.
5. Structure of decision: The cognitive maps of political elites / Ed. R. Axelrod. — Princeton, NJ, USA: Princeton University Press, 1976. 404 p.
6. *Axelrod R., Hamilton W. D.* The evolution of cooperation // Science, 1981. Vol. 211. No. 4489. P. 1390–1396.
7. *Anderson J. R., Boyle C. F., Corbett A. T., Lewis M. W.* Cognitive modeling and intelligent tutoring // Artificial Intelligence, 1990. Vol. 42. No. 1. P. 7–49.
8. *Funge J., Tu X., Terzopoulos D.* Cognitive modeling: Knowledge, reasoning and planning for intelligent characters // 26th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques Proceedings. — ACM Press/Addison-Wesley, 1999. P. 29–38.
9. *Jakobson G., Buford J., Lewis L.* A framework of cognitive situation modeling and recognition // IEEE Military Communications Conference (MILCOM-2006). — IEEE, 2006. P. 1–7.
10. *Tsvetkov V. Ya.* The cognitive modeling with the use of spatial information // Eur. J. Technology Design, 2015. Vol. 10. Iss. 4. P. 149–158.
11. *Mizoguchi F., Nishiyama H., Iwasaki H.* A new approach to detecting distracted car drivers using eye-movement data // 13th IEEE Conference (International) on Cognitive Informatics and Cognitive Computing Proceedings. — London, U.K.: IEEE, 2014. P. 266–272.
12. Session 3(B): Artificial Intelligence (AI). 1st IEEE Conference (International) on Cognitive Informatics Proceedings. — Calgary, Alberta, Canada: IEEE, 2002. P. 295–328.
13. *Городецкий А. Я.* Информационные системы. Вероятностные модели и статистические решения. — СПб.: СПбГПУ, 2003. 326 с.
14. *Ипатова Э. Р.* Методологии и технологии системного проектирования информационных систем. — М.: ФЛИНТА, 2008. 256 с.
15. *Аверченков В. И.* Основы математического моделирования технических систем. — М.: ФЛИНТА, 2011. 271 с.
16. *Лядова Л. Н., Сухов А. О.* Визуальные языки и языковые инструментарии: методы и средства реализации // Тр. Конгресса по интеллектуальным системам и информационным технологиям AIS-IT, 2010. Т. 10. С. 374–382.
17. *Петеляк В. Е., Новикова Т. Б., Масленникова О. Е., Махмутова М. В., Агаджетова А. М.* Data flow diagramming: Особенности построения моделей описания управления потоками данных в организационных системах // Фундаментальные исследования, 2015. № 8. С. 323–327.
18. *Замятина Е. Б., Лядова Л. Н., Сухов А. О.* О подходе к интеграции систем моделирования и информационных систем на основе DSM-платформы MetaLanguage // New Voices Translation Studies, 2016. № 14. С. 46–73.
19. *Лукьянов Г. В., Никишин Д. А., Веревкин Г. Ф., Косарик В. В.* Специфика показателей национальной безопасности в контексте ее информационного мониторинга // Системы и средства информатики, 2014. Т. 24. № 4. С. 186–205.

20. Лукьяннов Г. В., Никишин Д. А., Веревкин Г. Ф., Косарик В. В. Проблема нормализации показателей информационного мониторинга национальной безопасности // Системы и средства информатики, 2015. Т. 25. № 4. С. 201–213.
21. Buddenberg R. Toward an interoperability reference model. 2006. <http://www.dtic.mil/cgi-bin/GetTRDoc?AD=ADA502999>.
22. Goldkuhl G. The challenges of interoperability in E-government: Towards a conceptual refinement // Pre-ICIS SIG eGovernment Workshop Proceedings, 2008. [https://www.researchgate.net/profile/Goeran\\_Goldkuhl/publication/228903679/The\\_challenges\\_of\\_Interoperability\\_in\\_E-government\\_Towards\\_a\\_conceptual\\_refinement/links/5592907908ae1e9cb4295340.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Goeran_Goldkuhl/publication/228903679/The_challenges_of_Interoperability_in_E-government_Towards_a_conceptual_refinement/links/5592907908ae1e9cb4295340.pdf).
23. Дулин С. К., Дулина Н. Г., Кожунова О. С. Когнитивная интероперабельность экспертной деятельности и ее приложение в геоинформатике // Тр. 13-й конф. по искусственному интеллекту. — Белгород: БГТУ, 2012. Т. 1. С. 351–357.
24. Грекул В. И., Денищенко Г. Н., Коровкина Н. Л. Проектирование информационных систем. — М.: БИНОМ, 2008. 304 с.
25. Кульга К. С. Модели и методы создания интегрированной информационной системы для автоматизации технической подготовки и управления авиационным производством // Известия Самарского научного центра РАН, 2012. Т. 14. № 4(2). С. 437–445.
26. Whitty S. J., Schulz M. F. THE\_PM\_BOK\_CODE // 20th IPMA World Congress on Project Management, 2006. Vol. 1. P. 466–472.
27. A guide to the project management body of knowledge (PMBOK guide). — 5th ed. — Project Management Institute, 2013. 589 p.
28. Замятин Е. Б., Лядова Л. Н., Сухов А. О. Интеграция систем моделирования на основе DSM-платформы с использованием онтологий // Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем (ОСТИС-2014): Мат-лы IV Междунар. научн.-технич. конф. — Минск: БГУИР, 2014. С. 375–380.

Поступила в редакцию 11.07.16

---

## APPLIED ASPECTS OF MODELING OF INFORMATION SYSTEMS

*G. V. Lukyanov and 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 article is devoted to applied aspects of information modeling in the design of information systems of complex subject areas. It provides a logic diagram of the information system design and substantial description of the basic design stages. The article presents the hybrid cascaded-round-Robin algorithm of formation of a monitoring (monitoring, command, and control) information system. This algorithm is designed to compensate for the shortcomings of the cascade and iterative paradigms of design and to ensure the quality and viability of an information system in terms of short-term planning.

**Keywords:** modeling of information systems; iterative development; waterfall development; conditional and unconditional links

**DOI:** 10.14357/08696527170110

## References

1. Luk'yanov, G. V., and D. A. Nikishin. 2015. Kognitivnye aspekty informatsionnogo modelirovaniya pri proektirovaniyu slozhnykh informatsionnykh sistem [Cognitive aspects of information modeling in the design of complex information systems]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 26(2):158–170.
2. Avdeeva, Z. K., S. V. Kovriga, D. I. Makarenko, and V. I. Maksimov. 2007. Kognitivnyy podkhod v upravlenii [Cognitive approach in management]. *Control Sciences* 3:2–8.
3. Luk'yanov, G. V., D. A. Nikishin, G. F. Verevkin, and V. V. Kosarik. 2015. Normativnye i metodologicheskie aspekty organizatsii informatsionnogo monitoringa natsional'noy bezopasnosti [Standard and methodological aspects of the organization of information monitoring of national security]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 25(3):225–241.
4. Axelrod, R. 1973. Schema theory: An information processing model of perception and cognition. *Am. Political Sci. Rev.*
5. Axelrod, R., ed. 1976. *Structure of decision: The cognitive maps of political elites*. Princeton, NJ: Princeton University Press. 404 p. 67(4):1248–1266.
6. Axelrod, R., and W. D. Hamilton. 1981. The evolution of cooperation. *Science* 211(4489):1390–1396.
7. Anderson, J. R., C. F. Boyle, A. T. Corbett, and M. W. Lewis. 1990. Cognitive modeling and intelligent tutoring. *Artificial Intelligence* 42(1):7–49.
8. Funge, J., X. Tu, and D. Terzopoulos. 1999. Cognitive modeling: Knowledge, reasoning and planning for intelligent characters. *26th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques Proceedings*. ACM Press / Addison-Wesley Publishing Co. 29–38.
9. Jakobson, G., J. Buford, and L. Lewis. 2006. A framework of cognitive situation modeling and recognition. *IEEE Military Communications Conference*. IEEE. 1–7.
10. Tsvetkov, V. Ya. 2015. The cognitive modeling with the use of spatial information. *Eur. J. Technology Design* 10(4):149–158.
11. Mizoguchi, F., H. Nishiyama, and H. Iwasaki. 2014. A new approach to detecting distracted car drivers using eye-movement data. *13th IEEE Conference (International) on Cognitive Informatics and Cognitive Computing Proceedings*. London, U.K.: IEEE. 266–272.
12. Session 3(B): Artificial Intelligence (AI). 2002. *First IEEE International Conference on Cognitive Informatics Proceedings*. Calgary, Alberta, Canada: IEEE. 295–328.
13. Gorodetskiy, A. Ya. 2003. *Informatsionnye sistemy. Veroyatnostnye modeli i statisticheskie resheniya* [Information systems. Probabilistic models and statistical decisions]. St. Petersburg: SPbGPU Publs. 326 p.
14. Ipatova, E. R. 2008. *Metodologii i tekhnologii sistemnogo proektirovaniya informatsionnykh sistem* [Methodology and technology of system design of information systems]. Moscow: FLINTA. 256 p.

15. Averchenkov, V. I. 2011. *Osnovy matematicheskogo modelirovaniya tekhnicheskikh sistem* [Foundations of mathematical modeling of technical systems]. Moscow: FLINTA. 271 p.
16. Lyadova, L. N., and A. O. Sukhov. 2010. *Vizual'nye yazyki i yazykovye instrumentarii: metody i sredstva realizatsii* [Visual languages and language tools: Methods and tools for implementation]. *Tr. Kongressa po intellektual'nym sistemam i informatsionnym tekhnologiyam AIS-IT* [Congress on Intelligent Systems and Information Technologies AIS-IT Proceedings]. 10:374–382.
17. Petelyak, V. E., T. B. Novikova, O. E. Maslennikova, M. V. Makhmutova, and A. M. Agdavletova. 2015. Data flow diagramming: Osobennosti postroeniya modeley opisaniya upravleniya potokami dannykh v organizatsionnykh sistemakh [Data flow diagramming: Features of building models for the description of data flow management in organizational systems]. *Fundamental'nye issledovaniya* [Fundamental Research] 8:323–327.
18. Zamyatina, E. B., L. N. Lyadova, and A. O. Sukhov. 2016. O podkhode k integratsii sistem modelirovaniya i informatsionnykh sistem na osnove DSM-platformy Meta-Language [On the approach to the integration of systems modeling and information systems on the basis of DSM-platform MetaLanguage]. *New Voices Translation Studies* 14:46–73.
19. Luk'yanov, G. V., D. A. Nikishin, G. F. Verevkin, and V. V. Kosarik. 2014. Spetsifikika pokazateley natsional'noy bezopasnosti v kontekste ee informatsionnogo monitoringa [Specificity of indicators of national security in the context of its information monitoring]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 24(4):186–205.
20. Luk'yanov, G. V., D. A. Nikishin, G. F. Verevkin, and V. V. Kosarik. 2015. Problema normalizatsii pokazateley informatsionnogo monitoringa natsional'noy bezopasnosti [Problem of normalization of indicators of information monitoring of national security]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 25(4):201–213.
21. Buddenberg, R. 2006. Toward an interoperability reference model. Available at: <http://www.dtic.mil/cgi-bin/GetTRDoc?AD=ADA502999> (accessed September 11, 2016).
22. Goldkuhl, G. 2008. The challenges of interoperability in E-government: Towards a conceptual refinement. *Pre-ICIS SIG eGovernment Workshop Proceedings*. Available at: [https://www.researchgate.net/profile/Goeran\\_Goldkuhl/publication/228903679\\_The\\_challenges\\_of\\_Interoperability\\_in\\_E-government\\_Towards\\_a\\_conceptual\\_refinement/links/5592907908ae1e9cb4295340.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Goeran_Goldkuhl/publication/228903679_The_challenges_of_Interoperability_in_E-government_Towards_a_conceptual_refinement/links/5592907908ae1e9cb4295340.pdf) (accessed September 11, 2016).
23. Dulin, S.K., N. G. Dulina, and O. S. Kozhunova. 2012. Kognitivnaya interoperabil'nost' ekspertnoy deyatel'nosti i ee prilozhenie v geoinformatike [Cognitive interoperability expert activity and its application in geoinformatics]. *Tr. 13-y konf. po iskustvennomu intellektu* [13th Conference on Artificially Intelligence Proceedings]. Belgorod: BFTU Publs. 1:351–357.
24. Grekul, V. I., G. N. Denishchenko, and N. L. Korovkina. 2008. *Proektirovaniye informatsionnykh sistem* [Design of information systems]. Moscow: Binom. 304 p.
25. Kul'ga, K. S. 2012. Modeli i metody sozdaniya integrirovannoy informatsionnoy sistemy dlya avtomatizatsii tekhnicheskoy podgotovki i upravleniya aviatsionnym proizvodstvom [Models and methods of creation of integrated information system for automation of technical training and control of aviation production]. *Izv. Samarskogo nauchnogo tsentra RAN* [Izv. Samara Scientific Center of RAS] 14(2):437–445.

26. Whitty, S. J., and M. F. Schulz. 2006. THE\_PM\_BOK\_CODE. *20th IPMA World Congress on Project Management*. 1:466–472.
27. Project Management Institute. 2013. *A guide to the project management body of knowledge (PMBOK guide)*. 5th ed. 589 p.
28. Zamyatina, E. B., L. N. Lyadova, and A. O. Sukhov. 2014. Integratsiya sistem modelirovaniya na osnove DSM-platformy s ispol'zovaniem ontologiy [Integration of modeling systems on the basis of DSM-platform with ontologies]. *Conference (International) "Open Semantic Technologies for Intelligent Systems" Proceedings*. Minsk: BGUIR. 375–380.

*Received July 11, 2016*

## Contributors

**Lukyanov Gennady V.** (b. 1952)— Candidate of Military Science (PhD), associate professor, leading scientist, Institute of Informatics Problems, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation; gena-mslu@mail.ru

**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

## ОБЛАЧНЫЙ СЕРВИС РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ХИМИЧЕСКОЙ КИНЕТИКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ

*М. В. Сахибгареева<sup>1</sup>, Е. И. Глушенко<sup>2</sup>, Л. В. Еникеева<sup>3</sup>, Г. М. Шарипова<sup>4</sup>*

**Аннотация:** Рассматривается применение облачных вычислений к задачам химической кинетики. Разрабатываемый облачный SaaS-сервис позволяет осуществлять удаленный доступ к универсальным инструментам для комплексного исследования кинетики и механизмов сложных химических реакций, автоматизировать процесс математического моделирования, начиная от этапа подготовки механизмов реакций, формирования и хранения экспериментальных и литературных данных и до дальнейшего решения задач построения кинетических моделей многостадийных химических процессов. Решение обратных задач физической химии, а также анализ чувствительности и неопределенности предполагают значительный объем вычислений, поэтому актуальным является использование технологий параллельных вычислений. Описана архитектура облачного сервиса, а также представлен результат применения комплексного подхода к моделированию реакции ингибиционного окисления н-декана с представлением эффективности распараллеливания ряда расчетов.

**Ключевые слова:** математическая химия; облачные вычисления; кинетика реакций; обработка экспериментальных данных; механизмы реакций; параллельные вычисления; обратные задачи; SaaS

**DOI:** 10.14357/08696527170111

### 1 Введение

В различных организациях физико-химической направленности существует острая потребность в доступном программном обеспечении, позволяющем осуществлять математическое моделирование химических процессов. Наряду с этим велика потребность в обеспечении совместной работы коллективов исследователей, зачастую из различных городов, перед которыми возникает задача не только непосредственного моделирования, но и накопления и передачи знаний, подготовки демонстрационных материалов. Такие возможности сочетают

<sup>1</sup>Проектная группа «Galo GO»; ООО «РН-УфаНИПИнефть», margarita.vl2011@gmail.com

<sup>2</sup>Проектная группа «Galo GO»; ООО «РН-УфаНИПИнефть», yolkate@gmail.com

<sup>3</sup>Проектная группа «Galo GO»; Институт нефтехимии и катализа Российской академии наук, leniza.enikeeva@gmail.com

<sup>4</sup>Проектная группа «Galo GO»; Башкирский государственный университет, gulnaz-sharipova@list.ru

в себе интерактивные веб-приложения, работающие в сети Интернет. Современные веб-приложения представляют собой модель облачных вычислений SaaS (Software-as-a-Service — программное обеспечение как услуга). Анализ облачных сервисов показал, что данная технология успела по большей части распространиться на образовательную сферу, нежели на узкоспециализированные исследовательские направления.

Целью проекта является разработка облачного сервиса для обеспечения сетевого доступа к расширенным и универсальным инструментам для математического моделирования различных многостадийных химических реакций, создание новых и развитие уже разработанных авторами инструментов и методов для повышения универсальности программного обеспечения и возможности использовать его для моделирования более широкого класса химических реакций.

## **2 Комплексный подход к исследованию механизмов**

Одним из основных путей изучения механизмов химических реакций является кинетический подход. Пропедура исследования механизма после проведения ряда экспериментов включает три основных этапа: (1) сбор информации, включая предполагаемые кинетические схемы процесса; (2) кинетико-математический анализ при обработке экспериментальных данных, включая проведение вычислительных экспериментов; (3) оптимизация условий проведения реакций с целью увеличения выхода продукта. Проблематика исследования кинетики химических реакций включает в себя три важные составляющие — химический, математический и вычислительный аспекты.

Химический аспект заключается в трудностях экспериментального определения концентраций промежуточных продуктов, в связи с чем получение экспериментальным путем полной кинетической картины реакции, описывающей поведение всех участников, становится сложной задачей.

Математический аспект заключается как в трудностях решения прямой задачи химической кинетики, которая осложняется возникновением жесткости систем дифференциальных уравнений (ДУ), так в многоэкстремальности и неоднозначности решений обратных задач химической кинетики при построении кинетических моделей реакции.

Вычислительный аспект заключается в высокой размерности задач химической кинетики, обусловленной большим числом элементарных стадий большинства промышленно-значимых реакций, а также в значительном объеме вычислений, необходимых для построения кинетических моделей.

Описанные выше этапы кинетико-математического подхода привели к идеи структурировать вычислительный блок будущего облачного SaaS-сервиса в виде набора инструментов для комплексного пошагового исследования химических реакций.

## Этап 1: сбор информации и составление предполагаемых механизмов реакций

Значительный объем информации о реакциях предполагает использование организованной структуры хранения данных. На данном этапе пользователю будет предложен графический веб-интерфейс, связанный с базой данных, для ввода и хранения вещества реакции, экспериментальных данных, предполагаемых схем механизмов, дополнительной информации о реакциях (например, периода индукции, скорости инициирования, средних скоростей преобразования веществ, продуктов и др.). Разработанная структура базы данных предполагает возможность динамического расширения учитываемых параметров реакции, методов решения различных типов задач путем хранения их в виде справочников.

## Этап 2: построение кинетических моделей

Перед описанием методов построения кинетических моделей реакций целесообразно ввести понятие прямой задачи химической кинетики.

Прямая кинетическая задача — это задача расчета состава реагирующей смеси по заданной кинетической модели. Математическое описание прямой задачи для изотермической нестационарной модели без изменения объема в закрытой системе на основе закона действующих масс состоит из системы обыкновенных нелинейных ДУ и начальных концентраций веществ. Таким образом, оно представляет собой задачу Коши:

$$\frac{dx_i}{dt} = \sum_{j=1}^N S_{ij} w_j, \quad i = 1, \dots, M, \quad w_j = k_{(j)} \prod_{i=1}^M (x_i)^{|\alpha_{ij}|} - k_{(-j)} \prod_{i=1}^M (x_i)^{|\beta_{ij}|}; \quad (1)$$

$$x_i(0) = x_i^0, \quad (2)$$

где  $M$  — число веществ;  $S_{ij}$  — элементы стехиометрической матрицы;  $w_j$  — приведенная к одноразмерной величине скорость  $j$ -й стадии,  $1/\text{с}$ ;  $\alpha_{ij}$  — отрицательные элементы  $S_{ij}$ ;  $\beta_{ij}$  — положительные элементы  $S_{ij}$ ;  $x_i^0$  — экспериментальные начальные концентрации исходных веществ;  $k_{(j)}$ ,  $k_{(-j)}$  — заданные приведенные константы скоростей прямой и обратной  $j$ -й элементарной стадии соответственно,  $1/\text{с}$ ;  $j$  и  $-j$  — индекс прямой и обратной элементарной стадии.

Для систем ДУ, описывающих кинетику химических реакций, характерно наличие быстро и медленно меняющихся переменных, так как стадии реакций протекают с различными скоростями. При решении обратных задач возникают ситуации, когда константы скоростей реакции принимают значения, отличные друг от друга на несколько порядков, что приводит к жесткости системы обыкновенных ДУ (ОДУ) (1). Для интегрирования систем средней жесткости неплохо зарекомендовал себя полуявный метод Мишельсена [1]. Облачный сервис будет предоставлять и другие методы интегрирования, в частности неявный метод Адамса и полуявный метод Розенброка. Список методов будет пополняться.

### *Шаг 1. Анализ чувствительности*

Одной из главных проблем идентификации механизмов многостадийных химических реакций является большая размерность задачи по искомым кинетическим параметрам. В связи с этим для уменьшения размерности задачи поиска кинетических параметров весьма полезным может быть анализ чувствительности кинетических параметров. Анализ чувствительности исследует связь между входными и выходными данными модели. Применительно к химической кинетике задачу анализа чувствительности можно сформулировать следующим образом: насколько вариация величин тех или иных кинетических параметров скажется на поведении расчетных кинетических кривых.

В ситуациях, когда предположительно известны величины кинетических параметров, например из различных литературных источников, полезным может быть проведение локального анализа. Существуют различные критерии анализа чувствительности [2], в частности критерий относительных изменений концентраций при относительном изменении констант скоростей, опробованный в работе [3]:

$$s_{ij} = \frac{x_i(k_1, \dots, k_j + \Delta, \dots, k_N) - x_i(k)}{\Delta} \frac{k_j}{x_i(k)},$$

где  $s_{ij}$  — критерий чувствительности;  $x_i$  —  $i$ -е решение задачи (1)–(2);  $k$  — вектор кинетических параметров, в частности констант скоростей прямых и обратных элементарных стадий ( $k_1, \dots, k_j, \dots, k_N$ );  $N$  — размерность системы (суммарное число прямых и обратных стадий механизма реакции);  $k_j$  — варьируемый кинетический параметр.

В мировой практике существуют глобальные методы, которые используются для исследования всего пространства параметров или по крайней мере для исследования подпространства, которое по предположению содержит реальные значения параметров.

В случае когда результат анализа показывает слабую чувствительность изменения концентраций наблюдаемых веществ к изменению кинетического параметра  $i$ -й стадии, данную стадию можно исключить из шага 2 — задачи определения кинетических параметров, тем самым уменьшив ее размерность. Более того, в случае, когда есть уверенность в кинетической схеме механизма, анализ чувствительности целесообразно проводить на этапе планирования эксперимента.

### *Шаг 2. Определение кинетических параметров*

Задачи построения кинетических моделей сводятся к отысканию констант скоростей в правых частях системы ДУ (1) и получили название обратных задач химической кинетики. Таким образом, в широком смысле слова это задачи идентификации механизма реакции. Если целью решения является отыскание констант, наилучшим образом описывающих эксперимент, то математически обратная задача химической кинетики сводится к минимизации некоторого

функционала, являющегося количественной оценкой расхождения экспериментальных данных и расчетов и включающего параметры модели. Так, для ряда экспериментов, проведенных при одной температуре, в качестве такого функционала может выступать среднее между суммами отклонений экспериментальных точек от расчетных по всем наблюдаемым веществам, рассчитанных для каждого эксперимента:

$$\varphi(y) = \frac{1}{P} \sum_{k=1}^P \sum_{i=1}^{n_P} \sum_{l=1}^{H_P} |x_{kil}^{\text{расч}}(y) - x_{kil}^{\text{эксп}}| \rightarrow \min; \quad (3)$$

$$y = (k_{(j)}, k_{(-j)}) , \quad j = 1, \dots, N, \quad (4)$$

где  $y$  — вектор минимизируемых констант скоростей стадий;  $P$  — число экспериментов;  $H_P$  — число наблюдавшихся вещества  $p$ ;  $n_P$  — число точек эксперимента  $p$ ;  $N$  — число стадий реакций;  $k_{(j)}$  и  $k_{(-j)}$  — приведенные константы скоростей прямой и обратной  $j$ -й элементарной стадии соответственно,  $1/\text{с}$ ;  $j$  и  $-j$  — индексы прямой и обратной элементарной стадии;  $x_{kil}^{\text{эксп}}$  — экспериментально полученные значения концентраций наблюдавшихся веществ, мольные доли;  $x_{kil}^{\text{расч}}$  — расчетные значения концентраций наблюдавшихся веществ, получаемые в результате решения прямой кинетической задачи (1)–(2) на векторе кинетических констант  $(k_{(j)}, k_{(-j)})$ , мольные доли.

Если имеется ряд экспериментов, проведенных при различных температурах, то в качестве вектора параметров  $y$  в (3) следует использовать энергии активации  $E_a$  и предэкспоненциальные множители  $A$  прямой Аррениуса:

$$\ln(k) = \ln(A) - \frac{-E_a}{R} \frac{1}{T}. \quad (5)$$

Таким образом, вектор искомых параметров будет выглядеть следующим образом:

$$y = (E_{a(j)}, E_{a(-j)}, A_{(j)}, A_{(-j)}) , \quad j = 1, \dots, N.$$

В работах [4–7] для решения обратных задач химической кинетики авторы используют различные методы глобальной оптимизации, в частности индексный метод условной глобальной оптимизации, генетический алгоритм, а также метод роя частиц, относящийся к классу поведенческих методов.

#### *Учет дополнительной информации*

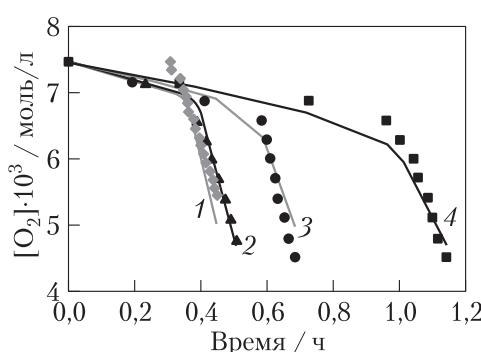
При построении кинетической модели вся имеющаяся априорная информация должна быть по возможности учтена в задаче. Сюда могут относиться представления о механизме процесса (цепной, радикальный и др.), измерения отличных от концентраций веществ величин. Новым подходом к учету дополнительных условий в задачах многоэкстремальной оптимизации, в частности обратных задач химической кинетики, является использование модели функций ограничений

и построение вспомогательных задач. Фундаментальные результаты в этом направлении были получены Нижегородской школой глобальной оптимизации, разработавшей под руководством Р. Г. Стронгина индексный метод условной глобальной оптимизации.

В общем виде задачу условной глобальной минимизации можно сформулировать следующим образом. Пусть  $\varphi(y), g_j(y) \leq 0, 1 \leq j \leq m$ , есть действительные функции, определенные на множестве  $D$   $N$ -мерного евклидового пространства  $R^N$ , и пусть точка  $y^*$  удовлетворяет условию:

$$\varphi_j(y)^* = \min \left\{ \begin{array}{l} \varphi_j(y) : y \in D, \\ g_j(y) \leq 0, 1 \leq j \leq m \end{array} \right\}. \quad (6)$$

Точка  $y^*$  из (6) обычно называется глобально-оптимальным решением. Функцию  $\varphi(y)$  называют целевой функцией, а функции  $g_j(y) \leq 0, 1 \leq j \leq m$ , — ограничениями задачи. Область  $D$  называют областью поиска и обычно описывают как некоторый гиперинтервал из  $N$ -мерного евклидового пространства.



**Рис. 1** Результат моделирования реакции ингибионного окисления н-декана. Кинетические кривые расходования кислорода при окислении н-декана в присутствии ПОДА (1) и ПОДА + спирт: 2 — [спирт] = 0,1 моль/л; 3 — 0,5; 4 — [спирт] = 1,0 моль/л. Значки — экспериментальные данные; кривые — расчет

Характерной чертой индексной схемы является раздельный учет каждого из ограничений задачи  $g_j(y(x))$  без использования широко распространенных штрафных функций. Данная схема допускает частичную вычислимость функционала задачи (6), в частности (3)–(5), что позволяет ускорить расчет.

Эффективность применения индексной схемы и постановки обратной задачи химической кинетики в виде задачи условной глобальной оптимизации была показана в работах [3, 6], в результате которой было достигнуто хорошее описание экспериментальных данных для реакции ингибионного окисления н-декана (рис. 1).

### Шаг 3. Анализ неопределенности моделей

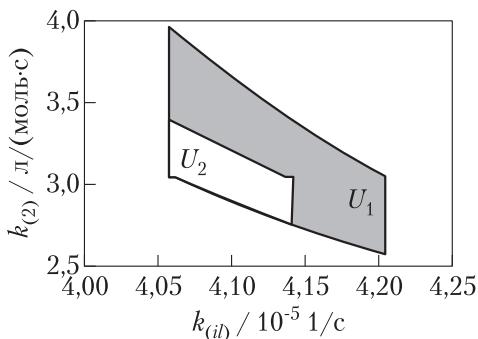
Новым словом в теории математической обработки эксперимента вместо задачи минимизации стала постановка задачи определения интервалов параметров математического описания при условии удовлетворения системы ограничениям на предельно-допустимую погрешность экспериментальных измерений [8]. Применительно к химической кинетике такая задача имеет следующий вид:

$$\sum_{i=1}^{n_P} |x_{il}^{\text{расч}} - x_{il}^{\text{эксп}}| \leq \varepsilon_l, \quad l = \overline{1, H_P},$$

где  $H_P$  — число наблюдаемых веществ эксперимента  $P$ ;  $n_P$  — число замеров каждой из компонент, число экспериментальных точек;  $\varepsilon_l$  — предельно допустимая погрешность измерений  $l$ -го компонента (например, если температура измеряется термометром с точностью  $\pm 0,5^\circ\text{C}$ , то  $\varepsilon = 0,5$ ).

Информация о величине предельно допустимой погрешности, как правило, присутствует у экспериментатора. Такой подход получил название метода неопределенных интервалов.

Авторами был усовершенствован данный подход путем учета экспертной информации о химических процессах. Его применение к исследованию различных химических систем позволит уменьшить неоднозначность обратных задач химической кинетики. Так, для реакции ингибиированного окисления н-декана учет периода индукции расходования кислорода позволил значительно уменьшить области неопределенности кинетических параметров (рис. 2) [3].



**Рис. 2** Пример уменьшения областей неопределенности при учете дополнительной информации

Так, для реакции ингибиированного окисления н-декана учет периода индукции расходования кислорода позволил значительно уменьшить области неопределенности кинетических параметров (рис. 2) [3].

### 3 Анализ эффективности параллельных вычислений на примере моделирования реакции окисления н-декана в присутствии ингибирующей композиции

Решение обратных задач физической химии, а также анализ чувствительности и неопределенности предполагают значительный объем вычислений, который по современным требованиям должен осуществляться за ограниченное и приемлемое время с достаточно высокой точностью. Для задач математического моделирования кинетики и механизмов химических реакций актуальным является использование технологий параллельных вычислений.

Разработанные подходы с использованием параллельных вычислений были применены для моделирования реакций: окисления 1,4-диоксана, ингибиированного добавками 5-амино-6-метилурацила; реакции взаимодействия кетонной и енольной форм урацила с пероксидом водорода; окисления н-декана в присутствии ингибирующей композиции; низкотемпературной паровой конверсии пропана в присутствии метана на никелевом катализаторе.

Время решения обратной задачи на кластере ННГУ

Число ядер	Время, мин	Ускорение	Эффективность, %
1	1005	—	—
2	765	1,31	65,5
4	346	2,9	72,5
8	229	4,39	54,9
12	146	6,9	57,5
16	200	5,02	31,4
20	101	9,95	49,8
30	96	10,42	34,7
40	79	12,74	31,9
50	121	8,32	16,6
60	48	20,78	34,6
70	58	17,27	24,7
80	33	30,35	37,9
90	35	28,9	32,1

Описание данных химических реакций и результаты их моделирования занимают большой объем. Однако в работе [6] авторами проанализирована эффективность применения параллельных вычислений. В таблице показана эффективность использования вычислительных ресурсов на примере задачи условной глобальной минимизации при моделировании окисления н-декана в присутствии ингибирующей композиции параоксидифениламина (ПОДА) и н-децилового спирта.

#### 4 Архитектура SaaS-приложения

Архитектура веб-сервиса состоит из нескольких блоков (рис. 3) [9].

Пользователь вводит данные о химическом процессе через веб-браузер («тонкий клиент»), который отправляет запросы на веб-сервер (под управлением

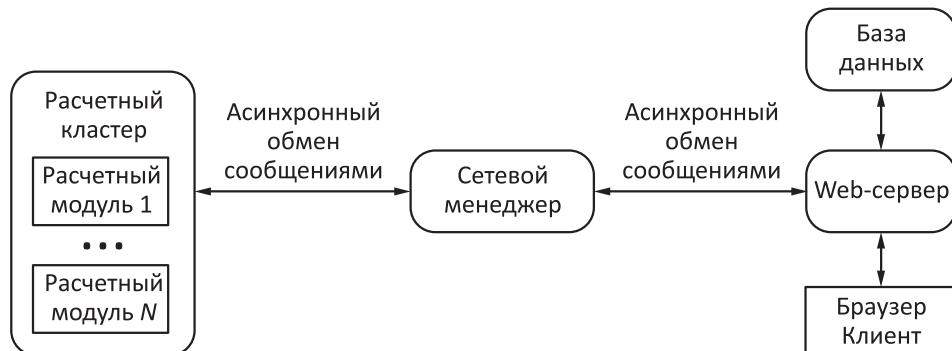


Рис. 3 Архитектура приложения

Apache). На веб-сервере установлено приложение, написанное на Python (Django), которое отвечает за обработку пользовательских данных.

Данные хранятся в базе MySQL.

Непосредственные вычисления математических задач происходят на удаленных НРС-кластерах. Расчетные библиотеки (C++, MPI) располагаются в приватных директориях кластера и непосредственно не доступны пользователям.

Веб-приложение будет осуществлять запуск расчетных задач с помощью асинхронного менеджера (Celery). Веб-приложение передает менеджеру необходимые данные для запуска расчета. Менеджер выполняет следующие работы: постановку задач в локальную очередь на стороне веб-сервера, определение свободного кластера, отправку данных и запуск задачи на кластере, проверку и получение ответа о состоянии задачи на кластере, забор данных о задаче и передачу их веб-приложению. Менеджер работает с кластерами по протоколу SSH.

## 5 Заключение

Разрабатываемое облачное приложение в едином сервисе будет содержать инструменты для комплексного подхода к построению математических моделей сложных химических реакций. Для доступа к полному функционалу программы достаточно будет получить логин и пароль для входа в SaaS-систему через сайт [www.galo-go.ru](http://www.galo-go.ru). SaaS-концепция позволит химику сосредоточиться исключительно на предмете исследования — химической реакции, не задумываясь о настройке программного обеспечения и его обновлениях. Планируется разработка модулей для формирования графиков и отчетов, расширение вычислительного аппарата, в частности: разработка методов локальных и глобальных анализов чувствительности [2] и неопределенности кинетических параметров; внедрение методов анализа жесткости систем ОДУ [10]; увеличение числа неявных методов для интегрирования жестких систем ОДУ.

## Литература

1. Тихонова М. В., Губайдуллин И. М., Спивак С. И. Численное решение прямой кинетической задачи методами Розенброка и Мишельсена для жестких систем дифференциальных уравнений // Ж. Средневолжского математического общества, 2010. Т. 12. № 2. С. 26–33.
2. Degasperi A., Gilmore S. Sensitivity analysis of stochastic models of bistable biochemical reactions // Formal methods for computational systems biology / Eds. M. Bernardo, P. Degano, G. Zavattaro. — Lecture notes in computer science ser. — Springer, 2008. Vol. 5016. P. 1–20.
3. Tikhonova M. V., Garifullina G. G., Gerchikov A. Ya., Spivak S. I. The kinetic model of n-decane oxidation in the presence of inhibitory composition // Int. J. Chem. Kin., 2014. Vol. 46. No. 4. P. 220–230.

4. Губайдуллин И. М., Рябов В. В., Тихонова М. В. Application of the global optimization index method to solving inverse problems of chemical kinetics // Numerical Methods Programming Advanced Computing, 2011. Vol. 12. P. 137–145.
5. Губайдуллин И. М., Тихонова М. В., Карпенко А. П., Селиверстов Е. Ю., Панкратьев Е. Ю. Макроскопическое исследование реакции циклоалюминирования олефинов // Научный сервис в сети Интернет: поиск новых решений: Тр. Междунар. суперкомпьютерной конф. — М.: МГУ, 2012. С. 177–184.
6. Тихонова М. В., Рябов В. В., Спивак С. И., Губайдуллин И. М. Параллельная условная глобальная оптимизация при математическом моделировании кинетики химических реакций // Вычислительные методы и программирование, 2013. № 14. С. 262–268.
7. Gubaydullin I., Koledina K., Sayfullina L. Mathematical modeling of induction period of the olefins hydroalumination reaction by diisobutylaluminumchloride catalyzed with Cp<sub>2</sub>ZrCl<sub>2</sub> // Eng. J., 2014. Vol. 18. No. 1. P. 13–24.
8. Канторович Л. В. О некоторых новых подходах к вычислительным методам и обработке наблюдений // Сиб. мат. ж., 1962. Т. 3. № 5. С. 701–709.
9. Сахигареева М. В., Спивак С. И., Губайдуллин И. М. «ChemKinOptima» для комплексного математического моделирования и оптимизации кинетики многостадийных химических процессов. Свидетельство о государственной регистрации электронного ресурса № 2015662060 от 16.11.2015.
10. Юмагужин А. Д., Ахметов И. В., Губайдуллин И. М. Исследование жесткости реакции получения метилового эфира 5-ацетил-2-пирролкарбоновой кислоты // Обозрение прикладной и промышленной математики, 2010. Т. 17. № 5. С. 1017–1018.

Поступила в редакцию 06.08.16

---

## CLOUD SERVICE FOR SOLVING CHEMICAL KINETICS PROBLEMS USING PARALLEL COMPUTING

*M. V. Sakhigareeva<sup>1,2</sup>, E. I. Glushchenko<sup>1,2</sup>, L. V. Enikeeva<sup>1,3</sup>,  
and G. M. Sharipova<sup>1,4</sup>*

<sup>1</sup>Project Group “Galo GO,” 32 Validy Str., Ufa 450076, Russian Federation

<sup>2</sup>LLC “RN-UfaNIPIneft,” 3-1 Bekhterev Str., Ufa 450103, Russian Federation

<sup>3</sup>Institute of Petrochemistry and Catalysis of the Russian Academy of Sciences,  
141 Oktyabr Ave., Ufa 450075, Russian Federation

<sup>4</sup>Bashkir State University, 32 Validy Str., Ufa 450076, Russian Federation

**Abstract:** This work considers an application of cloud computing solving chemical kinetics problems. The designed SaaS (Software-as-a-Service) cloud service makes it possible to provide remote access to universal tools used to study kinetics and mechanisms of complex chemical reactions; to automate the mathematical modeling process, starting from the stage of reaction mechanisms

preparation; to form and store experimental and reported data; and to solve kinetic problems of construction of multistage chemical processes. Solving inverse problems of physical chemistry, as well as sensitivity and uncertainty analysis, requires a considerable amount of computation; so, the use of parallel computing technologies is required. The article describes the architecture of a cloud service and shows the results of an integrated approach to modeling the inhibitory oxidation reaction of *n*-decane with the representation of effectiveness of parallelization calculation series.

**Keywords:** mathematical chemistry; cloud computing; reaction kinetics; processing experimental data; reaction mechanisms; parallel processing; inverse problems; SaaS

**DOI:** 10.14357/08696527170111

## References

1. Tikhonova, M. V., I. M. Gubaydullin, and S. I. Spivak. 2010. Chislennoe reshenie pryamoy kineticheskoy zadachi metodami Rozenbroka i Mishel'sena dlya zhestkikh sistem differentsial'nykh uravneniy [Numerical solution of the direct kinetic problem by Rosenbrock and Mishelsen methods for stiff systems of differential equations]. *Zh. Srednevolzhskogo matematicheskogo obshchestva* [J. Mid-Volga Math. Soc.] 12(2):26–33.
2. Degaspero, A., and S. Gilmore. 2008. Sensitivity analysis of stochastic models of bistable biochemical reactions. *Formal methods for computational systems biology*. Eds. M. Bernardo, P. Degano, and G. Zavattaro. Lecture notes in computer science ser. Springer. 5016:1–20.
3. Tikhonova, M. V., G. G. Garifullina, A. Ya. Gerchikov, and S. I. Spivak. 2014. The kinetic model of *n*-decane oxidation in the presence of inhibitory composition. *Int. J. Chem. Kin.* 46(4):220–230.
4. Gubaibullin, I. M., V. V. Ryabov, and M. V. Tikhonova. 2011. Application of the global optimization index method to solving inverse problems of chemical kinetics. *Numerical Methods Programming Advanced Computing* 12:137–145.
5. Gubaydullin, I. M., M. V. Tikhonova, A. P. Karpenko, E. Yu. Seliverstov, and E. Yu. Pankrat'ev. 2012. Makroskopicheskoe issledovanie reaktsii tsikloalyuminirovaniya olefinov [Macroscopic examination of the reaction of olefins cycloalumination]. *Conference (International) “Scientific Service on the Internet: Search for New Solutions” Proceedings*. Moscow. 177–184.
6. Tikhonova, M. V., V. V. Ryabov, S. I. Spivak, and I. M. Gubaydullin. 2013. Parallel'naya uslovnaya global'naya optimizatsiya pri matematicheskem modelirovaniyu kinetiki khimicheskikh reaktsiy [Parallel conditional global optimization in mathematical modeling of the kinetics of chemical reactions]. *Vychislitel'nye metody i programmirovaniye* [Numerical Methods and Programming] 14:262–268.
7. Gubaydullin, I., K. Koledina, and L. Sayfullina. 2014. Mathematical modeling of induction period of the olefins hydroalumination reaction by diisobutylaluminiumchloride catalyzed with Cp<sub>2</sub>ZrCl<sub>2</sub>. *Eng. J.* 18(1):13–24.
8. Kantorovich, L. V. 1962. O nekotorykh novykh podkhodakh k vychislitel'nym metodam i obrabotke nablyudeniy [Some new approaches to computational methods and processing of observations]. *Sib. mat. zh.* [Siberian Math. J.] 3(5):701–709.

9. Sakhigareeva, M. V., S. I. Spivak, and I. M. Gubaydullin. 2015. "ChemKinOptima" dlya kompleksnogo matematicheskogo modelirovaniya i optimizatsii kinetiki mnogostadiynykh khimicheskikh protsessov ["ChemKinOptima" for complex mathematical modeling and optimization of the kinetics of multistage chemical processes]. Rospatent No. 2015662060.
10. Yumaguzhin, A. D., I. V. Akhmetov, and I. M. Gubaydullin. 2010. Issledovanie zhestkosti reaktsii polucheniya metilovogo efira 5-atsetil-2-pirrolkarbonovoy kisloty [Stiffness study of producing methyl 5-acetyl-2-pyrrolecarboxylic acid reaction]. *Obozrenie prikladnoy i promyshlennoy matematiki* [Review Applied Industrial Mathematics] 17(5):1017–1018.

Received August 6, 2016

## Contributors

**Sakhigareeva Margarita V.** (b. 1988) — Candidate of Science (PhD) in physics and mathematics, Head of the Project Group "Galo GO," Bashkir State University, 32 Validy Str., Ufa 450076, Russian Federation; principal specialist, LLC "RN-UfaNIPIneft," 3-1 Bekhterev Str., Ufa 450103, Russian Federation; margarita.vl2011@gmail.com

**Glushchenko Ekaterina I.** (b. 1983) — member of the Project Group "Galo GO," Bashkir State University, 32 Validy Str., Ufa 450076, Russian Federation; leading specialist, LLC "RN-UfanIPIneft," 3-1 Bekhterev Str., Ufa 450103, Russian Federation; yoktate@gmail.com

**Enikeeva Leniza V.** (b. 1988) — member of the Project Group "Galo GO," Bashkir State University, 32 Validy Str., Ufa 450076, Russian Federation; PhD student, Institute of Petrochemistry and Catalysis, Russian Academy of Sciences, 141 Oktyabr Ave., Ufa 450075, Russian Federation; leniza.enikeeva@gmail.com

**Sharipova Gulnaz M.** (b. 1990) — member of the Project Group "Galo GO," Bashkir State University, 32 Validy Str., Ufa 450076, Russian Federation; PhD student, Bashkir State University, 32 Validy Str., Ufa 450076, Russian Federation; gulnaz-sharipova@list.ru

## ИНФОРМАТИКА: ПРЕДМЕТ И ОБЛАСТИ ИССЛЕДОВАНИЙ

*В. Д. Ильин<sup>1</sup>*

**Аннотация:** Представлена точка зрения автора на предмет информатики и области исследований, актуальные на современном этапе (2017–2020 гг.). Информатика рассматривается как наука об извлечении информации из сообщений, создании информационных ресурсов, программировании поведения машин и о других сущностях, связанных с построением и применением человеко-машинной среды решения задач моделирования, проектирования, взаимодействия, обучения и др. Научная продукция информатики рассматривается как методологическое обеспечение построения человеко-машинной среды решения задач в различных областях деятельности. Предложены определения ключевых понятий информатики (сообщение, данные, информация, модель системы понятий и др.). Определены актуальные на современном этапе области исследований (автоматизация вычислений; программирование; человеко-машинная среда решения задач (*s*-среда); восприятие и представление сообщений, взаимодействие в *s*-среде; информационные ресурсы и системы для решения задач в *s*-среде; информационная безопасность и криптография и др.).

**Ключевые слова:** информатика; информация; информационные ресурсы; система знаний; человеко-машинная среда решения задач; автоматизация вычислений; программирование; информационное взаимодействие; искусственный интеллект

**DOI:** 10.14357/08696527170112

### 1 Введение

Результаты исследований сущностей (в науке называемых объектами) представлены символыми и/или физическими моделями. Символьные модели — это описания добывших знаний, а физические — прототипы изучаемых объектов, отражающие их свойства, поведение и др.

Научный результат — модель системы знаний (или составляющая ранее определенной и опубликованной модели), описывающая совокупность объектов, включающую изучаемый объект, и связи между ними.

Каждому этапу развития информатики соответствуют представления о предмете науки, актуальных областях исследований и значимости научных результатов. Такие представления зависят от выбранной точки зрения и потому не могут быть безальтернативными.

---

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

## 1.1 Совершенствование методов и средств автоматизации построения информационных ресурсов и решения задач из различных областей деятельности

С ростом доступности ЭВМ для пользователей из различных областей деятельности, начавшимся в 1970-х гг., наблюдается убывание доли математических задач, решаемых с помощью ЭВМ (изначально созданных как средства автоматизации математических вычислений), и рост доли нематематических задач (коммуникационных, поисковых и др.).

Когда во второй половине 1960-х гг. стали производиться компьютерные терминалы с экранами, начались разработки программ экранных редакторов, предназначенных для ввода, сохранения и коррекции текста с отображением его на полном экране (одним из первых экранных редакторов стал О26, созданный в 1967 г. для операторов консоли компьютеров серии CDC 6000; в 1970 г. был разработан vi — стандартный экранный редактор для ОС Unix (Unix) и Линукс (Linux)). Применение экранных редакторов не только увеличило производительность труда программистов, но и создало предпосылки для существенных перемен в инструментарии автоматизированного построения визуальных, аудио- и других символьных моделей произвольных объектов. Использование экранных редакторов для формирования текстов различного назначения (научных статей и книг, учебных пособий и др.) уже в 1970-е гг. позволило значительно увеличить производительность создания текстовых информационных ресурсов.

В июне 1975 г. американский исследователь Аллан Кей (создатель языка объектно-ориентированного программирования Смолток (Smalltalk) и один из авторов идеи персонального компьютера) в статье «Personal Computing (Персональные вычисления)» написал: «Представьте себя обладателем автономной машины знаний в портативном корпусе, имеющем размер и форму обычного блокнота. Как бы Вы стали использовать ее, если бы ее сенсоры превосходили Ваше зрение и слух, а память позволяла хранить и извлекать при необходимости тысячи страниц справочных материалов, стихов, писем, рецептов, а также рисунки, анимации, музыкальные произведения, графики, динамические модели и что-то еще, что Вы хотели бы создать, запомнить и изменить?» [1]. Это высказывание отражало совершившийся к тому времени поворот в подходе к построению и применению программируемых машин: от средств автоматизации в основном математических вычислений к средствам решения задач из различных областей деятельности и построению мультимедийных информационных ресурсов.

В 1984 г. компания Kurzweil Music Systems (KMS), созданная американским изобретателем Рэймондом Курцвейлом (Raymond Kurzweil) [2], произвела первый в мире цифровой музыкальный синтезатор Kurzweil250. Это был первый в мире специализированный компьютер, который жестовые символы, вводимые с клавиатуры, преобразовывал в музыкальные звуки.

## 1.2 Совершенствование методов и средств информационного взаимодействия и коллективного построения и применения информационных ресурсов

В 1962 г. американские исследователи Д. Ликлайдер и В. Кларк опубликовали доклад о человеко-машинном взаимодействии в режиме онлайн [3]. В докладе содержалось обоснование целесообразности построения глобальной сети как инфраструктурной платформы, обеспечивающей доступ к информационным ресурсам, размещенным на компьютерах, подключенных к этой сети.

В 1971 г. Р. Томлинсон (США) изобрел электронную почту [4], а в 1972 г. этот сервис был реализован.

Ключевым событием в истории создания Интернета стало изобретение в 1974 г. американскими инженерами В. Серфом и Р. Каном протокола управления передачей — TCP (Transmission Control Protocol) [5]. В 1976 г. они продемонстрировали передачу сетевого пакета по протоколу TCP. В 1983 г. семейство протоколов TCP/IP (Internet Protocol) было стандартизовано.

В 1984 г. была создана система доменных имен (DNS — Domain Name System).

В 1988 г. разработан протокол чата (интернет-сервиса обмена текстовыми сообщениями в реальном времени (IRC — Internet Relay Chat)).

В 1989 г. реализован Веб-проект, разработанный британским физиком Т. Бернерс-Ли [6].

Высокому темпу развития Интернета способствует то, что со временем его зарождения профессионалы, занимающиеся научно-техническими задачами построения Интернета, без задержек обмениваются идеями и решениями, используя возможности Интернета.

Интернет стал инфраструктурной платформой человека-машинной среды решения задач. Он служит коммуникационной инфраструктурой электронной почты, Веба, поисковых систем, IP-телефонии и других интернет-сервисов, применяемых при информатизации образования, науки, экономики, госуправления и других видов деятельности.

Созданные на основе Интернета электронные сервисы сделали возможным успешное функционирование разнообразных коммерческих и некоммерческих интернет-образований: интернет-магазинов, социальных сетей (Фейсбук, ВКонтакте и др.), поисковых систем (Гугл, Яндекс и др.), энциклопедических веб-ресурсов (Википедия, Webopedia и др.), электронных библиотек (World Digital Library, Научная электронная библиотека eLibrary и др.), корпоративных и государственных информационных порталов и др.

Начиная с 2000-х гг. интенсивно растет число интернет-решений «умный дом» (Smart House), «умная энергосистема» (Smart Grid) и др., воплощающих концепцию «Интернета вещей» (The Internet of Things).

Успешно развиваются M2M-решения (M2M — Machine-to-Machine), основанные на информационных технологиях межмашинного взаимодействия и предназначенные для мониторинга датчиков температуры, счетчиков электроэнергии,

воды и др.; отслеживания местоположения подвижных объектов (на основе систем ГЛОНАСС и GPS (Global Positioning System)); контроля доступа на охраняемые объекты и др.

### 1.3 Цель статьи

Цель данной статьи — представить точку зрения автора на предмет информатики и актуальные области исследований, соответствующие современному этапу (2017–2020 гг.) развития информатики.

Статья является продолжением [7], где рассматривается проблема создания человеко-машинной среды решения задач моделирования в науке и технике, автоматизированного проектирования, управления, дистанционного обучения и др. В [7] определены классы базовых задач и, как и в данной статье, предложен ряд определений, относящихся к понятийному аппарату информатики (*информационные ресурсы, информационное взаимодействие, символ, код, сигнал, s-среда и s-задача*).

В данной статье научная продукция информатики рассматривается как методологическое обеспечение построения человеко-машинной среды решения задач.

### 1.4 Выделение фрагментов текста

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.

## 2 Предмет информатики

Научная продукция информатики служит методологическим основанием создания *человеко-машинной среды решения задач (s-среды)*, предназначено для построения и применения информационных ресурсов, автоматизации проектирования и др. [7].

□ *Информатика* — наука об извлечении информации из сообщений, создании информационных ресурсов, программировании поведения машин и о других сущностях, связанных с построением и применением человека-машинной среды решения задач моделирования, проектирования, взаимодействия, обучения и др.

Изучает свойства информации, методы ее извлечения из сообщений и представления в заданной форме; свойства, методы и средства информационного взаимодействия; свойства информационных ресурсов, методы и средства их создания, представления, сохранения, накопления, поиска, передачи и защиты;

свойства, методы и средства построения и применения программируемых машин и человеко-машинной среды решения задач. □

## 2.1 Сообщение, данные, информация

□ *Сообщение* рассматривается как конечная упорядоченная совокупность символов (визуальных, аудио- и др.) или ее код, удовлетворяющий протоколу взаимодействия источника с получателем. □

Существование сообщения предполагает наличие источника сообщения, получателя, носителя, среды передачи, средства доставки, протокола взаимодействия источника с получателем.

Работа с сообщениями предполагает их типизацию (○ по языкам; получателям (человек подготовленный, человек обучающийся, робот и др.); носителям (экран, бумага и др.); среде передачи (радиоэфир, кабельная сетевая среда и др.) средствам доставки (IP-телефония, цифровая мобильная связь и др.); протоколам взаимодействия источника с получателем ○).

□ *Данные* — сообщение, необходимое для решения некоторой задачи или совокупности задач, представленное в форме, рассчитанной на распознавание, преобразование и интерпретацию решателем (программой или человеком). □

Человек воспринимает данные (текст, изображения и др.) в символьной форме, а программа компьютера или компьютерного устройства (смартфона, цифровой фотокамеры и др.) — в кодовой.

□ *Интерпретатор сообщения* изучается как построитель выходного сообщения по входному в соответствии с заданной системой правил интерпретации. □

◊ Необходимым условием построения интерпретатора сообщений является существование моделей входного и выходного языков, а также моделей систем понятий, на которых должны интерпретироваться сообщения, составленные на входном и выходном языках. ◇

□ *Информация* изучается как результат интерпретации сообщения на моделях систем понятий. □

Существование информации предполагает наличие принятого сообщения; моделей систем понятий, хранящихся в памяти, доступной интерпретатору; механизма поиска и извлечения подходящей модели; механизма интерпретации сообщения на выбранной модели; механизма записи результата интерпретации в память получателя.

○ Результат интерпретации сообщения та, представленного на языке *a*, полученный переводчиком (человеком или роботом) в виде сообщения *mb* на языке *b*, — информация, извлеченная из сообщения та. ○

Проблемы истинности извлеченной информации, правильности моделей систем понятий, механизма интерпретации и др. — отдельные важные задачи исследований [8].

◊ Впервые задача извлечения информации путем интерпретации сообщений на моделях систем понятий была рассмотрена в [9].

В работах К. Шеннона [10, 11] и А. Н. Колмогорова [12] употребление понятий «сообщение» и «информация» связано с задачами оценки объема кода некоторого сообщения или изменения предсказуемости исхода опыта. В них говорится о «количество информации» и рассматриваются задачи, связанные с этим понятием. В трудах К. Шеннона и А. Н. Колмогорова задача извлечения информации путем интерпретации сообщений на моделях систем понятий не изучалась. Несколько известно автору, эта задача не изучалась и в других работах, связанных с понятием «информация». ◇

## 2.2 Модели системы понятий и системы знаний

□ *Модель системы понятий* рассматривается как пара {ConsSet, ConsRel}, где ConsSet — множество понятий; ConsRel — семейство связей, заданных на ConsSet.

Определение системы понятий — описание ее модели, сопровождаемое указанием области применимости. Определение области применимости модели — описание типов корреспондента (кому адресовано определение); цели, в процессе достижения которой определение имеет смысл (классы задач, при изучении которых определение может быть полезно); стадии, на которой целесообразно использовать определение (концепция, методология решения и т. д.). □

□ Понятие знать в понятийной системе s-моделирования определено как состояние получателя сообщения, когда выходное сообщение, полученное в результате интерпретации входного, распознано как уже известное и не требующее изменений в моделях систем понятий, хранящихся в памяти получателя. Понятие знание определено как комплексное умение извлекать информацию из сообщений, содержащих условия задач определенного класса (это могут быть задачи распознавания образов, перевода с одного языка на другой или иные).

*Модель системы знаний* рассматривается как триада {Cons, Lang, Interp}, где Cons — s-модель системы понятий; Lang — s-модель совокупности языков сообщений, интерпретируемых на Cons; Interp — s-модель совокупности интерпретаторов на Cons сообщений, составленных на языках из Lang. □

□ Интерпретация сообщения на модели Cons:

- (1) построение выходного сообщения (извлечение информации) по заданному входному (сообщения представлены на языках из совокупности Lang);
- (2) анализ выходного сообщения (требуются ли изменения в модели Cons);
- (3) если требуется, то изменение модели Cons; если нет — завершение □ [8].

## 3 Области исследований

Наиболее важные научные идеи, влияющие на развитие информатики, воплощены в методологическом обеспечении построения средств поддержки процессов

познания, информационного взаимодействия и автоматизированного решения различных задач.

На современном этапе (2017–2020 гг.) развития информатики актуальными являются следующие взаимосвязанные комплексы областей исследований.

*Автоматизация вычислений* — изучаются модели, архитектуры и системы команд программируемых машин; алгоритмизация программируемых задач (алгоритмы и структуры данных, распределенные алгоритмы, рандомизированные алгоритмы и др.); распределенные вычисления, облачные вычисления (Cloud Computing); сложность и ресурсоемкость вычислений.

*Программирование* — изучаются системы текстовых символов и кодов; языки программирования и спецификации задач; трансляторы; библиотеки программ; системное программирование; операционные системы; инструментальные системы программирования; системы управления базами данных; технологии программирования; онлайн-сервисы решения задач и др.

*Человеко-машинная среда решения задач (s-среда)* — изучаются модели, методы и средства построения s-среды, компьютерных сетей, сетей цифровой связи, Интернета.

*Восприятие и представление сообщений, взаимодействие в s-среде* — изучаются модели, методы и средства восприятия и представления визуальных, аудио-, тактильных и других сообщений; компьютерное зрение, слух и другие искусственные сенсоры; формирование аудио-, визуальных, тактильных и других сообщений (включая комбинированные), рассчитанных на человека и робота-партнера; распознавание аудио-, визуальных и других сообщений (речи, жестов и др.); обработка изображений, компьютерная графика, визуализация и др.; обмен сообщениями (модели сообщений, методы и средства их приема и передачи); интерфейсы пользователя, программ, аппаратных средств, программ с аппаратными средствами; онлайн-сервисы взаимодействия (мессенджеры, социальные сети и др.).

*Информационные ресурсы и системы для решения задач в s-среде* — изучаются модели, методы и средства построения, представления, сохранения, накопления, поиска, передачи и защиты информационных ресурсов; электронный документооборот; электронные библиотеки и другие информационные системы.

*Информационная безопасность и криптография* — изучаются методы предотвращения и обнаружения уязвимостей; контроля доступа; защиты информационных систем от вторжений, вредоносных программ, перехвата сообщений; несанкционированного использования информационных ресурсов, программных и аппаратных средств.

*Искусственный интеллект* — изучаются модели, методы и средства построения интеллектуальных роботов, используемых в качестве партнеров человека (для решения задач безопасности, ситуационного управления и др.); экспертные методы принятия решений.

*Символьное моделирование* — изучаются системы визуальных, аудио-, тактильных и других символов, рассматриваемых как конструктивные объекты

для построения рассчитанных на человека моделей произвольных сущностей (систем понятий и систем знаний, объектов окружающей среды и изобретенных людьми); системы кодов, поставленные в соответствие системам символов, которые предназначены для построения кодовых эквивалентов символьных моделей, рассчитанных на манипулирование с помощью программ; языки описания символьных моделей; типизация символьных моделей и их кодовых эквивалентов; методы построения символьных моделей систем понятий и систем знаний (включая системы знаний о программируемых задачах) [8].

#### **4 Методологическое обеспечение построения персональной s-среды: ближняя перспектива**

В ближайшие годы одно из актуальных направлений методологического обеспечения совершенствования s-среды будет связано с созданием персонализируемых систем решения задач, аппаратные средства которых размещаются в экипировке пользователя. Скорости передовых технологий беспроводной связи уже достаточны для решения многих задач на основе интернет-сервисов. Ожидается, что до 2025 г. скорости и распространенность беспроводных технологий связи достигнут таких уровней, при которых часть проводных интерфейсов наших дней будет вытеснена беспроводными. Снижение цен на интернет-сервисы также будет способствовать продвижению технологий персонализации s-среды пользователя.

Актуальными проблемами, связанными с персонализацией s-среды, являются: создание более совершенных символьных и кодовых систем; программно-аппаратное преобразование аудио- и тактильных сообщений, отправляемых человеком, в графические, представленные композицией текста, гипертекста, специальных символов и изображений; технологическое совершенствование и унификация беспроводных интерфейсов (прежде всего видеointерфейсов (выход по выбору пользователя: на специальные очки, экраны монитора, телевизора или другие устройства видеовывода)).

Методологическое обеспечение построения персональной s-среды должно опираться на результаты исследований в области искусственного интеллекта, направленных на построение не машинного имитатора интеллекта человека, а интеллектуального партнера, управляемого человеком.

Развитие технологий построения персональной s-среды предполагает усовершенствование методологий дистанционного обучения, взаимодействия и др.

### **Литература**

1. Kay A. Personal computing // Meeting on 20 Years of Computer Science. — Pisa, Italy: Institute di Elaborazione della Informazione, 1975. <http://www.mprove.de/diplom/gui/Kay75.pdf>.

2. A brief career summary of Ray Kurzweil. — Kurzweil Technologies, Inc., 2016. <http://kurzweiltech.com/aboutray.html>.
3. *Licklider J. C. R., Clark W. E.* On-line man-computer communication // AIEE-IRE'62: Spring Joint Computer Conference Proceedings, 1962. P. 113–128. doi: 10.1145/1460833.1460847.
4. *Tomlinson R.* The first network Email. <https://ds.bbn.com/~tomlinso/ray/firstemailframe.html>.
5. *Cerf V., Kahn R.* A protocol for packet network intercommunication // IEEE Trans. Commun., 1974. Vol. 22. No. 5. P. 637–648.
6. *Berners-Lee T.* Information management: A proposal. — CERN, March 1989 – May 1990. <https://www.w3.org/History/1989/proposal.html>.
7. Ильин А. В., Ильин В. Д. Создание человеко-машинной среды решения задач // Системы и средства информатики, 2016. Т. 26. № 4. С. 149–161. doi: 10.14357/08696527160413.
8. Ильин А. В., Ильин В. Д. Основы теории с-моделирования. — М.: ИПИ РАН, 2009. 143 с. doi: 10.13140/2.1.3062.8800.
9. Ильин В. Д., Соколов И. А. Информация как результат интерпретации сообщений на символьных моделях систем понятий // Информационные технологии и вычислительные системы, 2006. № 4. С. 74–82.
10. *Shannon C. E.* A mathematical theory of communication // Bell Syst. Tech. J., 1948. Vol. 27. P. 379–423; 623–656.
11. Шеннон К. Работы по теории информации и кибернетике. — М.: ИЛ, 1963. 830 с.
12. Колмогоров А. Н. Три подхода к определению понятия «количество информации» // Проблемы передачи информации, 1965. Т. 1. Вып. 1. С. 3–11.

Поступила в редакцию 22.12.16

---

## INFORMATICS: RESEARCH SUBJECT AND AREAS

*V. D. Ilyin*

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 presents the point of view on the subject of informatics and its research areas, which are actual at the present stage (2017–2020). Informatics is considered as a science of extracting information from messages, creating information resources, programming machines behavior, and other activities associated with the construction and usage of human-machine environment for solving problems of modeling, design, interaction, learning, etc. Scientific products of informatics are considered as a methodological support of constructing a human-machine environment for solving problems in various areas. Definitions

of key concepts of informatics are proposed (message, data, information, model of a concepts system, etc.). The research areas of current interest are determined: automated calculations; programming; human-machine environment for solving problems (s-environment); perception and representation of messages; interaction in s-environment; information resources and systems for solving problems in s-environment; information security and cryptography, etc.

**Keywords:** informatics; information; information resources; knowledge system; human-machine environment of problem solving; computing automation; programming; informational interaction; artificial intelligence

**DOI:** 10.14357/08696527170112

## References

1. Kay, A. 1975. Personal computing. *Meeting on 20 Years of Computer Science*. Pisa, Italy: Institute di Elaborazione della Informazione. Available at: <http://www.mprove.de/diplom/gui/Kay75.pdf> (accessed October 14, 2016).
2. 2016. *A brief career summary of Ray Kurzweil*. Kurzweil Technologies, Inc. Available at: <http://kurzweiltech.com/aboutray.html> (accessed October 14, 2016).
3. Licklider, J. C. R., and W. E. Clark. 1962. On-line man-computer communication. *AIEE-IRE'62 Spring Joint Computer Conference Proceedings*. 113–128. doi: 10.1145/1460833.1460847.
4. Tomlinson, R. 1971. The first network Email. Available at: <https://ds.bbn.com/~tomlinso/ray/firstemailframe.html> (accessed October 14, 2016).
5. Cerf, V. and R. Kahn. 1974. A protocol for packet network intercommunication. *IEEE Trans. Commun.* 5. Available at: <http://www.cs.princeton.edu/courses/archive/fall06/cos561/papers/cerf74.pdf> (accessed October 14, 2016).
6. Berners-Lee, T. March 1989–May 1990. Information management: A proposal. CERN. Available at: <https://www.w3.org/History/1989/proposal.html> (accessed October 14, 2016).
7. Ilyin, A. V., and V. D. Ilyin. 2016. Sozdanie cheloveko-mashinnoy sredy resheniya zadach [Creating a human-machine environment for problem solving]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 26(4):149–161. doi: 10.14357/08696527160413.
8. Ilyin, A. V., and V. D. Ilyin. 2009. *Osnovy teorii s-modelirovaniya* [Basics of the theory of s-modeling]. Moscow: Institute of Informatics Problems of the Russian Academy of Sciences. 143 p. doi: 10.13140/2.1.3062.8800.
9. Ilyin, V. D., and I. A. Sokolov. 2006. Informatsiya kak rezul'tat interpretatsii soobshcheniy na simvol'nykh modelyakh sistem ponyatiy [Information as a result of message interpretation based on s-model of systems of concepts]. *Informatsionnye tekhnologii i vychislitel'nye sistemy* [Information Technologies and Computer] 4:74–82.
10. Shannon, C. E. 1948. A mathematical theory of communication. *Bell Syst. Tech. J.* 27:379–423; 623–656. Available at: <http://cm.bell-labs.com/cm/ms/what/shannonday/shannon1948.pdf> (accessed October 14, 2016).
11. Shannon, C. 1963. *Raboty po teorii informatsii i kibernetike* [Works on the theory of information and cybernetics]. Moscow: IL [Foreign Literature]. 830 p.

12. Kolmogorov, A. N. 1965. Tri podkhoda k opredeleniyu ponyatiya “kolichestvo informatsii” [Three approaches to the definition of “amount of information”]. *Problemy peredachi informatsii* [Problems of Information Transmission] 1(1):3–11. Available at: [http://kolmogorov.pms.ru/tri\\_podkhoda.html](http://kolmogorov.pms.ru/tri_podkhoda.html) (accessed October 14, 2016).

*Received December 22, 2016*

## Contributor

**Ilyin Vladimir D.** (b. 1937) — Doctor of Science in technology, professor, Head of Laboratory, 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; vdilyin@yandex.ru

---

## О Б А В Т О Р А Х

---

**Волович Константин Иосифович** (р. 1970) — старший научный сотрудник Института проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

**Глущенко Екатерина Игоревна** (р. 1983) — участник проекта “Galo GO” БашГУ; ведущий специалист ООО «РН-УфаНИПИнефть»

**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

**Дулин Сергей Константинович** (р. 1950) — доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник Института проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

**Дулина Наталья Георгиевна** (р. 1947) — кандидат технических наук, старший научный сотрудник Вычислительного центра им. А. А. Дородницына Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

**Егоров Владимир Борисович** (р. 1948) — кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник Института проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

**Еникеева Лениза Васимовна** (р. 1988) — участник проекта “Galo GO” БашГУ; аспирант Института нефтехимии и катализа Российской академии наук

**Зацаринный Александр Алексеевич** (р. 1951) — доктор технических наук, профессор, заместитель директора Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

**Ильин Владимир Дмитриевич** (р. 1937) — доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией Института проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

**Илюшин Геннадий Яковлевич** (р. 1947) — кандидат технических наук, заведующий лабораторией Института проблем информатики 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

**Косарик Валерий Валентинович** (р. 1970) — научный сотрудник Института проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

**Кузьмин Виктор Юрьевич** (р. 1986) — руководитель Департамента разработки ООО «Вай2Гео»

**Лиманский Валерий Иванович** (р. 1952) — кандидат технических наук, старший научный сотрудник Института проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

**Лукьянов Геннадий Викторович** (р. 1952) — кандидат военных наук, доцент, ведущий научный сотрудник 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

**Сахибгареева Маргарита Владимировна** (р. 1988) — кандидат физико-математических наук, руководитель проекта “Galo GO” БашГУ; главный специалист ООО «РН-УфаНИПИнефть»

**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

**Сомин Николай Владимирович** (р. 1947) — кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Института проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

**Сучков Александр Павлович** (р. 1954) — доктор технических наук, ведущий научный сотрудник Института проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

**Шабанов Александр Петрович** (р. 1949) — доктор технических наук, ведущий научный сотрудник Института проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

**Шарипова Гульназ Маратовна** (р. 1990) — участник проекта “Galo GO” БашГУ; аспирант Башкирского государственного университета

**Шарнин Михаил Михайлович** (р. 1959) — кандидат технических наук, старший научный сотрудник Института проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

---

## **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 подписанныго документа).

Редакция 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.

Редакция 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 выше 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.ru/> бесплатной программой транслитерации русского текста в латиницу, при этом в закладке «варианты...» следует выбрать опцию BNG.

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/S10231935080077.

**Описание статьи из электронного журнала:**

Swaminathan, V., E. Lepkoswka-White, and B. P. Rao. 1999. Browsers or buyers in cyberspace? An investigation of electronic factors influencing electronic exchange. *JCMC* 5(2). Available at: <http://www.ascusc.org/jcmc/vol5/issue2/> (accessed April 28, 2011).

**Описание материалов конференций:**

Usmanov, T.S., A. A. Gusmanov, I. Z. Mullagalin, R. Ju. Muhametshina, A. N. Chervyakova, and A. V. Sveshnikov. 2007. Osobennosti proektirovaniya razrabotki mestorozhdeniy s primenением hidrorazryva 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 neftegazoootdachi”* [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 semanticeskogo 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) (Сейфуль-Мулюков Рустем Бадриевич)

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

---

## Requirements for manuscripts submitted to Journal “Systems and Means of Informatics”

---

Journal “Systems and Means of Informatics” publishes theoretical, review, and discussion articles on the research and development in the field of information technology.

The journal is published in Russian. By a special decision of the editorial board, some articles can be published in English.

Topics covered include the following areas:

- information and communication systems and tools of their design;
- architecture and software of computational complexes and networks; and
- methods and tools of information protection.

1. The Journal publishes original articles which have not been published before and are not intended for simultaneous publication in other editions. An article submitted to the Journal must not violate the Copyright law. Sending the manuscript to the Editorial Board, the authors retain all rights of the owners of the manuscript and transfer the nonexclusive rights to publish the article in Russian (or the language of the article, if not Russian) and its distribution in Russia and abroad to the Founders and the Editorial Board. Authors should submit a letter to the Editorial Board in the following form:

***Agreement on the transfer of rights to publish:***

*“We, the undersigned authors of the manuscript “. . .”, pass to the Founder and the Editorial Board of the Journal “Systems and Means of Informatics” the nonexclusive right to publish the manuscript of the article in Russian (or in English) in both print and electronic versions of the Journal. We affirm that this publication does not violate the Copyright of other persons or organizations.”*

*Author(s) signature(s): (name(s), address(es), date).”*

This agreement should be submitted in paper form or in the form of a scanned copy (signed by the authors).

The Editorial Board has the right to request from the authors an official expert conclusion that the submitted article has no classified data prohibited for publication.

2. A submitted article should be attached with **the data on the author(s)** (see item 8). If there are several authors, the contact person should be indicated who is responsible for correspondence with the Editorial Board and other authors about revisions and final approval of the proofs.
3. The Editorial Board of the Journal examines the article according to the established reviewing procedure. If authors receive their article for correction after reviewing, it does not mean that the article is approved to be published. The corrected article should be sent to the Editorial Board for the subsequent review and approval.
4. The decision on the article publication or its rejection is communicated to the authors. The Editorial Board may also send the reviews on the submitted articles to the authors. Any discussion upon the rejected articles is not possible.
5. The edited articles will be sent to the authors for proofread. The comments of the authors to the edited text of the article should be sent to the Editorial Board as soon as possible.
6. The manuscript of the article should be presented electronically in the MS WORD (.doc or .docx) or L<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.
- 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/S10231935080077.
- 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 primeniem 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 pozyscheniya neftegazoootdachi"* [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 semanticeskogo slovarya informacionnogo 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)