

СИСТЕМЫ И СРЕДСТВА ИНФОРМАТИКИ

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

Издается с 1989 года
Журнал выходит ежеквартально

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

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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

Редакция

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

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

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

Журнал входит в систему Российского индекса научного цитирования (РИНЦ)
Журнал включен в базу данных CrossRef (систему DOI — Digital Object Identifier),
в базу данных Ulrich's periodicals directory

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

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

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

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

СИСТЕМЫ И СРЕДСТВА ИНФОРМАТИКИ

Том 28 № 2 Год 2018

СОДЕРЖАНИЕ

Аналитическое моделирование нормальных процессов в вольтерровских стохастических системах И. Н. Сеницын, В. И. Сеницын	4
Имитационное моделирование пользовательской активности для оценивания вероятностно-временных характеристик программного обеспечения А. В. Борисов, А. В. Босов, А. В. Иванов, Р. Б. Чавтараев	20
Информационная безопасность на основе метаданных в компонентно-интеграционных архитектурах информационных систем А. А. Грушо, М. И. Забежайло, Н. А. Грушо, Е. Е. Тимонина	34
Использование диссеминационных алгоритмов для формирования неструктурированной текстовой информации в базе геоданных С. К. Дулин, Н. Г. Дулина	42
Сопоставление особенностей представления геоданных в картографии и в геоинформатике Д. А. Никишин	60
Особенности оценки эффективности геоинформационной системы как элемента ситуационного центра А. А. Зацаринный, А. В. Воронин, Ю. С. Ионенков	75
Сервис-ориентированный интерфейс для доступа к научным данным в области исследования и оперативного мониторинга состояния вулканов Камчатки и Северных Курил С. П. Королёв, И. М. Романова, С. И. Мальковский, А. А. Сорокин	88

СИСТЕМЫ И СРЕДСТВА ИНФОРМАТИКИ

Том 28 № 2 Год 2018

СОДЕРЖАНИЕ

Программная реализация метода генерации сетей Петри
большого размера

Д. И. Харитонов, Г. В. Тарасов, Д. В. Леонтьев **99**

Математические методы исследования кинетики
формирования кластеров углерода в плазме

Г. В. Абрамов, А. Н. Гаврилов **116**

Методология обратимой генерализации в контексте
классификации информационных трансформаций

И. М. Зацман **128**

Интеллектуальный анализ данных на базе Stanford
CoreNLP для определения частей речи в русском языке

***О. В. Андреева, М. Б. Багиров, А. А. Данькина,
Т. О. Федорова, М. М. Шевелёва*** **145**

Информационная поддержка формирования стратегий
инновационного развития регионов на основе адаптивной
имитационной модели

М. М. Низамутдинов, В. В. Орешников **154**

Модель распределения потоков в однопродуктовой
сетевой системе

А. В. Ильин, В. Д. Ильин **170**

Об одной реализации метода динамического
программирования для решения задачи о замене
оборудования с помощью прикладной программы

Е. В. Архангельская **178**

Об авторах **189**

Правила подготовки рукописей статей **193**

Requirements for manuscripts **197**

АНАЛИТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НОРМАЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ В ВОЛЬТЕРРОВСКИХ СТОХАСТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ*

И. Н. Синицын¹, В. И. Синицын²

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

Ключевые слова: аналитическое моделирование; вольтерровская стохастическая система (ВСтС); динамика популяций; метод нормальной аппроксимации (МНА); метод статистической линеаризации (МСЛ); нормальный (гауссовский) стохастический процесс (СтП); стохастическая система (СтС); уравнение Пугачёва для характеристической функции; уравнение Фоккера–Планка–Колмогорова (ФПК) для плотности; функция межвидового взаимодействия; эредитарная вольтерровская стохастическая система (ЭВСтС)

DOI: 10.14357/08696527180201

1 Введение

Вопросам анализа и синтеза стохастических динамических моделей популяций посвящена обширная литература (см., например, [1, 2]). В основе исследований по стохастической динамике популяций в экстремальных условиях

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

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

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

стохастической среды лежат одно- и многопопуляционные модели, описываемые дифференциальными линейными и нелинейными ВСтС. Наряду с дифференциальными ВСтС рассматривались интегродифференциальные ВСтС, приводимые к дифференциальным [3, 4]. При этом стохастические возмущения принимались в виде аддитивных и параметрических белых шумов, как правило гауссовских. Поэтому основным аппаратом была теория ВСтС на основе уравнений Фоккера–Планка–Колмогорова (ФПК) [3, 4]. Размерность N исходных уравнений предполагалась небольшой ($N = 1$ или 2). Для многомерных ВСтС использовались линейные модели с аддитивными нормальными (гауссовскими) белыми шумами.

В настоящее время разработаны эффективные методы аналитического моделирования нелинейных стохастических систем (СтС) высокой размерности [5–14]. Рассмотрим два эффективных метода аналитического моделирования гауссовских стационарных и нестационарных процессов в ВСтС с гауссовскими и негауссовскими шумами.

Статья содержит введение, заключение и 5 разделов. В разд. 2 рассматриваются уравнения ВСтС, понимаемые в смысле Ито [3, 4] и уравнения для одно- и многомерных распределений. В разд. 3 и 4 представлены два эффективных метода аналитического моделирования одно- и многомерных распределений. Раздел 5 посвящен уравнениям аналитического моделирования динамики одной популяции в стохастической среде. Там же рассмотрена динамика одномерной эредитарной ВСтС (ЭВСтС), приводимой к дифференциальной. В разд. 6 рассмотрена стохастическая динамика двух видов популяций. В заключении даны основные выводы и обозначены возможные обобщения.

2 Уравнения для плотностей и характеристических функций процессов в вольтерровских стохастических системах

2.1. Пусть детерминированная дифференциальная вольтерровская система описывается векторным дифференциальным уравнением вида [1, 2]

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

Здесь $Y = [Y_1 \dots Y_N]^T$ — вектор численности популяций; $\varepsilon = [\varepsilon_{ij}]$ — матрица коэффициентов прироста (гибели); $\gamma = \gamma(Y, t) = [\gamma_{ij}]$, $i, j = \overline{1, N}$, — матрица функций межпопуляционного (межвидового) взаимодействия. Добавим в (1), во-первых, вектор аддитивных возмущений типа белых шумов $\alpha_0 + \sigma_\alpha^{(1)} V^{(1)}$ и, во-вторых, векторы параметрических шумов $\varepsilon_0 + \sigma_\varepsilon^{(2)} V^{(2)}$ и $\gamma_0 + \sigma_\gamma^{(3)} V^{(3)}$, где $V^{(l)} = [V_1^{(l)}, \dots, V_n^{(l)}]^T$ ($l = \overline{1, n}$) — векторы белых шумов, представляющих собой производные от соответствующих процессов с независимыми приращениями W , $V = \dot{W}$; $\alpha = [\alpha_1 \dots \alpha_n]^T$ — вектор детерминированных аддитивных

возмущений; $\sigma_\alpha^{(1)} = [\sigma_{\alpha,ij}^{(1)}]$, $i, j = \overline{1, n}$, — матрица стохастических аддитивных возмущений; $\sigma_\varepsilon^{(2)} = [\sigma_{\varepsilon,ij}^{(2)}]$ и $\sigma_\gamma^{(3)} = [\sigma_{\gamma,ij}^{(3)}]$ — матрицы стохастических параметрических возмущений. Таким образом, в качестве исходного векторного стохастического дифференциального уравнения возьмем следующее уравнение, понимаемое в смысле Ито:

$$\dot{Y}_0 = \left\{ \varepsilon_0 + \sigma_\varepsilon^{(2)}(t)V^{(2)} - \left[\gamma(Y, t) + \gamma_0 + \sigma_\gamma^{(3)}(Y, t)V^{(3)} \right] \right\} Y + \alpha_0 + \sigma_\alpha^{(1)}(t)V^{(1)} = a(Y, t) + B(Y, t)V, \quad Y(t_0) = Y_0. \quad (2)$$

Замечание 2.1. В случае, когда уравнение (2) понимается в смысле Стратоновича, используется следующая формула [3, 4]:

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

где $\theta = 1/2$, a_θ отвечает регулярной части (2), а B — стохастической части (2) при $V = [V^{(1)T} V^{(2)T} V^{(3)T}]^T$.

Замечание 2.2. Если $\gamma(Y, t)$ является эредитарной матричной функцией, описываемой интегральным уравнением с затухающей памятью, то такую интегродифференциальную систему можно привести к дифференциальной путем введения соответствующих инструментальных переменных [3, 4, 8, 9, 14].

2.2. Как известно из общей теории нелинейных дифференциальных СтС [3, 4], одно- и многомерные распределения в общем случае получаются путем интегрирования уравнений для плотностей ФПК в случае гауссовских СтС и интегродифференциальных уравнений Пугачёва для характеристических функций в случае негауссовских СтС. При больших возмущениях интегрирование этих уравнений встречает серьезные вычислительные трудности даже для одномерных распределений. Среди известных приближенных методов аналитического моделирования распределений широкое распространение получили методы нормальной аппроксимации (МНА) и статистической линеаризации (МСЛ), а также методы параметризации распределений (методы моментов, семиинвариантов, ортогональных разложений и их модификаций) [3, 4].

2.3. В случае гауссовских белых шумов для одномерной гауссовской ВСтС, основываясь на уравнении (2), представим уравнение ФПК для одномерной плотности $f_1 = f_1(y; t)$ с соответствующим начальным условием в следующем виде:

$$\frac{\partial f_1}{\partial t} = -\frac{\partial^T}{\partial y} [a(y, t) f_1(y, t)] + \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial y} \frac{\partial^T}{\partial y} \left[B(y, t) \nu(t) B(y, t)^T f_1(y; t) \right],$$

$$f_1(y; t_0) = f_0(y). \quad (3)$$

Полагая в (3) $\partial f_1 / \partial t = 0$, постоянными интенсивности белых шумов ν и параметров ВСтС, получим уравнение для определения стационарных распределений:

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

Двумерное распределение для (2) вычисляется по следующей формуле:

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

где переходная плотность $f(y_2; t_2 | y_1; t_1)$ удовлетворяет уравнению вида (3) для t_2 , т. е.

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

$$f(y; \tau | \eta; \tau) = \delta(y - \eta).$$

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

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

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

$$\frac{\partial g_1}{\partial t} = \frac{1}{(2\pi)^N} \int_{-\infty}^{\infty} \left[i\lambda^T a + \sum_{j=1}^N \chi_j(B_j \lambda; t) \right] \exp[-i(\lambda - \mu)^T y] g_1(\mu; t) dy d\mu; \quad (4)$$

$$g_1(\lambda; t_0) = g_0(\lambda).$$

Здесь $\chi_j = (\partial/\partial t) \ln h_j(\mu; t)$ — логарифмические производные $h_j(\mu; t)$ ($j = \overline{1, N}$). Характеристические функции n -мерных распределений описываются уравнениями вида (4) с заменой t на t_n и начальными условиями

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

Замечание 2.3. Для определения одномерных плотностей и характеристических функций стационарных режимов в многомерных ВСтС могут быть полезны методы теории распределений с инвариантной мерой [3, 4, 6].

Замечание 2.4. В том случае, когда возмущения в (2) являются автокоррелированными и известны их авто- и взаимноковариационные функции, согласно [3, 4], следует добавить уравнения формирующих фильтров (ФФ), при этом порядок исходных уравнений увеличится на число ФФ. Для ВСтС сверхбольшой размерности, если учесть фильтрационные свойства ВСтС, целесообразно применение методов канонических разложений [3, 4].

3 Два метода аналитического моделирования одномерных распределений в многомерных вольтерровских системах

3.1. Следуя [3–5], представим уравнения МНА для аналитического моделирования одномерного распределения $Y = Y(t)$ в следующем виде:

$$f_1(y; t) = [(2\pi)^N |K|]^{-1/2} \exp \left[-(y - m)^T K^{-1} (y - m) \right]; \quad (5)$$

$$\dot{m} = A^m = M_N [a(Y, t)], \quad m(t_0) = m_0; \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \dot{K} = A^K = M_N \left[a(Y, t)(Y - m)^T \right] + M_N \left[a(Y, t)(Y - m)^T \right]^T + \\ + M_N \left[B(Y, t)\nu(t)B(Y, t)^T \right], \quad K(t_0) = K_0. \end{aligned} \quad (7)$$

Здесь $a(Y, t)$ и $B(Y, t)$ определены в (2), а

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

Полагая в (5) и (6) $\dot{m} = 0$ и $\dot{K} = 0$:

$$A^m(m^*, K^*) = 0; \quad A^K(m^*, K^*) = 0, \quad (8)$$

найдем стационарные значения m^* и K^* .

Устойчивость m^* при известном K^* проверяется путем рассмотрения уравнений в вариациях для (6), а устойчивость по совокупности m^* и K^* — согласно (8).

Таким образом, в основе первого метода лежат уравнения (5)–(8).

3.2. Пусть теперь в уравнениях (6) и (7) допустима статистическая линеаризация нелинейных функций $\gamma(Y, t)Y$ и $\sigma_\gamma^{(3)}(Y, t)Y$ вида

$$\gamma(Y, t)Y \approx \psi_0^{\gamma Y}(m, K, t) + \psi_1^{\gamma Y}(m, K, t)Y; \quad (9)$$

$$\sigma_\gamma^{(3)}(Y, t)Y \approx \psi_0^{\sigma_3^Y}(m, K, t) + \psi_1^{\sigma_3^Y}(m, K, t)Y. \quad (10)$$

Тогда система (1) примет вид стохастической линейной системы с аддитивными и параметрическими шумами следующего вида [3, 4]:

$$\dot{Y} = \tilde{a}_0 + \tilde{a}Y + \left(b_0 + \sum_{h=1}^N b_h Y_h \right) V, \quad Y(t_0) = Y_0. \quad (11)$$

Таким образом, если при анализе (11) можно ограничиться вероятностными моментами первого и второго порядка, то эти моменты определяются совместным интегрированием векторно-матричных уравнений:

$$\dot{m} = A^m = \tilde{a}m + \tilde{a}_0, \quad m(t_0) = m_0; \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \dot{K} = \tilde{A}^K = \tilde{a}K + K\tilde{a}^T + b_0\nu b_0^T + \sum_{h=1}^N (b_h\nu b_0^T + b_0\nu b_h^T)m_h + \\ + \sum_{h,l=1}^N b_h\nu b_l^T (m_h m_l + K_{hl}), \quad K(t_0) = K_0. \end{aligned} \quad (13)$$

Для анализа стационарных режимов в (12) и (13) имеем совместную (в силу статистической линеаризации нелинейных функций $\gamma(Y, t)Y$ и $\sigma_\gamma^{(3)}(Y, t)Y$) систему конечных уравнений:

$$\tilde{A}^m(m^*, K^*) = 0; \quad \tilde{A}^K(m^*, K^*) = 0. \quad (14)$$

При этом условия устойчивости получаются путем рассмотрения уравнений в вариациях для вариаций δm и δK в силу (12) и (13).

Таким образом, в основе второго метода лежат уравнения (9)–(14).

Замечание 3.1. Полученные соотношения справедливы для негауссовских шумов. В том случае, когда шум ν гауссовский, вероятностные моменты определяются бесконечной системой уравнений, которая разделяется на независимые уравнения для моментов каждого данного порядка [3, 4].

4 Аналитическое моделирование двумерных распределений в многомерных вольтерровских системах

Согласно МНА уравнения двумерных распределений в силу (2) будут иметь вид:

$$f_2(y_1, y_2; t_1, t_2) = [(2\pi)^{2N} |\bar{K}_2|]^{-1/2} \exp \left\{ -\frac{1}{2} (\bar{y}_2 - \bar{m}_2)^T \bar{K}^{-1} (\bar{y}_2 - \bar{m}_2) \right\},$$

где

$$\left. \begin{aligned} \bar{y}_2 &= [y_1^T \ y_2^T]^T; \quad \bar{m}_2 = [m(t_1)^T \ m(t_2)^T]^T; \\ \bar{K}_2 &= \begin{bmatrix} K(t_1, t_1) & K(t_1, t_2) \\ K(t_2, t_1) & K(t_2, t_2) \end{bmatrix}; \quad K(t_1, t_1) = K(t_1); \\ \frac{\partial K(t_1, t_2)}{\partial t_2} &= A_{t_1 t_2}^K = M_N \left\{ [Y_{t_1} - m(t_1)] a(Y_{t_2}, t_2)^T \right\}. \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

Замечание 4.1. Для стационарных решений матрица ковариационных и взаимных ковариационных функций зависит только от $\tau = t_1 - t_2$, т. е. $K(t_1, t_2) = k(\tau)$ и $A^{k(t_1, t_2)} = A^{k(\tau)}$.

Замечание 4.2. Для аналитического моделирования нормальных распределений выше второго используются одно- и многомерные нормальные распределения для соответствующих моментов времени.

В случае уравнений (11) матрица ковариационных функций $K(t_1, t_2)$ определяется уравнением:

$$\frac{\partial K(t_1, t_2)}{\partial t_2} = K(t_1, t_2) \tilde{a}(t_2)^T, \quad K(t_1, t_1) = K(t_1). \quad (16)$$

В стационарном случае (16) имеет вид:

$$\frac{dk(\tau)}{d\tau} = \tilde{a}k(\tau), \quad k(0) = K^* \quad \text{при } \tau > 0,$$

а при $\tau < 0$:

$$k(\tau) = k(-\tau)^T.$$

Замечание 4.3. Известно [3, 4], что стохастический процесс в линейной системе с параметрическими шумами может существовать только тогда, когда детерминированная система (13) устойчива. Однако это условие в общем виде недостаточно для существования стационарного в узком смысле стохастического процесса [3, 4].

5 Аналитическое моделирование одномерной вольтерровской стохастической системы

5.1. Рассмотрим одномерную ВСтС при $\gamma(Y, t) = \gamma_0 Y$, $\sigma_\gamma = \sigma_0^\gamma$ с одним аддитивным V_1 и двумя параметрическими белыми шумами V_2 и V_3 :

$$\begin{aligned} \dot{Y} &= \{(\varepsilon_0 + \sigma_0^\varepsilon V_2) - [(\gamma_0 + \sigma_0^\gamma V_3) Y]\} Y + \alpha_0 + \sigma_0^\alpha V_1 = \\ &= a(Y, t) + B(Y, t) V, \quad Y(t_0) = Y_0. \end{aligned} \quad (17)$$

Здесь $V = [V_1 \ V_2 \ V_3]^T$ — некоррелированные нормальные шумы с матрицей интенсивностей $\nu = \text{diag } \nu_1 \nu_2 \nu_3$;

$$a(Y, t) = \alpha_0 + (\varepsilon_0 - \gamma_0 Y)Y; \quad B(Y, t) = [\sigma_0^\alpha \sigma_0^\varepsilon - \sigma_0^\gamma Y^2].$$

Применим сначала второй метод. В силу (11)–(13), (16) и (17) придем к следующим уравнениям для моментов первого и второго порядка:

$$\dot{m} = A^m(m, D, t) = \alpha_0 - \gamma_0 (D + m^2) + \varepsilon_0 m, \quad m(t_0) = m_0; \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \dot{D} = A^D(m, D, t) = & 2(\varepsilon_0 - 2m\gamma_0)D + \nu_1 \sigma_0^{\alpha 2} + \nu_2 \sigma_0^{\varepsilon 2} (m^2 + D) + \\ & + \nu_3 \sigma_0^{\gamma 2} (m^4 + D^2 + 6m^2 D), \quad D(t_0) = D_0; \end{aligned} \quad (19)$$

$$\frac{\partial K(t_1, t_2)}{\partial t_2} = A_{t_1, t_2}^K = (\varepsilon_0 - 2m\gamma_0) K(t_1, t_2), \quad K(t_1, t_1) = K(t_1). \quad (20)$$

При $V_1 \neq 0$ и $V_2 = V_3 = 0$ в (18)–(20) имеем:

$$\left. \begin{aligned} A^m &= \alpha_0 + \varepsilon_0 m - \gamma_0 (m^2 + D); \\ A^D &= 2(\varepsilon_0 - 2m\gamma_0)D + \nu_1 \sigma_0^{\alpha 2}; \\ A_{t_1, t_2}^K &= (\varepsilon_0 - 2m\gamma_0) K(t_1, t_2). \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

Из (21) стационарные значения m^* и D^* определяются из следующих уравнений:

$$c_0 m^{*3} + c_1 m^{*2} + c_2 m^* + c_3 = 0; \quad D^* = d_1 m^{*2} + d_2 m^* + d_3,$$

где

$$\begin{aligned} c_0 &= 4\gamma_0^2; \quad c_1 = -3\varepsilon_0\gamma_0; \quad c_2 = \varepsilon_0^2 - 2\alpha_0\gamma_0; \quad c_3 = \nu_1 \sigma_0^{\alpha 2} + 2\varepsilon_0\gamma_0; \\ d_1 &= -1; \quad d_2 = \varepsilon_0; \quad d_3 = \alpha_0. \end{aligned}$$

При $V_2 \neq 0$ и $V_1 = V_3 = 0$ для (18)–(20) находим:

$$\begin{aligned} A^m &= \varepsilon_0 m - \gamma_0 (m^2 + D); \\ A^D &= 2(\varepsilon_0 - 2m\gamma_0)D + \nu_2 \sigma_0^{\varepsilon 2} (m^2 + D); \\ A_{t_1, t_2}^K &= (\varepsilon_0 - 2m\gamma_0) K(t_1, t_2). \end{aligned}$$

Стационарные значения m^* и D^* определяются из уравнений:

$$\begin{aligned} c_0 m^{*3} + c_1 m^{*2} + c_2 m^* + c_3 &= 0; \\ D^* &= d_1 m^{*2} + d_2 m^* + d_3 = 0, \end{aligned}$$

где

$$c_0 = 4\gamma_0^2; \quad c_1 = -6\varepsilon_0\gamma_0; \quad c_2 = 2\varepsilon_0^2 - 4\alpha_0\gamma_0 + \nu_2\sigma_0^{\varepsilon^2}\varepsilon_0; \quad c_3 = 2\varepsilon_0\gamma_0 + \nu_2\sigma_0^{\varepsilon^2}\alpha_0\gamma_0.$$

Замечание 5.1. Первый метод основан на уравнениях (6), (7) и (15), и он дает более точное решение, поскольку слагаемое

$$B\nu B^T = \nu_1\sigma_0^{\alpha^2} + \nu_2\sigma_0^{\varepsilon^2}Y^2 + \nu_3\sigma_0^{\gamma^2}Y^4$$

содержит дополнительные члены с Y^4 . Однако с точностью до моментов второго порядка результаты совпадают.

Таким образом, аддитивные широкополосные возмущения приводят к исчезновению тривиальных режимов и появлению стохастических флуктуаций, не связанных с $(\varepsilon-\gamma)$ -механизмами саморегулирования численности популяции. В зависимости от отношения сигнал/шум регулярных и стохастических составляющих возможны эффекты вырождения популяции [1, 2]. Параметрические возмущения связаны $(\varepsilon-\gamma)$ -механизмами саморегулирования и количественно влияют на регулярную и флуктуационную составляющие. Возникают множественные стационарные и сугубо нестационарные стохастические режимы.

5.2. Теперь рассмотрим аналитическое моделирование одномерной эредитарной вольтерровской системы. Пусть для одномерной детерминированной эредитарной вольтерровской системы уравнение (1) имеет вид:

$$\dot{Y} = \left[\varepsilon - \gamma \int_{t-T_0}^t \Phi(t, \tau) F(Y(\tau), \tau) d\tau \right] Y, \quad Y(t_0) = Y_0. \quad (22)$$

Здесь функция $\Phi = \Phi(t, \tau)$ называется эредитарным ядром; T_0 — некоторый временной параметр эредитарности. В случае, когда при $t < t_0 + T_0$ можно пренебречь влиянием $Y(\tau)$ при $\tau \in (t - T_0, t_0)$, в интеграле нижний предел можно заменить на t_0 . Кроме того, положим, что эредитарная память стационарна и асимптотически затухает, например

$$\Phi(t, \tau) = \exp[-\lambda(t - \tau)].$$

Тогда, обозначив $Y_1 = Y$ и введя инструментальную переменную

$$Y_2 = \int_{t_0}^t e^{-\lambda(t-\tau)} F(Y_1(\tau), \tau) d\tau, \quad (23)$$

представим интегродифференциальное уравнение (22) и интегральное уравнение (23) в следующем дифференциальном виде:

$$\dot{Y} = (\varepsilon - \gamma Y_2) Y_1, \quad Y_1(t_0) = Y_{10}; \quad (24)$$

$$\dot{Y}_2 = -\lambda Y_2 + F(Y_1, t), \quad Y_2(t_0) = 0. \quad (25)$$

Здесь (25) получено путем дифференцирования (23) по параметру t .

Учитывая стохастичность параметров ε и γ и наличие аддитивного белого шума, приходим к следующей дифференциальной ВСтС, отвечающей ЭВСтС:

$$\begin{aligned}\dot{Y}_1 &= [\varepsilon_0 + \sigma_0^\varepsilon V_2 - (\gamma_0 + \sigma_0^\gamma V_3) Y_2] Y_1 + \alpha_0 + \sigma_0^\alpha V_1, \quad Y_1(t_0) = Y_{10}; \\ \dot{Y}_2 &= -\lambda Y_2 + F(Y_1, t), \quad Y_2(t_0) = 0,\end{aligned}$$

или в векторном виде:

$$\dot{Z} = a^z + B^z V.$$

Здесь

$$\left. \begin{aligned} V &= [V_1 \ V_2 \ V_3]^T; & Z &= [Y_1 \ Y_2]^T; \\ a^z &= \begin{bmatrix} (\varepsilon_0 - \gamma_0 Y_2) Y_1 \\ -\lambda Y_2 + \gamma_0 F(Y_1, t) \end{bmatrix}; & B^z &= \begin{bmatrix} \sigma_0^\alpha & \sigma_0^\varepsilon Y_1 & -\sigma_0^\gamma Y_1 Y_2 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \end{aligned} \right\} \quad (26)$$

Подставляя (26) в (6), (7) и (15), получим искомые уравнения для аналитического моделирования одномерной ЭВСтС с интегральной нелинейностью, приводимой к дифференциальной.

Замечание 5.2. Аналогично составляются уравнения для стационарных эредитарных ядер вида

$$\begin{aligned}\Phi(t, \tau) &= e^{-\lambda(t-\tau)} \cos \omega(t - \tau); \\ \Phi(t, \tau) &= e^{-\lambda(t-\tau)} [\cos \omega(t - \tau) + \psi \sin \omega(t - \tau)].\end{aligned}$$

Замечание 5.3. В случае нестационарных вырожденных ядер $\Phi(t, \tau)$ вида $\Phi(t, \tau) = \Phi^+(t)\Phi^-(\tau)$ инструментальная переменная Y_2 вводится посредством соотношения [3, 4]:

$$Y_2 = \int_{t_0}^t \Phi^-(\tau) F(Y_1(\tau), \tau) d\tau.$$

Тогда, например, при $\Phi^-(\tau) = \exp(-\lambda\tau)$ уравнение (24) принимает вид:

$$\dot{Y}_1 = [\varepsilon - \gamma \Phi^+(t) Y_2] Y_1, \quad Y_1(t_0) = Y_{10}.$$

Аналогично записываются соответствующие уравнения ВСтС.

Замечание 5.4. Вольтерровские системы с чистым запаздыванием часто применяются для описания возрастных структур популяций. Их можно рассматривать приближенно как эредитарные системы с распределенной памятью и изучать вопросы снижения устойчивости сообществ популяций.

6 Аналитическое моделирование двумерной вольтерровской стохастической системы

6.1. Пусть дифференциальная ВСтС описывается следующей системой нелинейных дифференциальных стохастических уравнений, понимаемых в смысле Ито:

$$\dot{Y}_1 = [\varepsilon_{01} + \sigma_{01}^\varepsilon V_3 - (\gamma_{10} + \sigma_{10}^\gamma V_4) F_1] Y_1 + \alpha_{01} + \sigma_{01}^\alpha V_1, \quad Y_1(t_0) = Y_{10};$$

$$\dot{Y}_2 = [\varepsilon_{02} + \sigma_{02}^\varepsilon V_3 - (\gamma_{20} + \sigma_{20}^\gamma V_4) F_2] Y_2 + \alpha_{02} + \sigma_{02}^\alpha V_2, \quad Y_2(t_0) = Y_{20},$$

или в векторном виде:

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

Здесь $Z = [Y_1 \ Y_2]^T$; $V = [V_1 \ V_2 \ V_3 \ V_4]^T$ — вектор независимых белых шумов с интенсивностями $\nu = \text{diag}(\nu_1, \nu_2, \nu_3, \nu_4)$; $F_i = F_i(Y_1, Y_2, t)$ ($i = 1, 2$);

$$a = \begin{bmatrix} \varepsilon_{01} - \gamma_{01} F_1 Y_1 \\ \varepsilon_{02} - \gamma_{02} F_2 Y_2 \end{bmatrix}; \quad B = \begin{bmatrix} \sigma_{01}^\alpha & 0 & \sigma_{01}^\varepsilon Y_1 - \sigma_{01}^\gamma F_1 Y_1 \\ 0 & \sigma_{02}^\alpha & \sigma_{02}^\varepsilon Y_2 - \sigma_{02}^\gamma F_2 Y_2 \end{bmatrix}.$$

Воспользуемся вторым методом. Сначала проведем статистическую линейризацию функций межвидового взаимодействия согласно [3–5]:

$$F_i \approx M_N[F_i] \approx F_{i0}(m, K, t),$$

где

$$m = [m_1 \ m_2]^T; \quad K = \begin{bmatrix} D_1 & K_{12} \\ K_{12} & D_2 \end{bmatrix}.$$

В результате придем к уравнениям (11)–(13) и (15), если ввести следующие обозначения:

$$\tilde{a}_0 = \begin{bmatrix} \varepsilon_{01} \\ \varepsilon_{02} \end{bmatrix}; \quad \tilde{a} = \begin{bmatrix} -\gamma_{10} F_{10} & 0 \\ 0 & -\gamma_{20} F_{20} \end{bmatrix};$$

$$b_0 = \begin{bmatrix} \sigma_{01}^\alpha & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{02}^\alpha & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad b_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \sigma_{01}^\varepsilon & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{02}^\varepsilon & 0 \end{bmatrix}; \quad b_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \sigma_{01}^\gamma & -\sigma_{01}^\gamma F_{10} \\ 0 & 0 & \sigma_{02}^\gamma & -\sigma_{02}^\gamma F_{20} \end{bmatrix}.$$

Стационарное решение m^* и K^* получается из (12) и (13), если приравнять правые части $\dot{A}^m$ и $\dot{A}^K$ нулю, а условия устойчивости — путем рассмотрения уравнений в вариациях.

6.2. В частном случае, когда

$$F_1(Y_1, Y_2, t) = X_2; \quad F_2(Y_1, Y_2, t) = X_1,$$

уравнения (12) и (13) имеют вид:

$$\dot{m}_1 = \tilde{A}_1^m(m_1, m_2, K_{12}) = \varepsilon_{01}m_1 - \gamma_{01}(m_1m_2 + K_{12}) + \alpha_{01}, \quad m_1(t_0) = m_{10};$$

$$\dot{m}_2 = \tilde{A}_2^m(m_1, m_2, K_{12}) = \varepsilon_{02} - \gamma_{02}(m_1m_2 + K_{12}) + \alpha_{02}, \quad m_2(t_0) = m_{20};$$

$$\begin{aligned} \dot{D}_1 &= \tilde{A}_1^D(m_1, m_2, D_1, K_{12}) = \\ &= 2[(\varepsilon_{10} - \gamma_{10}m_2 + \nu_3\sigma_{03}^\gamma)D_1 - \gamma_{01}m_1K_{12} + \nu_1\sigma_{01}^\alpha], \quad D_1(t_0) = D_{10}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{D}_2 &= \tilde{A}_2^D(m_1, m_2, D_2, K_{12}) = \\ &= -2\gamma_{02}m_2K_{12} + (\varepsilon_{02} - \gamma_{02}m_1 + \nu_4\sigma_{02}^\gamma)D_2 + \nu_2\sigma_{02}^\alpha, \quad D_2(t_0) = D_{20}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{K}_{12} &= \tilde{A}_1^K(m_1, m_2, D_1, D_2, K_{12}) = \\ &= (\varepsilon_{01} + \varepsilon_{02} - \gamma_{01}m_2 - \gamma_{02}m_1)K_{12} - \gamma_{01}m_1D_2 - \gamma_{02}m_2D_1, \quad K_{12}(t_0) = K_{120}. \end{aligned}$$

Уравнения для стационарных режимов

$$\begin{aligned} \tilde{A}_i^m(m_1^*, m_2^*, K_{12}^*) &= 0 \quad (i = 1, 2); & \tilde{A}_1^D(m_1^*, m_2^*, D_1, K_{12}^*) &= 0; \\ \tilde{A}_2^D(m_1^*, m_2^*, D_2, K_{12}^*) &= 0; & \tilde{A}^K(m_1^*, m_2^*, D_1^*, D_2^*, K_{12}^*) &= 0 \end{aligned}$$

представляют собой связанную систему алгебраических уравнений, а их устойчивость изучается на основе уравнений в вариациях, при этом условия устойчивости по m имеют следующий вид:

$$\varepsilon_{01} + \varepsilon_{02} - \gamma_{01}m_2^* - \gamma_{02}m_1^* < 0; \quad \varepsilon_{01}\varepsilon_{02} - \varepsilon_{01}\gamma_{01}m_1^* - \varepsilon_{02}\gamma_{02}m_2^* > 0,$$

а условия устойчивости по совокупности m и K имеют громоздкий вид в случае параметрических возмущений.

7 Заключение

Разработаны два эффективных метода аналитического моделирования эквивалентных нормальных (гауссовских) распределений в многоуровневых ВСтС. Первый метод основан на нормальной аппроксимации для многомерной ВСтС с аддитивными и нелинейными параметрическими гауссовскими и негауссовскими белыми шумами для функций межвидового взаимодействия произвольного вида, в том числе разрывных.

Второй метод основан на статистической линеаризации функций межвидового взаимодействия и сведении исходной ВСтС к эквивалентной ВСтС с аддитивными линейными и параметрическими шумами. В этом случае получена совместная

система уравнений для вероятностных моментов первого и второго порядка. Рассмотрены вопросы аналитического моделирования стационарных регулярных и стохастических режимов.

В качестве тестовых примеров рассмотрены уравнения нелинейного корреляционного аналитического моделирования одной и двух популяций в стохастической среде. Изучены стационарные режимы и их устойчивость.

Дальнейшее развитие методов аналитического моделирования для широкополосных возмущений усматривается в применении методов параметризации одно- и многомерных распределений на основе моментов, семиинвариантов и ортогональных разложений [7, 11–13], а для узкополосных возмущений — на основе методов канонических разложений и интегральных канонических представлений [4].

Литература

1. *Вольтерра В.* Математическая теория борьбы за существование / Пер. с фр. — М.: Наука, 1976. 286 с. (*Volterra V.* Leçons sur la théorie mathématique de la lutte pour la vie. — Paris: Gautiers-Villars, 1931. 222 p.)
2. *Свирижев Ю. М.* Нелинейные волны, диссипативные структуры и катастрофы в экологии. — М.: Наука, 1987. 368 с.
3. *Пугачёв В. С., Сеницын И. Н.* Стохастические дифференциальные системы. Анализ и фильтрация. — 2-е изд. — М.: Наука, 1990. 632 с.
4. *Пугачёв В. С., Сеницын И. Н.* Теория стохастических систем. — М.: Логос, 2000; 2004. 1000 с.
5. *Сеницын И. Н., Сеницын В. И.* Лекции по нормальной и эллипсоидальной аппроксимации в стохастических системах. — М.: ТОРУС ПРЕСС, 2013. 488 с.
6. *Сеницын И. Н.* Аналитическое моделирование распределений с инвариантной мерой в стохастических системах с разрывными характеристиками // Информатика и её применения, 2013. Т. 7. Вып. 1. С. 3–12.
7. *Сеницын 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.
8. *Сеницын И. Н.* Анализ и моделирование распределений в эрмитарных стохастических системах // Информатика и её применения, 2014. Т. 8. Вып. 1. С. 2–11.
9. *Сеницын И. Н.* Аналитическое моделирование распределений с инвариантной мерой в негауссовских дифференциальных и приводимых к ним эрмитарных стохастических системах // Информатика и её применения, 2014. Т. 8. Вып. 2. С. 2–14.
10. *Сеницын И. Н., Сеницын В. И.* Аналитическое моделирование нормальных процессов в стохастических системах со сложными нелинейностями // Информатика и её применения, 2014. Т. 8. Вып. 3. С. 12–18.
11. *Сеницын 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.

12. 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.
13. Синицын И. Н. Методы моментов в задачах аналитического моделирования распределений в нелинейных стохастических системах на многообразиях // Системы и средства информатики, 2015. Т. 25. № 3. С. 24–43.
14. Синицын И. Н. Аналитическое моделирование нормальных процессов в стохастических системах с интегральными нелинейностями (I)–(III) // Системы и средства информатики, 2017. Т. 27. № 1. С. 3–15; № 3. С. 23–36; № 4. С. 16–36.

Поступила в редакцию 05.03.18

ANALYTICAL MODELING OF NORMAL PROCESSES IN VOLTERRA STOCHASTIC SYSTEMS

I. N. Sinitsyn and V. I. Sinitsyn

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

Abstract: For multidimensional differential Volterra stochastic systems (VStS) with Gaussian and non-Gaussian additive and parametric white noises, two efficient methods based on the method of normal approximation and linear parametric StS theory are described. Equations for one- and multidimensional Gaussian distributions are given. Test examples for one and two populations are discussed. Special attention is paid to hereditary VStS. Some generalizations are considered.

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

DOI: 10.14357/08696527180201

Acknowledgments

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

References

1. Volterra, V. 1931. *Leçons sur la théorie mathématique de la lutte pour la vie*. Paris: Gautiers-Villars. 222 p.

2. Svirezhev, Yu. M. 1987. *Nelineynye volny, dissipativnye struktury i katastrofy v ekologii* [Nonlinear waves, dissipative structures, and catastrophe in ecology]. Moscow: Nauka. 368 p.
3. Pugachev, V. S., and I. N. Sinitsyn. 1987. *Stochastic differential systems. Analysis and filtering*. Chichester, New York, NY: John Wiley. 549 p.
4. Pugachev, V. S., and I. N. Sinitsyn. 2001. *Stochastic systems. Theory and applications*. Singapore: World Scientific. 908 p.
5. Sinitsyn, I. N., and V. I. Sinitsyn. 2013. *Lektsii po normal'noy i ellipsoidal'noy approksimatsii v stokhasticheskikh sistemakh* [Lectures on normal and ellipsoidal approximation of distributions in stochastic systems]. Moscow: TORUS PRESS. 488 p.
6. Sinitsyn, I. N. 2013. Analiticheskoe modelirovanie raspredeleniy s invariantnoy meroy v stokhasticheskikh sistemakh s razryvnymi kharakteristikami [Analytical modeling of invariant measure distributions in stochastic systems with discontinuous characteristics]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 7(1):3–12.
7. Sinitsyn, I. N. 2013. Parametricheskoe statisticheskoe i analiticheskoe modelirovanie raspredeleniy v nelineynykh stokhasticheskikh sistemakh na mnogoobraziyakh [Parametric statistical and analytical modeling of distributions in nonlinear stochastic systems on manifolds]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 7(2):4–16.
8. Sinitsyn, I. N. 2014. Analiz i modelirovanie raspredeleniy v ereditarnykh stokhasticheskikh sistemakh [Analysis and modeling of distributions in hereditary stochastic systems]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 8(1):2–11.
9. Sinitsyn, I. N. 2014. Analiticheskoe modelirovanie raspredeleniy s invariantnoy meroy v negaussovskikh differentsial'nykh i privodimykh k nim ereditarnykh stokhasticheskikh sistemakh [Analytical modeling of distributions with invariant measure in non-Gaussian differential and reducible to differential hereditary stochastic systems]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 8(2):2–14.
10. Sinitsyn, I. N., and V. I. Sinitsyn. 2014. Analiticheskoe modelirovanie 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):12–18.
11. Sinitsyn, I. N. 2015. Analiticheskoe modelirovanie raspredeleniy metodom ortogonal'nykh razlozheniy v nelineynykh stokhasticheskikh sistemakh na mnogoobraziyakh [Analytical modeling in stochastic systems on manifolds based on orthogonal expansions]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 9(3):17–24.
12. 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.
13. Sinitsyn, I. N. 2015. Metody momentov v zadachakh analiticheskogo modelirovaniya raspredeleniy v nelineynykh stokhasticheskikh sistemakh na mnogoobraziyakh [Moments methods for analytical modeling of stochastic systems on manifolds]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 25(3):24–43.

14. Sinitsyn, I. N. 2017. Analiticheskoe modelirovanie normal'nykh protsessov v stokhasticheskikh sistemakh s integral'nymi nelineynostyami [Analytical modeling of normal processes in stochastic systems with integral nonlinearities] (I)–(III). *Sistemy i Sredstva Informatiki* — *Systems and Means of Informatics* 27(1):3–15; 27(3):23–36; 27(4):16–36.

Received March 5, 2018

Contributors

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

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

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКОЙ АКТИВНОСТИ ДЛЯ ОЦЕНИВАНИЯ ВЕРОЯТНОСТНО-ВРЕМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

А. В. Борисов¹, А. В. Босов², А. В. Иванов³, Р. Б. Чавтараев⁴

Аннотация: Предложенная ранее методология комплексной оценки надежности информационно-телекоммуникационных систем (ИТКС) дополнена новой методикой оценки характеристик функционирования программного обеспечения (ПО). Она базируется на методе имитационного моделирования. Для применения моделирования в задаче анализа характеристик ПО исследованы следующие вопросы: (1) определена модель программного компонента — исполняющая пользовательские запросы/команды программа, выполненная в трехзвенной архитектуре; (2) определена модель пользовательской активности в форме нелинейной дискретной стохастической системы, объединяющей несколько устойчивых авторегрессий на основе классификации индикаторами состояний процесса; (3) представлено описание программы, обеспечивающей имитацию управляемого потока пользовательских запросов к тестируемому ПО одновременно с фиксацией всех статистических данных, связанных с обработкой ПО этих запросов; (4) приведены рекомендации по выбору параметров модели, проиллюстрированные модельными расчетами.

Ключевые слова: информационно-телекоммуникационная система; программное обеспечение для тестирования; пользовательская активность; вероятностные характеристики надежности; имитационное моделирование; стохастическая система; авторегрессия

DOI: 10.14357/08696527180202

1 Введение

Оценка надежности ИТКС как вновь создаваемых, так и существующих, представляет собой сложную задачу. В ее контексте следует рассматривать набор разнообразных факторов: от характеристик различной аппаратуры до сбоев прикладных программ, приводящих к потерям данных. Как следствие, приходится

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

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

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

⁴Институт проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук, R.Ch@ipiran.ru

привлекать разные методы для их количественного описания. В [1] была предложена опробованная на практике простая, но целостная методика, включающая в себя как традиционные приемы теории массового обслуживания применительно к аппаратному обеспечению ИТКС, так и базовые методы статистики, применяемые в отношении ПО в составе ИТКС. Наряду с преимуществами, обеспечиваемыми простотой и комплексностью предложенного подхода, он не лишен недостатков, а именно: оценка показателей функционирования ПО строится в результате статистического анализа данных, накапливаемых пользователями, эксплуатирующими ПО. На практике доступность этих данных ограничена во времени: реальным полноценным периодом получения этих данных является только этап опытной эксплуатации [2]. Предполагать навыки тестирования ПО у будущих пользователей эквивалентными навыкам профессиональных тестировщиков слишком оптимистично. Другой проблемой является невозможность создания прецедентов реальной пиковой нагрузки: пользователи, эксплуатирующие ПО, мало заинтересованы в дополнительной и зачастую бесплатной работе, связанной с тестированием нового ПО, и поэтому быстрее обеспечивают комфортную для себя минимальную нагрузку, а не напряженный загруженный режим.

К сказанному следует добавить объективные факторы роста сложности и многообразия современного ПО, а также разнообразия применяемых архитектурных решений. Все это заставляет продолжать поиск новых методов анализа надежности функционирования ПО.

В данной работе представлен метод расчета надежности ПО, основанный на имитационном моделировании пользовательской активности. К положительным свойствам этого метода следует отнести возможность сбора нужного объема статистических данных, используемых в дальнейшем при комплексной оценке надежности ИТКС [1], а также возможность количественного и качественного управления нагрузкой на различные компоненты ПО.

Таким образом, имитационное моделирование [3] предлагается использовать одновременно и как средство тестирования, и для объективного оценивания тактико-технических характеристик ПО, а также как инструмент сбора статистики для последующего оценивания надежностных характеристик ПО.

Далее предлагается комплексный подход к задаче анализа функционирования ПО, включающий формальную математическую модель, предложения по выбору ее параметров, рекомендации по формированию тестового набора данных и обсуждение результатов реально выполненного исследования. Кроме того, описан минимальный набор требований к программе (имитатору), позволяющей к такой задаче подступиться.

2 Целевые показатели функционирования

Предлагаемый подход основан на методологии, представленной в [1]. К составу количественных показателей, определяющих надежность программного

обеспечения ИТКС, отнесены: T — среднее время наработки ПО на отказ; S — среднее время восстановления ПО после отказа; R — коэффициент готовности ПО.

Эти показатели естественным образом определяются как среднее для случайных величин: τ — времени безотказного функционирования ПО; σ — времени восстановления функционирования ПО; I — индикатора штатной обработки очередной команды/запроса:

$$I = \begin{cases} 1, & \text{если отказа ПО нет;} \\ 0, & \text{если отказ ПО есть,} \end{cases}$$

а именно:

$$T = M[\tau]; \quad S = M[\sigma]; \quad R = M[I],$$

где $M[\cdot]$ — оператор математического ожидания.

Данные характеристики позволяют:

- сделать квалифицированный формальный вывод о степени соответствия ПО требованиям тактико-технического задания;
- определить нагрузочные пределы применимости тестируемого ПО.

Показатели T , S и R представляют собой моментные характеристики случайных величин. Таким образом, ключевым является предположение о случайном характере действий пользователя, эксплуатирующего ПО. Эта идея не является новой, а лишь обосновывает возможность применения при решении данной прикладной задачи математического аппарата теории систем массового обслуживания.

В [1] для оценки всех перечисленных математических ожиданий предлагается собрать статистику «от пользователей». В процессе проведения опытно-конструкторских работ всегда запланирован этап опытной эксплуатации, на котором ведется журнал опытной эксплуатации. В этом журнале пользователь фиксирует все факты в отношении работы ПО, обеспечивая сбор статистики, по которой в дальнейшем вычисляются оценки количественных показателей.

3 Модель компонента программного обеспечения

Первым шагом в решении поставленной задачи должно стать определение модели программы [4]. Предложить общую универсальную модель для этого, по-видимому, невозможно. В данной работе предлагается исследовать достаточно распространенную трехуровневую архитектуру ПО, реализующую функции информационной системы.

Первый уровень включает множество источников, содержащих интересующую пользователей информацию (баз данных, файлов, сторонних информационных систем). Второй уровень представляет собой выполняемый на центральном узле системы, сервере, программный модуль, который формирует пользовательский интерфейс и обеспечивает преобразование инициируемых пользователями

действий в набор запросов в терминах некоей общей для всех информационных источников модели. Далее этот уровень переводит запросы в термины конкретных информационных источников с учетом их программной реализации, выполняет запросы, получает и консолидирует ответы и осуществляет обновление интерфейса пользователя с учетом этих ответов. Третий уровень представлен веб-браузерами, через которые осуществляется коллективный доступ пользователей к центральному узлу программной системы, отображение пользовательского интерфейса и взаимодействие с ним.

Обобщенно функционирование такой системы сводится к выполнению следующей последовательности действий:

- (1) получение сервером запроса, сформированного в веб-браузере пользователя;
- (2) передача запроса серверному приложению, которое, анализируя поступивший запрос, определяет перечень участвующих в его выполнении информационных источников;
- (3) выполнение запросов к информационным источникам с последующим накоплением и объединением результатов этих запросов;
- (4) формирование HTML-представления результатов обработки запросов и отправка сервером HTML-представления веб-браузеру пользователя.

Для имитации работы пользователей с таким ПО необходимо подготовить описание входных данных, которое должно включать:

- (1) состав экранных форм, для которых выполняется имитация пользовательских запросов/команд;
- (2) состав элементов пользовательского интерфейса для каждой формы;
- (3) перечень типов данных, которые должны вводиться пользователями в элементы пользовательского интерфейса, обязательность наличия таких данных, граничные значения;
- (4) перечень словарных значений для каждого элемента пользовательского интерфейса, принимающего такие значения.

На основе этого описания, используя генераторы псевдослучайных последовательностей, можно сформировать наборы входных данных для всех экранных форм, участвующих в имитации.

Работу пользователя с программной системой предполагается представить следующим простым сценарием:

- (1) открытие требуемой экранной формы;
- (2) заполнение элементов пользовательского интерфейса входными данными;
- (3) инициирование события пользовательского интерфейса, которое приведет к отправке запроса на центральный узел программной системы;
- (4) получение результатов.

Наличие у современных веб-браузеров развитых программных интерфейсов позволяет автоматизировать эти действия. Алгоритм имитации действий пользователя должен включать следующие шаги:

- (1) открытие экранной формы;
- (2) заполнение элементов пользовательского интерфейса элементами набора входных данных;
- (3) программная генерация события пользовательского интерфейса, которое приведет к отправке запроса на центральный узел программной системы;
- (4) определение факта выполнения запроса центральным узлом с возможностью измерения времени выполнения запроса и его результата.

Таким образом, циклически формируя очередной набор входных данных и выполняя алгоритм имитации действий пользователя, можно имитировать работу с ПО в целом. При этом возможно получение сколь угодно высокого уровня нагрузки на программную систему и обеспечивающее ее функционирование оборудование, который не достигается при реальной повседневной работе пользователей. Еще одним достоинством метода является одинаковое «внимание» ко всем экранным формам ввода в отличие от повседневных задач пользователей, когда часть форм используется редко или не используется вообще.

Сбор данных, необходимых для получения оценок производительности и надежности системы, также может быть автоматизирован.

4 Модель пользовательской активности

Ожидаемая активность пользователей, т.е. число их текущих обращений к исследуемому ПО, является важным фактором, определяющим требования к ИТКС. Значительная часть технических решений, используемых при разработке ПО ИТКС, так или иначе связана с обеспечением эффективности использования вычислительных ресурсов при номинальной нагрузке и сохранением работоспособности при высокой нагрузке.

Активности пользователей присущи две отличительные особенности:

- (1) наличие явно выраженного периодического изменения активности (в реальных наблюдениях можно видеть суточные изменения активности (день/ночь), недельные (рабочие/выходные дни) и годовые);
- (2) наличие спонтанных всплесков активности.

Представляется целесообразным выделить три уровня активности:

- малой активности, соответствующий нерабочему времени дня или выходным дням;
- средней активности, соответствующий повседневной работе;
- пиковой активности, соответствующий максимальной нагрузке на программную систему.

Три данных уровня, а также время нахождения на них должны быть учтены в модели активности пользователей. Кроме того, следует учесть факт коллективной работы пользователей. Подобный тип работы сопровождается выполнением ими определенного объема действий, пересекающихся во времени.

Для создания модели пользовательской активности воспользуемся идеями из [5]. В модели будем использовать дискретное время, а именно: интервал наблюдения $[t_0, +\infty)$ разобьем на отрезки $t_0 < t_1 < \dots < t_{n-1} < t_n < \dots$ равной длины. Длину интервала $t_n - t_{n-1}$ удобно считать равной 1 мин, имея в виду, что в дальнейшем параметризация модели потребует определения среднего числа пользовательских действий. Естественно, что длина интервала может быть выбрана и любой другой, но в любом случае она не должна быть больше предполагаемого периода пиковой активности. Вместе с тем, она должна существенно превышать длительность выполнения ПО типичного действия пользователя.

На текущем интервале $(t_{n-1}, t_n]$ будем моделировать общее число пользовательских обращений к анализируемому ПО. Обозначим это число Z_{t_n} . Согласно исследованиям [5] эволюцию Z_{t_n} допустимо описывать уравнением авторегрессии первого порядка:

$$Z_{t_n} = aZ_{t_{n-1}} + q + bw_{t_n} \quad (1)$$

в предположении, что среднее число действий определяется постоянными коэффициентами a и q , а возмущение w_{t_n} моделирует возможные отклонения от этого среднего. Однако такая модель не может быть признана адекватной, например из-за наличия упомянутых выше спонтанных всплесков активности пользователей [6]. Этот эффект и другие обстоятельства принципиальной смены характера пользовательской активности предложено учитывать, выделяя три упомянутых уровня активности.

Для учета этого предложения в математической модели воспользуемся идеей классификации [5] рассматриваемого показателя Z_{t_n} . Обозначим три режима интенсивности поступления действий:

- (1) θ_n — малой активности пользователей;
- (2) θ_o — средней активности;
- (3) θ_b — высокой активности.

В предположении, что в конкретном режиме число запросов Z_{t_n} описывается своим уравнением авторегрессии первого порядка, получаем вместо (1) эволюционную модель на основе индикаторов:

$$Z_{t_n} = a \begin{pmatrix} I(\text{режим } \theta_n) \\ I(\text{режим } \theta_o) \\ I(\text{режим } \theta_b) \end{pmatrix} Z_{t_{n-1}} + q \begin{pmatrix} I(\text{режим } \theta_n) \\ I(\text{режим } \theta_o) \\ I(\text{режим } \theta_b) \end{pmatrix} + b \begin{pmatrix} I(\text{режим } \theta_n) \\ I(\text{режим } \theta_o) \\ I(\text{режим } \theta_b) \end{pmatrix} w_{t_n}, \quad (2)$$

где вектор-строки $a = (a_n, a_o, a_b)$ и $q = (q_n, q_o, q_b)$ определяют среднее число действий, характерное для соответствующего режима; w_{t_n} — возмущение,

характеризующее отклонения числа пользовательских запросов от среднего; $b = (b_n, b_o, b_v)$ — масштабирующая вектор-строка. Индикаторные функции $I(\text{режим } \theta)$ в (2) принимают значение 1, если текущий режим активности θ , и 0 — в противном случае.

В предложенном описании открытым остался только вопрос о математической модели для описания во времени эволюции уровня активности пользователей θ . Простейший вариант представляется следующим. Наряду со значениями среднего числа команд/запросов и уровнями их отклонения естественным элементом параметризации модели можно считать частоту наблюдения каждого режима, т. е. считать известными вероятности p_n , p_o и p_v пребывания ИТКС в соответствующем режиме в данный момент времени. Тогда на каждом шаге моделирования индикатор $I(\text{режим } \theta)$ можно разыгрывать как независимую случайную величину, принимающую дискретные значения θ_n , θ_o и θ_v с вероятностями p_n , p_o и p_v . У этого допущения есть хорошее теоретическое обоснование и полезные свойства. В [7] модель (2) исследована подробно и показано, что при достаточно общих предположениях она обладает свойством эргодичности. Таким образом, предположение о существовании констант p_n , p_o и p_v , задающих частоты для режимов активности, вполне обоснованно. Однако принять такой способ моделирования режимов нельзя из-за спонтанных переходов из режима в режим, никак не связанных с текущим значением основного показателя Z_{t_n} . Так, при большом значении $Z_{t_{n-1}}$, свидетельствующем, что имеет место всплеск активности, может оказаться смоделированным режим θ_n , а в нем окажется неоправданно большим значение Z_{t_n} , не соответствующее представлениям о режиме «бездействия». Таким образом, изменения Z_{t_n} и θ должны быть согласованными в некотором смысле. С этой целью предлагается воспользоваться идеей, предложенной в [6], а именно: задать индикаторную функцию $I(\text{режим } \theta)$ путем разбиения области значений процесса Z_{t_n} на непересекающиеся интервалы и определения соответствия каждому режиму активности одного интервала. Например, можно определить три интервала Δ_n , Δ_o и Δ_v и ввести вектор-функцию определения режима активности следующего вида:

$$\Theta(Z_{t_n}) = \begin{pmatrix} I(\text{режим } \theta_n) \\ I(\text{режим } \theta_o) \\ I(\text{режим } \theta_v) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I(Z_{t_n} \in \Delta_n) \\ I(Z_{t_n} \in \Delta_o) \\ I(Z_{t_n} \in \Delta_v) \end{pmatrix}.$$

Таким образом, в качестве модели, описывающей динамику показателя активности пользователей, предлагается использовать следующую стохастическую динамическую систему:

$$Z_{t_n} = a\Theta(Z_{t_{n-1}})Z_{t_n} + q\Theta(Z_{t_{n-1}}) + b\Theta(Z_{t_{n-1}})w_{t_n}, \quad n = 1, 2, \dots \quad (3)$$

Распределение стандартного дискретного белого шума w_{t_n} будем считать гауссовским, традиционно апеллируя к центральной предельной теореме [8] и предположению о большом числе пользователей системы, «однородности» их запросов и независимости их действий.

5 Имитационное моделирование

5.1 Формирование пакета запросов

В предложенной модели остается определить набор параметров a , q и b , чему посвящен следующий раздел. Здесь же обсуждаются финальные составляющие представленной методики анализа функционирования ПО. Это программа-имитатор и пакет запросов.

Программа-имитатор, как отмечалось выше, определяется принимаемой моделью анализируемого компонента ПО. Предложения, сделанные выше в этой части, основывались на имеющемся опыте применения в ИТКС Информационного веб-портала, разработанного авторами ПО [9], и исследований его функционирования [10]. Именно для портала разработана программа-имитатор, выполняющая сценарии, определенные в разд. 3, и обеспечивающая следующие возможности:

- формирование потока событий в соответствии с предложенной моделью пользовательской активности и выполнение имитации действий пользователей для каждого такого события;
- использование программных интерфейсов автоматизации веб-браузера для имитации действий пользователя (поскольку пользователями также используется веб-браузер, взаимодействие с тестируемым ПО практически не отличается от работы с ним пользователей);
- имитация коллективной работы пользователей за счет запуска и управления несколькими экземплярами веб-браузера;
- протоколирование результатов выполнения циклов имитации (тестируемая форма, значения набора входных данных, время выполнения запроса, результат выполнения запроса).

Для настройки программы-имитатора на конкретное ПО используется описание в формате XML, содержащее перечень форм и их полей. Для каждой формы указывается URL, по которому доступна форма, идентификатор формы и вероятность выбора формы (значение от 0 до 1). Для каждого поля формы указываются идентификатор поля, формируемый тестируемым ПО, тип поля (например, текстовое поле, флажок, кнопка), вероятность заполнения поля (значение от 0 до 1) и идентификатор генератора случайных значений, предоставляющего значения для подстановки в поле ввода.

Чтобы в процессе имитации тестируемое ПО обеспечивало формирование пакетов запросов, содержание которых было бы приближено к реальной работе пользователей, предлагаются два подхода:

- (1) значения полей ввода формируются с использованием генераторов псевдослучайных последовательностей, но с рядом ограничений на диапазон принимаемых значений;

- (2) значения полей ввода формируются на основе протоколов работы реальных пользователей.

Первый подход реализован в программе-имитаторе. Для каждого поля ввода возможно задание собственного генератора псевдослучайных последовательностей. Значения, формируемые генератором, могут иметь следующие типы: строка, строка с шаблоном, число, диапазон дат. Генератор значений типа «строка» использует словарь значений, элементы которого выбираются на основе псевдослучайного значения. Генератор значений типа «строка с шаблоном» использует шаблон, который позволяет на указанной позиции строки сформировать букву русского или латинского алфавита или цифру. Генератор значений типа «число» формирует число в заданном диапазоне. Генератор значений типа «диапазон дат» формирует пару значений типа «дата», определяющих диапазон дат и лежащих в заданном диапазоне. Используя ограничения на диапазоны значений и задавая вероятности заполнения полей в соответствии с ожидаемой частотой их использования, можно настраивать содержание формируемых запросов.

Второй подход предполагает детальное протоколирование реальных действий пользователей, формируемых ими при обучении работе с ПО, при проведении опытной эксплуатации. В дальнейшем эти протоколы могут использоваться в качестве исходных данных при имитации работы пользователей. Этот вариант менее удобен, так как, во-первых, предполагает участие пользователей в формировании наборов входных данных, а во-вторых, требует вмешательства в разрабатываемое ПО с целью внедрения механизмов протоколирования. Однако в некоторых случаях можно отказаться от протоколирования собственно действий, заменив их протоколированием уже сформированных запросов, что уменьшает объем требуемых модификаций. В частности, такой подход был применен при исследовании функционирования Информационного веб-портала: на основе реальных запросов пользователей формировались словари, используемые программой-имитатором.

5.2 Некоторые результаты моделирования

Для завершения исследования остается дать рекомендации по определению набора параметров a , q и b и выбору интервалов Δ_n , Δ_o и Δ_b . Сразу отметим, что содержание данного раздела — именно рекомендации по подбору значений параметров, с тем чтобы отразить в модели пользовательской активности представления эксперта и/или тестировщика о вероятностных и количественных характеристиках этого процесса. Если же ставится вопрос оценивания этих параметров на основании фактических данных, реальных наблюдений, сформированных в результате мониторинга за действиями пользователей в функционирующей ИТКС, то такой вопрос требует совершенно других подходов. Например, к такой задаче можно применять методы параметрической идентификации и решать задачи оценивания так, как сделано в [11]. Но такой подход требует от разработчика совершенно другого уровня математических

компетенций, совершенно необязательного, как представляется, для получения качественного результата в той задаче, что решается в данной работе, т. е. в задаче анализа функционирования, определения количественных характеристик качества работы конкретного ПО.

Учитывая сказанное, заметим, что параметры a и q характеризуют величину среднего числа пользовательских запросов в выбранную единицу времени, характерную для каждого из режимов. Так, предполагая каждую из авторегрессий устойчивой ($|a_i| < 1$, $i = \text{н, о, в}$), можно считать, что в i -м режиме в среднем формируется $M[Z_{t_n}|i] = q_i/(1 - a_i)$ запросов. Кроме того, величину a_i можно интерпретировать как корреляцию числа запросов на $(n-1)$ -м и n -м шаге. Далее уместно предположить, что эти числа положительно коррелированы, а изменения в числе запросов от шага к шагу не слишком большие, обладают значительной инертностью. К примеру, можно положить все $a_i = 0,9$, а для среднего числа запросов выбрать величины $M[Z_{t_n}|\text{н}] = 5$, $M[Z_{t_n}|\text{о}] = 55$ и $M[Z_{t_n}|\text{в}] = 100$. При этом получаются интуитивно понятные интервалы $-\infty < 10 < 100 < +\infty$, т. е. $\Delta_{\text{н}} = (-\infty; 10]$, $\Delta_{\text{о}} = (10; 100]$, $\Delta_{\text{в}} = (100; +\infty]$. Это означает, что в режиме низкой интенсивности в единицу времени формируется не более 10 запросов, в повседневном режиме — 10–100, а в режиме повышенной интенсивности — существенно (в 3–7 раз) больше, чем максимальные значения в повседневном режиме. Значения q_i получаются такими: $q_i = (1 - a_i)M[Z_{t_n}|i]$; $q_{\text{н}} = 0,5$; $q_{\text{о}} = 5,5$; $q_{\text{в}} = 50$.

Отметим, что отрицательные возможные значения Z_{t_n} , появляющиеся в режиме низкой интенсивности, порождены предположением о гауссовском распределении белого шума w_{t_n} . При фактическом моделировании вероятность таких значений оказывается незначительной, а программой-имитатором такие Z_{t_n} просто не учитываются — считается, что в соответствующий диапазон времени пользователями не сформировано запросов, т. е. (4) дополняется преобразованием $Z_{t_n} = \max(0, Z_{t_n})$.

Параметр b , определяющий интенсивность возмущения w_{t_n} , здесь используется для формирования вероятностей $p_{\text{н}}$, $p_{\text{о}}$ и $p_{\text{в}}$ или частот режимов активности. Учитывая свойство эргодичности обсуждаемого процесса (4) и существование предельного распределения, возможность вычисления этих вероятностей имеется. Однако предельное распределение достаточно нетривиально и вычислить его аналитически не представляется возможным, поэтому предлагается воспользоваться имитационным моделированием. Задавая разные значения b и выполняя моделирование пучка траекторий процесса (4), можно оценить $p_{\text{н}}$, $p_{\text{о}}$ и $p_{\text{в}}$ методом Монте Карло, проанализировать характерные траектории Z_{t_n} и форму предельного распределения. Некоторые результаты расчетов приведены далее: для $b_{\text{н}}$, $b_{\text{о}}$ и $b_{\text{в}}$ приводятся $p_{\text{н}}$, $p_{\text{о}}$ и $p_{\text{в}}$, фрагмент характерной траектории и гистограмма плотности вероятности (рис. 1–3).

Как видно из модельных примеров, даже приведенные простейшие предположения относительно параметров (4) позволяют эксперту/тестирующему гибко выбирать и варьировать режимы имитации пользовательской активности.

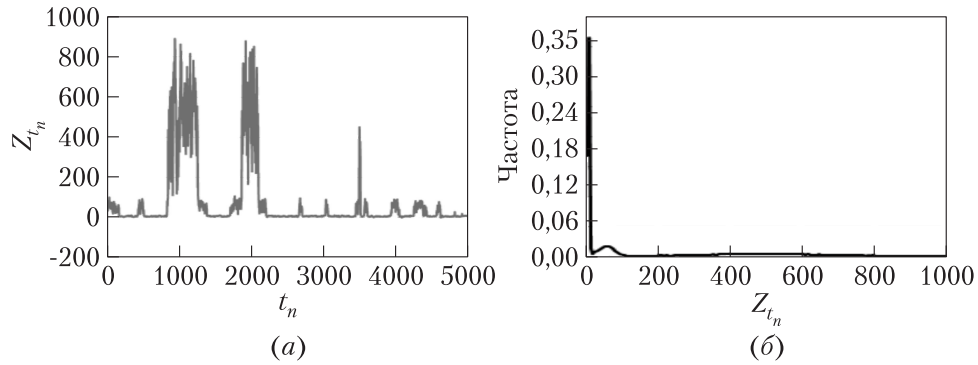


Рис. 1 Фрагмент траектории (а) и гистограмма (б) для $b_n = 16$, $b_o = 106$, $b_b = 756$, $p_n = 0,66$, $p_o = 0,17$ и $p_b = 0,17$

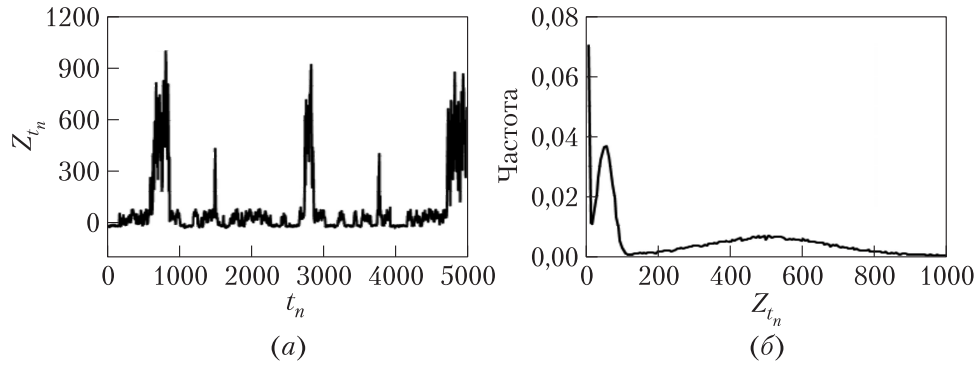


Рис. 2 Фрагмент траектории (а) и гистограмма (б) для $b_n = 2$, $b_o = 10$, $b_b = 75$, $p_n = 0,22$, $p_o = 0,42$ и $p_b = 0,36$

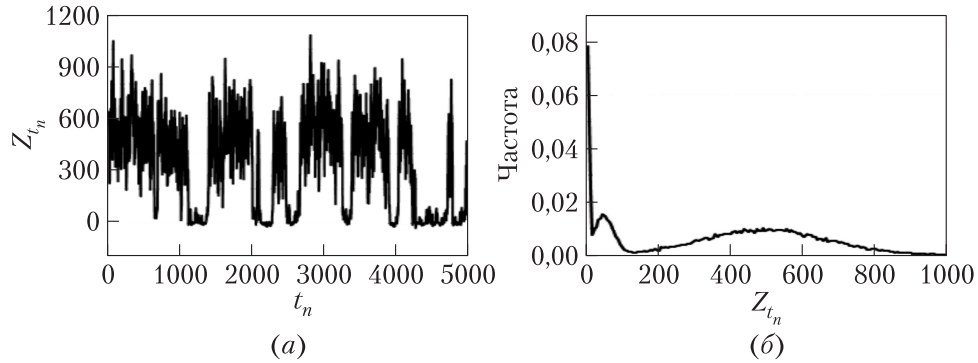


Рис. 3 Фрагмент траектории (а) и гистограмма (б) для $b_n = 3$, $b_o = 15$, $b_b = 75$, $p_n = 0,20$, $p_o = 0,16$ и $p_b = 0,54$

6 Заключение

Фокус данной работы направлен на практическое решение задачи оценивания надежности программного обеспечения ИТКС. Опорной идеей предложенного метода является имитационное моделирование пользовательской активности. С этой целью предложена апробированная ранее математическая модель, представляющая собой комбинацию простейших авторегрессий и процесса переключения с одной регрессии (режима) на другую. Особенностью модели является то, что порядок переключения индуцируется самим процессом путем привязки его значений к заданным интервальным индикаторам. На примерах показано, что простым подбором параметров модели можно добиться широкой вариативности имитируемых режимов пользовательской активности. Соответственно, модель и программа-имитатор, ее реализующая, позволяют оценивать надежность ПО в составе ИТКС без привлечения к деятельному участию в этом пользователей, что и ставилось основной задачей. При этом удается добиться и других целей. Так, предложенная методика хорошо зарекомендовала себя как способ нагрузочного тестирования программ. В дальнейшем на ее основе планируется разработать комплексную информационную технологию оценки надежностных и временных характеристик ПО, а также выработки рекомендаций по численному составу эксплуатирующего персонала.

Литература

1. Борисов А. В., Босов А. В., Иванов А. В., Корепанов Э. Р. К вопросу расчета надежности информационно-телекоммуникационных систем: учет характеристик программного обеспечения // Системы и средства информатики, 2018. Т. 28. № 1. С. 20–34.
2. ГОСТ 34.601-90. Автоматизированные системы. Стадии создания. — М.: Стандартинформ, 2009. 5 с.
3. Ивахненко А. Г., Юрачковский Ю. П. Моделирование сложных систем по экспериментальным данным. — М.: Радио и связь, 1987. 120 с.
4. Неуймин Я. Г. Модели в науке и технике. История, теория и практика. — Л.: Наука, 1984. 190 с.
5. Иванов А. В. Математические модели базовых процессов функционирования Информационного web-портала // Системы и средства информатики, 2010. Т. 20. № 1. С. 106–132.
6. Kharif O. Less impact from the “Slashdot Effect” // Bloomberg Business Week, March 2, 2005.
7. Босов А. В. Задачи анализа и оптимизации для модели пользовательской активности. Часть 1. Анализ и прогнозирование // Информатика и её применения, 2011. Т. 5. Вып. 4. С. 40–52.
8. Ширяев А. Н. Вероятность. — М.: Наука, 1979. 574 с.
9. Информационный Web-портал. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2005612992 от 18.11.2005.

10. Босов А. В. Моделирование и оптимизация процессов функционирования Информационного web-портала // Программирование, 2009. № 6. С. 53–66.
11. Борисов А. В., Босов А. В., Стефанович А. И. Оптимальное оценивание показателей функционирования информационного web-портала // Автоматика и телемеханика, 2010. № 3. С. 16–33.

Поступила в редакцию 09.01.18

MONTE CARLO BASED USER ACTIVITY SIMULATION FOR SOFTWARE PERFORMANCE EVALUATION

A. V. Borisov, A. V. Bosov, A. V. Ivanov, and R. B. Chavtaraev

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 methodology of estimation of reliability characteristics of computer networks proposed earlier is supplemented with a new technique for estimating the software performance metrics. The proposed technique is based on the Monte-Carlo simulation method. To apply simulation in the task of analyzing software metrics, the following problems are solved: (i) a model of the software component is defined — a program that implements a three-tier architecture and executes user queries or commands; (ii) a model of user’s activity is defined — a nonlinear discrete-time stochastic system based on the autoregressive model with switching using classification of process states; (iii) a simulation program is described that implements the model of user requests, generates the user requests flow, and collects statistics; and (iv) numerical examples illustrating the method’s applicability are provided. The concluding remarks contain recommendations concerning further usage of the presented method.

Keywords: computer networks; software testing tools; user’s activity; reliability characteristics; Monte Carlo method; discrete-time stochastic system; autoregression

DOI: 10.14357/08696527180202

References

1. Borisov, A. V., A. V. Bosov, A. V. Ivanov, and E. R. Korepanov. 2018. K voprosu rascheta nadezhnosti informatsionno-telekommunikatsionnykh sistem: uchet kharakteristik programmnogo obespecheniya [To the reliability of an information-telecommunication system: An approach to recognition of reliable software characteristics]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 28(1):20–34.
2. GOST 34.601-90. 2009. Avtomatizirovannye sistemy. Stadii sozdaniya [Information technology. Set of standards for automated systems. Stages of development]. Moscow: Standardinform Publs. 5 p.

3. Ivakhnenko, A. G., and Yu. P. Yurachkovskiy. 1987. *Modelirovanie slozhnykh sistem po eksperimental'nykh dannym* [Modeling of complex systems based on experimental data]. Moscow: Radio i Svyaz'. 120 p.
4. Neuymn, Ya. G. 1984. *Modeli v nauke i tekhnike. Istoriya, teoriya i praktika* [Models in science and technology. History, theory, and practice]. Leningrad: Nauka. 190 p.
5. Ivanov, A. V. 2010. Matematicheskie modeli bazovykh protsessov funktsionirovaniya Informatsionnogo web-portala [Mathematical models for basic functioning process of an Informational web portal]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 20(1):106–132.
6. Kharif, O. March 2, 2005. Less impact from the “Slashdot Effect.” *Bloomberg Business Week*.
7. Bosov, A. V. 2011. Zadachi analiza i optimizatsii dlya modeli pol'zovatel'skoy aktivnosti. Chast' 1. Analiz i prognozirovanie [Analysis and optimization problems for some users activity model. Part 1. Analysis and prediction]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 5(4):40–52.
8. Shiryaev, A. N. 1984. *Probability*. New York: Springer-Verlag. 578 p.
9. Informatsionnyy Web-portal. Svidetel'stvo ob ofitsial'noy registratsii programmy dlya EVM No. 2005612992 [Information Web-portal. Certificate of official registration of the computer program No. 2005612992]. Registered in the Register of Computer Programs on November 18, 2005.
10. Bosov, A. V. 2009. Modeling and optimization of functioning of the Information web portal. *Programming Computer Software* 35(6):340–350.
11. Borisov, A. V., A. V. Bosov, and A. I. Stefanovich. 2010. Optimal estimates for the operating parameters of an Information web portal. *Automat. Rem. Contr.* 71(3):379–394.

Received January 9, 2018

Contributors

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

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

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

Chavtaraev Rustam B. (b. 1972) — principal specialist, 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; RCh@ipiran.ru

ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ НА ОСНОВЕ МЕТАДАННЫХ В КОМПОНЕНТНО-ИНТЕГРАЦИОННЫХ АРХИТЕКТУРАХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ*

А. А. Грушо¹, М. И. Забейхайло², Н. А. Грушо³, Е. Е. Тимонина⁴

Аннотация: Рассматривается архитектура информационной безопасности (ИБ) на основе метаданных для систем с интеграционной шиной. Метаданные сосредоточены в одном из компонентов, связанных с интеграционной шиной. В процессе распространения данных между задачами интеграционная шина обращается к метаданным с информацией, от какой задачи информационной технологии передаются данные. Полученная информация от компонента метаданных позволяет фильтровать допустимые взаимодействия с другими компонентами или инициировать допустимые взаимодействия. Разрешительная система взаимодействий на основе метаданных согласуется с компонентно-интеграционной архитектурой информационной системы.

Ключевые слова: информационная безопасность; метаданные; компонентно-интеграционная архитектура информационной системы; интеграционная шина

DOI: 10.14357/08696527180203

1 Введение

Анонсированные большие программы развития информатики (например, цифровая экономика) требуют новых подходов к организации обеспечения ИБ. На практике информационные технологии, требующиеся для развития бизнеса, имеют приоритет перед ИБ. В этом случае технологии ИБ могут только подстраиваться (если возможно) под реализации информационных технологий. Кроме того, по мнению авторов, проблематично:

- (1) для обеспечения ИБ создавать всегда свое прикладное программное обеспечение (ПО), а не пользоваться импортным ПО;

*Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект 18-07-00274).

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

²Вычислительный центр им. А. А. Дородницына Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук, m.zabekhailo@yandex.ru

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

⁴Институт проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук, eltimon@yandex.ru

- (2) разбираться в закрытом коде импортного ПО на предмет поиска недеklarированных возможностей (НДВ);
- (3) ждать обеспечения компьютеров и сетевого оборудования собственными адекватными процессорами;
- (4) сокращать пропасть между скоростью построения информационных технологий и существующими способами обеспечения их ИБ.

Поэтому часто эти проблемы игнорируются, что порождает большое число архитектурных уязвимостей [1]. Что мешает игнорировать эти проблемы, но делать информационные системы безопасными?

Хорошо изолированный от внешнего мира компьютер с небезопасными импортными приложениями является безопасным. Однако такая изоляция практически невозможна, так как необходимо информационное взаимодействие отдельных компьютеров и приложений для реализации сложных информационных технологий. Таким образом, первая проблема была бы решена, если бы было возможно разрешить противоречие между изолированностью и необходимостью взаимодействий.

Согласно отечественной нормативной базе анализ закрытого кода необходим в связи с потенциальной возможностью наличия в коде НДВ, или проще — вредоносного кода. Однако вредоносный код не может обладать разносторонним глубоким «интеллектом» [2]. Функционал вредоносного кода ограничен, но если есть возможность его взаимодействия с внешним противником, то, используя неинтеллектуальный вредоносный код, можно создать предметно-ориентированные закладки. В этом случае предметно-ориентированный вредоносный код может нанести значительный ущерб. Опять можно прийти к выводу, что проблема связана с негативными взаимодействиями.

Закладки в микропроцессорах опасны прежде всего тем, что они являются невыявляемыми, а вредоносный код в этих закладках может контролировать любые компоненты компьютера, включая систему внешних коммуникаций. Тем самым опасность закладок в микропроцессорах в значительной степени связана с взаимодействием с внешним противником.

Предположим, что можно создать систему контроля всех взаимодействий. Тогда сертификации по требованиям безопасности [3] может подлежать только эта система, а все импортные компоненты можно не сертифицировать. Если система контроля взаимодействий может обладать значительной гибкостью, то ее можно сертифицировать по требованиям безопасности и с соответствующей адаптацией использовать в различных информационных системах и новых информационных технологиях. Это позволит убрать пропасть между скоростью построения информационных технологий и обеспечением их ИБ.

Из вышесказанного следует, что для обеспечения ИБ современных информационных систем необходимо эффективно и безопасно контролировать взаимодействия компонентов этих систем. Будем считать, что взаимодействия сводятся

к обмену данными, командам запуска и останова программ. Тогда сформулированная задача контроля сводится к разрешению обмена данными и проверке содержания этих данных. Отметим, что для решения этой задачи необходима организация управления этими взаимодействиями. Анализ содержания данных широко исследуется в литературе, например: DPI (Deep Packet Inspection), IDS (Intrusion Detection System), DLP (Data Loss Prevention) (см., например, [4]), и в данной работе не рассматривается. Для контроля и управления взаимодействиями во многих случаях можно использовать метаданные [5–7].

2 Метаданные

Информационные системы обеспечивают поддержку информационных бизнес-процессов. Для реализации в компьютерных системах строятся математические модели бизнес-процессов, которые реализуются с помощью некоторого набора информационных технологий. Информационные технологии реализуются через прикладные программные системы, которые решают задачи. В работе [8] приводится содержательный анализ понятий «задача» и «составная задача».

Для задачи A обозначим функционал преобразования данных через $\pi(A)$. Для выполнения преобразования данных в задаче A необходимо обеспечить $\pi(A)$ исходными данными и значениями конфигурационных параметров функционала. Эти данные надо получить извне. Кроме того, необходимо распределить результаты преобразования входной информации или сохранить эти данные в памяти. Объединение этих функций организации решения задачи A будем обозначать через $\varphi(A)$. Таким образом, задача A определяется как пара $(\pi(A), \varphi(A))$.

Далее обобщим это определение на случай, когда задача A состоит из нескольких задач $\{B_1, B_2, \dots, B_s\}$.

Согласно введенному выше определению $A = (\pi(A), \varphi(A))$, а $B_i = (\pi(B_i), \varphi(B_i))$, $i = 1, \dots, s$.

Положим по определению, что составная задача $A = \{B_1, B_2, \dots, B_s\}$ тогда и только тогда, когда выполняются следующие условия.

1. Функционал множества $\{\pi(B_i), i = 1, \dots, s\}$ покрывает функционал $\pi(A)$.
2. Объект $\varphi(A)$ имеет возможность взаимодействия с каждым из объектов $\{\varphi(B_i), i = 1, \dots, s\}$:
 - (а) для получения и передачи всех входных данных для каждой задачи B_i , $i = 1, \dots, s$;
 - (б) распределения всех выходных данных задач B_i , $i = 1, \dots, s$, которые должны быть определены в задаче A ;
 - (в) определения порядка выполнения задач B_i , $i = 1, \dots, s$, для решения задачи A ;
 - (г) связи задач B_i , $i = 1, \dots, s$, между собой.

Это определение сходно с клиент-серверной архитектурой, в которой клиенты B_i организуют свою работу под управлением сервера $\varphi(A)$.

Отметим, что в дальнейшем будет использоваться аналогия клиент-серверной архитектуры с составной задачей.

Из приведенных определений следует, что любая информационная технология может рассматриваться как составная задача. С любой составной задачей A можно связать множество $c(A)$, которое состоит из идентификаторов ее непосредственных подзадач, включая идентификатор самой задачи A . Вся информация о взаимодействиях задачи A со своими подзадачами и подзадач задачи A с их подзадачами содержится в объектах φ . Отсюда следует, что множество объектов φ может служить разрешительной системой для взаимодействий, реализующих информационную технологию.

Однако использование этих объектов φ является трудоемким и не всегда реализуемым. Поэтому в качестве метаданных можно использовать некоторое огрубление, представляющее собой класс множеств $\{c(A)\}$ для всех составных задач информационной технологии [8]. В этом случае, если текущий вычислительный процесс, реализующий информационную технологию, перешел к задаче A , разрешенными считаются взаимодействия в множестве $c(A)$.

3 Компонентно-интеграционная архитектура информационной системы и ее информационная безопасность

Рассмотрим, каким образом разрешительная система с помощью метаданных может вписаться в архитектуру корпоративной информационной системы. В качестве примера рассмотрим компонентно-интеграционную архитектуру информационной системы [9].

Компоненты представляют собой задачи или составные задачи. Реализация этих задач возможна с помощью приложений различных производителей. Объединение задач происходит с помощью транспортного слоя, который называется интеграционной шиной [9]. Взаимодействия приложения с интеграционной шиной осуществляются с помощью адаптеров. Интеграционная шина может опираться на сеть. Однако интеграционная шина является более сложным объектом, чем сеть, так как через нее обеспечивается взаимодействие различных приложений, включенных в информационную технологию. Одной из важнейших задач интеграционной шины является выполнение требований синхронизации вычислительных процессов.

Отметим, что интеграционная шина обеспечивает доставку данных в такой форме, которая может восприниматься разными адаптерами. Адаптеры приложений преобразуют данные, поступающие с интеграционной шины, на язык приложений, которые они обслуживают. Точно так же существует обратный процесс преобразования выходных данных приложений на язык интеграционной шины.

Рассмотрим архитектуру ИБ для систем с интеграционной шиной на основе метаданных. Предположим, что метаданные сосредоточены в одном из компонентов, связанных с интеграционной шиной. Этот компонент передает адаптерам других компонентов информацию о текущих разрешениях взаимодействий в зависимости от состояния реализации информационной технологии. В процессе распространения данных между задачами интеграционная шина обращается к адаптерам с указанием, от какой задачи информационной технологии передаются данные. Полученная информация от компонента метаданных позволяет фильтровать допустимые взаимодействия с другими компонентами или инициировать допустимые взаимодействия. Таким образом, разрешительная система взаимодействий на основе метаданных идеально согласуется с компонентно-интеграционной архитектурой информационной системы.

Детализация взаимодействий задач и подзадач определяется множеством адаптеров, замыкающихся на интеграционную шину. Те подзадачи, которые не замыкаются на интеграционную шину, решаются в рамках отдельных компонентов.

4 Заключение

В [5–7] приведены примеры управления сетевыми соединениями с помощью метаданных. В данной работе рассмотрена проблема динамического контроля взаимодействий различных приложений, объединенных на основе компонентно-интеграционной архитектуры информационной системы.

Показано, что генерация метаданных и их использование разделены в рамках информационной системы. Это позволяет говорить о хорошей изоляции подсистемы генерации метаданных. Надежное управление взаимодействиями определяется также надежностью и безопасностью интеграционной шины, которая отделена от небезопасных приложений с помощью адаптеров. Адаптеры при дополнительном функционале могут быть использованы в качестве межсетевых экранов высокого уровня для взаимодействия небезопасных компонентов с интеграционной шиной.

Таким образом, в построенной архитектуре использован принцип максимальной изоляции небезопасных компонентов от критической инфраструктуры информационной системы.

Литература

1. Грушо А. А., Грушо Н. А., Тимонина Е. Е., Шоргин С. Я. Архитектурные уязвимости распределенных информационно-вычислительных систем // Системы и средства информатики, 2016. Т. 26. № 3. С. 74–82.
2. Грушо А. А., Грушо Н. А., Тимонина Е. Е. Методы защиты информации от атак с помощью скрытых каналов и враждебных программно-аппаратных агентов в распределенных системах // Вестн. РГГУ. Сер. Документоведение и архивоведение.

- Информатика. Защита информации и информационная безопасность, 2009. Т. 10. С. 33–45.
3. Об утверждении требований о защите информации, не составляющей государственную тайну, содержащейся в государственных информационных системах: Приказ ФСТЭК России от 11 февраля 2013 г. № 17. <https://fstec.ru/normotvorcheskaya/akty/53-prikazy/702>.
 4. *Vacca J. R.* Computer and information security handbook. — Morgan Kaufman Publ., 2009. 877 p.
 5. *Grusho A. A., Timonina E. E., Shorgin S. Ya.* Modelling for ensuring information security of the distributed information systems // 31st European Conference on Modelling and Simulation Proceedings. — Dudweiler, Germany: Digitaldruck Pirrot GmbH, 2017. P. 656–660. http://www.scs-europe.net/dlib/2017/ecms2017acceptedpapers/0656-probstat_ECMS2017_0026.pdf.
 6. *Grusho A., Grusho N., Zabezhalo M., Zatsarinny A., Timonina E.* Information security of SDN on the basis of Meta Data // Computer Network Security / Eds. J. Rak, J. Bay, I. V. Kotenko, L. J. Popyack, V. A. Skormin, K. Szczypiorski. — Lecture notes in computer science ser. — Springer, 2017. Vol. 10446. P. 339–347. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-65127-9_27.
 7. *Grusho A., Timonina E., Shorgin S.* Security models based on stochastic Meta Data // Analytical and computational methods in probability theory / Eds. V. V. Rykov, N. D. Singpurwalla, A. M. Zubkov. — Lecture notes in computer science ser. — Springer, 2017. Vol. 10684. P. 388–400. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-71504-9_32.
 8. *Грушо А. А., Тимонина Е. Е., Шоргин С. Я.* Иерархический метод порождения метаданных для управления сетевыми соединениями // Информатика и её применения, 2018 (в печати). Т. 12. № 2.
 9. *Забезжайло М. И.* Банковский бизнес в России: индустрия или искусство? — Волгоград: Волгоградское научное изд-во, 2009. 331 с.

Поступила в редакцию 15.03.18

INFORMATION SECURITY ON THE BASIS OF META DATA IN ENTERPRISE APPLICATION INTEGRATION ARCHITECTURE OF INFORMATION SYSTEMS

A. A. Grusho¹, M. I. Zabezhalo², N. A. Grusho¹, and E. E. Timonina¹

¹Institute of Informatics Problems, Federal Research Center “Computer Sciences and Control” of the Russian Academy of Sciences; 44-2 Vavilov Str., Moscow 119133, Russian Federation

²A. A. Dorodnicyn Computing Center, Federal Research Center “Computer Sciences and Control” of the Russian Academy of Sciences; 40 Vavilov Str., Moscow 119133, Russian Federation

Abstract: The paper is devoted to the architecture of information security on the basis of meta data for systems with the enterprise service bus. Meta data are

concentrated in one of the components connected to the enterprise service bus. In the process of distribution of data between tasks, the enterprise service bus applies to meta data for permission from what task of information technology data are transferred. The acquired information from a component of meta data allows to filter admissible interactions with other components or to initiate admissible interactions. The authorization system of interactions on the basis of meta data is in compliance with enterprise application integration architecture of the information system.

Keywords: information security; meta data; enterprise application integration architecture of an information system; enterprise service bus

DOI: 10.14357/08696527180203

Acknowledgments

The paper was partially supported by the Russian Foundation for Basic Research (project 18-07-00274).

References

1. Grusho, A. A., N. A. Grusho, E. E. Timonina, and S. Ya. Shorgin. 2016. Arkhitekturnye uyazvimosti raspredelennykh informatsionno-vychislitel'nykh sistem [Architectural vulnerabilities of the distributed information systems]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 26(3):74–82.
2. Grusho, A., N. Grusho, and E. Timonina. 2009. Metody zashchity informatsii ot atak s pomoshch'yu skrytykh kanalov i vrazhdebnykh programmno-apparatnykh agentov v raspredelennykh sistemakh [Information security methods from the attacks by means of the covert channels and hostile hardware-software agents in distributed systems]. *Vestn. RGGU. Ser. Dokumentovedenie i arkhivovedenie. Informatika. Zashchita informatsii i informatsionnaya bezopasnost'* [RGGU Bull. Ser. Document science and archive science. Informatics. Information security and information security] 10:33–45.
3. FSTEC of Russia. February 11, 2013. Ob utverzhdenii trebovaniy o zashchite informatsii, ne sostavlyayushchey gosudarstvennuyu taynu, soderzhashcheysya v gosudarstvennykh informatsionnykh sistemakh: Prikaz No. 17 [About the approval of requirements about the information security which is not the state secret, contained in the state information systems: Order No. 17]. 40 p. Available at: <https://fstec.ru/normotvorcheskaya/akty/53-prikazy/702> (accessed March 15, 2018).
4. Vacca, J. R. 2009. *Computer and information security handbook*. Morgan Kaufman Publ. 877 p.
5. Grusho, A. A., E. E. Timonina, and S. Ya. Shorgin. 2017. Modelling for ensuring information security of the distributed information systems. *31st European Conference on Modelling and Simulation Proceedings*. Dudweiler, Germany: Digitaldruck Pirrot GmbH. 656–660. Available at: http://www.scs-europe.net/dlib/2017/ecms2017acceptedpapers/0656-probstat_ECMS2017_0026.pdf (accessed March 15, 2018).

6. Grusho, A., N. Grusho, M. Zabezhailo, A. Zatsarinny, and E. Timonina. 2017. Information security of SDN on the basis of Meta Data. *Computer network security*. Eds. J. Rak, J. Bay, I. V. Kotenko, L. J. Popyack, V. A. Skormin, and K. Szczypiorski. Lecture notes in computer science ser. Springer. 10446:339–347. Available at: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-65127-9_27 (accessed March 15, 2018).
7. Grusho, A., E. Timonina, and S. Shorgin. 2017. Security models based on stochastic Meta Data. *Analytical and computational methods in probability theory*. Eds. V. V. Rykov, N. D. Singpurwalla, and A. M. Zubkov. Lecture notes in computer science ser. Springer. 10684:388–400. Available at: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-71504-9_32 (accessed March 15, 2018).
8. Grusho, A. A., E. E. Timonina, and S. Ya. Shorgin. 2018 (in press). Ierarkhicheskiy metod porozhdeniya metadannykh dlya upravleniya setevymi soedineniyami [Hierarchical method of meta data generation for control of network connections]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 12(2).
9. Zabezhailo, M. I. 2009. *Bankovskiy biznes v Rossii: industriya ili iskusstvo?* [Banking business in Russia: Industry or art?]. Volgograd: Volgograd Scientific Publishing House. 331 p.

Received March 15, 2018

Contributors

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

Zabezhailo Michael I. (b. 1956) — Doctor of Science in physics and mathematics, Head of Laboratory, A. A. Dorodnicyn Computing Center, Federal Research Center “Computer Sciences and Control” of the Russian Academy of Sciences; 44-2 Vavilov Str., Moscow 119133, Russian Federation; m.zabezhailo@yandex.ru

Grusho Nikolai A. (b. 1982) — Candidate of Science (PhD) in physics and mathematics, senior scientist, Institute of Informatics Problems, Federal Research Center “Computer Sciences and Control” of the Russian Academy of Sciences; 40 Vavilov Str., Moscow 119133, Russian Federation; info@itake.ru

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

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДИСSEМИНАЦИОННЫХ АЛГОРИТМОВ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ НЕСТРУКТУРИРОВАННОЙ ТЕКСТОВОЙ ИНФОРМАЦИИ В БАЗЕ ГЕОДАННЫХ*

С. К. Дулин¹, Н. Г. Дулина²

Аннотация: Предлагается комплексный подход к построению согласованной базы знаний на основе диссеминационных алгоритмов с последующей экспертной оценкой качества полученного результата. В качестве практической задачи рассматривается диссеминация текстовых документов, подразумевающая определение релевантности их содержимого информационным потребностям пользователей. Проанализированы несколько методик диссеминации знаний на примере информационных сообщений из Интернета, выявлены их основные достоинства и недостатки, а также сделана попытка объединить несколько алгоритмов в единый замкнутый контур и таким образом преодолеть проблемы, которые характерны для каждого из них в отдельности.

Ключевые слова: согласованная база знаний; диссеминационные алгоритмы; структурная согласованность; экспертные оценки

DOI: 10.14357/08696527180204

1 Введение

Построение согласованной базы знаний на основе диссеминационных алгоритмов с последующей экспертной оценкой качества полученного результата является востребованной задачей. Сегодня данная область исследований развивается достаточно активно, разработано множество подходов и методик, с той или иной степенью качества при различных условиях решающих данную задачу. Среди них можно отметить различные детерминированные алгоритмы на базе сопоставления ключевых слов [1], векторные методы и их расширения [2], такие как латентное семантическое индексирование [3–6], анализ структурной согласованности документальной базы знаний [7], экспертные оценки [8] и др. Однако до сих пор существует необходимость в разработке адекватного алгоритма, работающего устойчиво вне зависимости от семантики и особенностей предметной области.

*Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 17-20-02153 офи.-м.РЖД).

¹Институт проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук; Акционерное общество «Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте» (АО «НИИАС»), s.dulin@gismps.ru

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

В качестве практической задачи в данной работе рассматривается диссеминация текстовых документов, подразумевающая определение релевантности их содержимого информационным потребностям пользователей. Частным случаем диссеминации является задача фильтрации, когда из большого входящего потока неструктурированной текстовой информации необходимо отбирать для доставки каждому пользователю только те документы, которые могут его заинтересовать. Примерами документов, которые необходимо постоянно фильтровать, являются статьи и ленты новостей, публикуемые в Интернете. Одним из источников такой информации является веб-сайт агентства Росбизнесконсалтинг (www.rbc.ru). Его характерные особенности — большое число сообщений в течение дня и отсутствие классификации по разделам, в результате чего попытка отслеживания информации, относящейся к определенной тематике, превращается в весьма трудоемкую задачу.

В работе проанализировано несколько методик диссеминации знаний на примере информационных сообщений из Интернета, выявлены их основные достоинства и недостатки, а также сделана попытка объединить несколько алгоритмов в единый замкнутый контур и таким образом преодолеть проблемы, которые характерны для каждого из них в отдельности. Базовые принципы метода могут быть легко распространены на более широкий класс задач.

2 Анализ различных методов решения задачи

2.1 Детерминированные методы

В основу большинства алгоритмов данного типа положена идея построения так называемого «профиля» пользователя, который представляет собой формальное описание области его интересов, его упрощенную «модель».

Первые подходы к решению данной задачи базировались на списке ключевых слов, предоставляемых каждым пользователем для описания своих информационных потребностей, и определения релевантности нового документа, исходя из сопоставления ключевых слов профиля пользователя и этого документа [1, 2]. В [1] описан один из наиболее популярных детерминированных алгоритмов — так называемый SDI (Selective Dissemination of Information).

Главным достоинством детерминированных методов является простота их реализации в виде автоматизированных систем. По этой причине в свое время они получили довольно широкое распространение, однако, как показали исследования [3], зачастую качество получаемых результатов было неприемлемым. В экспериментах, описанных в [6], корреляция между документами, отобранными алгоритмом на основе ключевых слов и реально интересными пользователям, была достаточно низкой ($r = 0,44$). Кроме того, оказалось, что результат сильно зависит от типа документа.

В силу вышеизложенного детерминированные методы имеют в основном историческое значение. Они приведены здесь как основа более современных

алгоритмов, описанных ниже и использованных на практике для обработки статей из Интернета.

2.2 Векторные методы. Латентное семантическое индексирование

Другая группа алгоритмов диссеминации, которые во многом являются развитием детерминированного подхода, — векторные методы. В них документальная база данных статей представляется как матрица «слова–документы», ячейки которой представляют собой частоту встречаемости каждого слова в каждом документе. Таким образом, документы (статьи и сводки новостей) могут рассматриваться как векторы в многомерном пространстве, размерность которого — это слова, из которых состоят их тексты. Степень сходства двух документов вычисляется как скалярное произведение (иногда взвешенное) соответствующих столбцов в матрице «слова–документы» (табл. 1).

Важнейшее предположение такой пространственной модели — независимость (ортогональность) слов, составляющих документы, в пределе — всех слов языка. Это условие допустимо только в нулевом приближении, а в общем случае, разумеется, оно не отражает реальные семантические и морфологические взаимосвязи между словарными единицами. В каждой предметной области используется определенный набор терминов, которые, очевидно, нельзя считать независимыми друг от друга, и соответствующие им векторы частот коррелируют между собой. Кроме того, существует проблема словоформ, которая особенно остро стоит в русском языке, где их число в среднем составляет от 20 до 40 на слово.

Как и следовало ожидать, при попытках применить векторную модель диссеминации документов в чистом виде исследователи столкнулись с относительно низким качеством результатов, не говоря уже о проблемах производительности, обусловленных большими размерами матрицы «слова–документы». Для улучшения ситуации был разработан ряд методов, которые учитывали взаимосвязи между терминами. Одним из таких методов является латентное семантическое индексирование (Latent Semantic Indexing — LSI [4, 5]).

Latent Semantic Indexing представляет собой расширение стандартного векторного метода, описанного выше. Основная идея алгоритма — статистическая

Таблица 1 Матрица «слова–документы» — основа векторных методов диссеминации

Слово	Документ						
	1	2	3	4	5	6	...
НТВ	0	4	0	3	0	0	...
Сирия	3	0	0	1	1	2	...
Президент	1	2	0	0	0	1	...
Выборы	1	0	0	2	0	2	...
Пожар	1	0	3	0	2	0	...
...	...	...	...	...	...	...	...

оценка и учет скрытых (латентных) ассоциаций между словами в документах. В данной работе будет использована реализация LSI, описанная в [4], где для выделения таких взаимосвязей применялось разложение по сингулярным числам матрицы (Singular Value Decomposition — SVD). Эта техника, близкая к разложению по собственным векторам и методам факторного анализа, выделяет множество из k факторов (как правило, от 100 до 500), линейная комбинация которых аппроксимирует исходную матрицу «слова–документы». Вместо представления документов как дискретных векторов в пространстве независимых слов LSI рассматривает и ключевые слова, и документы как непрерывные векторы в базисе из k ортогональных «индексирующих» размерностей, полученных в ходе SVD-анализа. Различные исследователи определяют меру сходства между этими векторами либо через их скалярное произведение, либо через косинус угла между ними. В данной работе используется первый подход, так как он учитывает вклад слов, встречающихся в документах более одного раза.

Данный метод, несмотря на повышенную сложность, обладает рядом неоспоримых достоинств. Так как количество полученных размерностей гораздо меньше первоначального числа терминов, последние перестают быть независимыми. Например, как показано в [4], если два на первый взгляд никак не связанных между собой слова используются в нескольких сходных по содержанию документах, они будут иметь близкие векторы (в смысле величины их скалярного произведения) в k -мерном пространстве факторов. Таким образом, термины, входящие в профиль пользователя, рассматриваются не сами по себе, а в контексте фильтруемых документов. Метод «улавливает» их скрытую, латентную структуру, более глубокую, чем просто статистика встречаемости слов. Кроме того, ввиду небольшого числа «индексирующих» размерностей существенно сокращается вычислительная сложность алгоритма, что позволяет использовать его на практике в промышленных масштабах.

2.3 Привлечение экспертов для оценки качества диссеминации

В среднем алгоритм LSI, как отмечается в [5], показывает лучшие результаты, чем детерминированные методы. Однако в той же работе поднимается проблема устойчивости качества фильтрации (формальное определение которого будет рассмотрено ниже) при использовании на различных наборах документов и группах пользователей. В ходе экспериментов выявлено, что результаты работы алгоритма зависят от ряда факторов — выбранного количества индексирующих размерностей, числа ключевых слов в профиле пользователя и т. д. В самом методе LSI отсутствует оценка качества диссеминации, которая может и должна служить инструментом настройки параметров алгоритма — число ключевых слов, определяющих интересы пользователей, количество «индексирующих» размерностей и т. д. Для этого необходима обратная связь, которая позволила бы проанализировать правильность полученных результатов.

В экспериментах, описанных в [5], поставщиками такой информации были сами пользователи, которые оценивали по семибалльной шкале релевантность статей, попавших к ним в результате диссеминации. На базе этих оценок статьи ранжировались, и те из них, которые наиболее соответствовали интересам пользователей, включались в их профили и использовались при диссеминации следующих документов как векторы k -мерного пространства.

Данный метод хотя и обеспечивает обратную связь алгоритму LSI и повышает качество его работы, но обладает одним существенным недостатком — пользователи могут давать свои оценки только для тех статей, которые были определены как релевантные их интересам. Остальные документы, не попавшие к пользователям в результате работы алгоритма, остаются вне рассмотрения, хотя в реальной жизни они могут составлять подавляющую долю общего потока. Таким образом, возможности настройки параметров метода LSI при таком подходе существенно ограничены, особенно на начальном этапе, когда профили пользователей состоят только из исходного набора ключевых слов.

Выходом из такой ситуации может быть использование в качестве поставщиков суждений о качестве работы алгоритма не самих пользователей, а независимого эксперта. Сопоставляя содержимое документов с профилями пользователей, он дает оценку правильности результата диссеминации каждой статьи для каждого пользователя. В этом случае мнением эксперта будет матрица «документы–пользователи», содержащая соответствующие рейтинги.

Как правило, для снижения риска получения ошибочных результатов привлекается несколько экспертов, и одна из основных задач в этом случае — выведение совокупной оценки на базе их мнений. В силу субъективной природы экспертных оценок в них всегда присутствует некоторая степень неопределенности, зависящая от квалификации эксперта, которую необходимо учитывать. Для этого к экспертизе привлекается еще одна сторона, которая в [8] названа ЛПР (лицо, принимающее решение), основная роль которого заключается в определении степени доверия к мнению каждого эксперта. Так как ЛПР никогда не имеет абсолютно точного представления об их квалификации, он не может полностью полагаться на мнение того или иного эксперта и рассматривает даваемые ими оценки как случайные величины, дисперсии которых отражают величину их возможного отклонения от истинного значения. Следует подчеркнуть, что это отклонение субъективно оценивается ЛПР и характеризует степень его доверия к мнению того или иного эксперта. Таким образом, ЛПР моделирует поведение экспертов через свое отношение к достоверности получаемых от них оценок, затем комбинирует их, используя байесовский подход и, наконец, выводит совокупную оценку из условия максимума апостериорного распределения искомой величины.

В [8] вышеописанный подход использован при расчете параметров кривой хрупкости, характеризующей вероятность разрушения конструкции в зависимости от степени внешнего воздействия (максимального горизонтального ускоре-

ния грунта). В данном случае эксперты оценивали квантили распределения — значения независимой переменной для различных вероятностей разрушения. Мнение каждого эксперта представлялось в виде случайной величины, моделирующей его возможную ошибку относительно неизвестного истинного значения оцениваемого квантиля, выраженного через искомые параметры. В рамках байесовского подхода были введены понятия веса мнения эксперта и зависящей от него функции правдоподобия $L(x|x^t)$, характеризующей плотность вероятности распределения экспертной оценки с точки зрения ЛПР. Фактически она и определяла степень доверия аналитика к мнению каждого эксперта и таким образом позволяла через веса учитывать различия в их квалификации. Согласно теореме Байеса в [8] была построена функция плотности распределения параметров кривой хрупкости, после чего они были найдены из условия максимума.

На рис. 1 представлены результаты вычислительного эксперимента, в ходе которого рассчитывалось распределение случайной величины на основе экспертных оценок его квантилей — значений независимой переменной, при которых вероятность разрушения конструкции равна заданной величине. Было опрошено 5 экспертов, которые дали по 3 оценки квантилей, соответствующих вероятностям 10%, 50% и 90% (на рисунке они отмечены крестиками). На базе их мнений получены параметры наиболее вероятной кривой хрупкости (сплошная линия), а также вычислены границы доверительного интервала (две пунктирные кривые), которые найдены из условия попадания между ними функции распределения в каждой точке с вероятностью 90%. Ширина доверительного интервала визуально характеризует степень неопределенности полученного результата, которая связана с привлечением экспертов и рассмотрением их оценок как случайных величин.

Данный подход применен к рассматриваемой задаче диссеминации неструктурированных документов из Интернета. Рейтинги качества, предоставляемые экспертами для каждого документа, рассматриваются как случайные величины. Степень доверия ЛПР к мнению экспертов описывается функцией правдоподобия, которая для простоты определяется нормальным распределением с математическим ожиданием, равным неизвестному истинному значению рейтинга, и дисперсией, определяемой весом эксперта. Искомая совокупная оценка рейтинга рассчитывается из условия максимума плотности вероятности ее распределения, полученного по теореме Байеса.

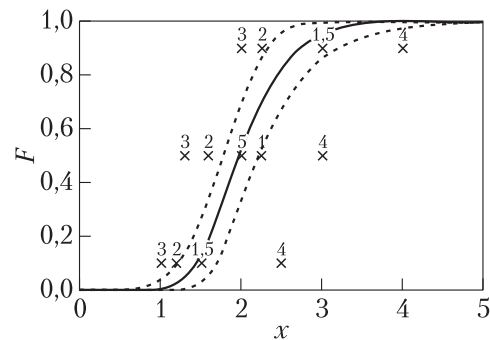


Рис. 1 Оценка вероятностного распределения на основе мнений экспертов

2.4 Анализ согласованности экспертных оценок

Основная проблема привлечения экспертов состоит в том, что каждый из них представляет собой в некотором смысле черный ящик, так как их оценки, как отмечалось выше, зависят от множества факторов, которые невозможно формализовать. Мнения экспертов всегда в той или иной степени отличаются друг от друга — например, в рассматриваемой задаче качество диссеминации определенного документа, приемлемое для одного эксперта, может быть неудовлетворительным для другого и присвоенные ими рейтинги при этом будут существенно отличаться.

С точки зрения ЛПР важнейшим показателем качества экспертизы является непротиворечивость оценок экспертов. Если они в целом подтверждают друг друга, то качество экспертизы может быть признано удовлетворительным, а ее результат — адекватно отражающим реальную действительность, даже если он показывает низкое качество работы алгоритма диссеминации. Если же в мнениях экспертов выявлены серьезные противоречия, это указывает на высокую степень неопределенности полученных оценок рейтингов (в терминах, использованных в [8], это означает широкий доверительный интервал). На такие результаты нельзя полагаться при принятии решения о коррекции параметров алгоритма LSI, поэтому необходима либо модификация входной информации, на базе которой делается экспертиза (число документов, ключевых слов и т. д.), либо изменение состава экспертов.

Здесь следует подчеркнуть принципиальное различие в понятиях «качество» с точки зрения экспертов и ЛПР. Первые оценивают качество работы алгоритма диссеминации, т. е. обеспечивают непосредственную обратную связь для коррекции его параметров; ЛПР же здесь играет опосредованную роль — он анализирует качество экспертизы как таковой без привязки к конкретной предметной области, т. е. оценивает команду экспертов.

Для анализа противоречий в экспертных оценках применяется теория структурной согласованности множеств [7–9], в которой важную роль играет не семантический аспект мнений экспертов как таковых, а рассматривается их совокупная непротиворечивость с точки зрения специального критерия согласованности. В данной модели мнения экспертов и их попарные соотношения сходства представляются в виде полного знакового неориентированного графа и матрицы связности (рис. 2). Степень близости оценок экспертов описывается специальной функцией, а знак каждой связи определяется пороговой величиной — он положителен, если значение функции больше порогового, и отрицателен в обратном случае. Порог можно интерпретировать как уровень требований к сходству мнений экспертов, предъявляемый аналитиком-ЛПР, который контролирует качество экспертизы.

С точки зрения структурной согласованности выделяют консонансное (согласованное), диссонансное (рассогласованное) и ассонансное (не имеющее определенной структуры) состояния множества мнений экспертов по тернарному

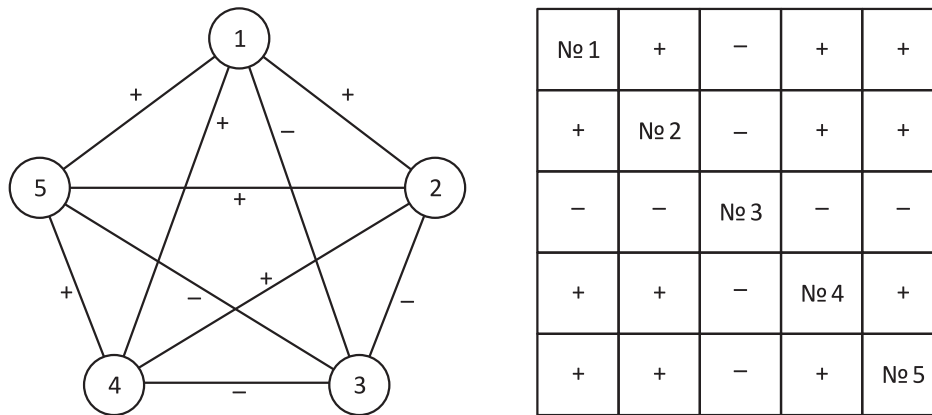


Рис. 2 Пример знакового графа для пяти экспертов и соответствующей ему матрицы связности

критерию Хайдера, а также расширенное понятие поликонсонанса степени N , соответствующего более слабому критерию консонансности. Полученный граф, описывающий структурную согласованность мнений экспертов, может находиться в любом из вышеперечисленных состояний. Очевидно, что его состояние зависит от выбранной функции сходства и ее порога, которые, таким образом, являются параметрами задачи.

В [7] рассматривается задача приведения ассонансного множества в согласованное состояние (поликонсонанс заданной степени) за минимальное число шагов. В качестве элементарной операции выбрано одновременное изменение знаков всех связей у одной отдельно взятой вершины — так называемый «повершинный переброс». В общем случае не всегда удастся привести ассонансное множество в консонанс, однако можно указать так называемые сильные диссонансные связи, изменение знаков которых на противоположные в результате переводит множество в согласованное состояние.

Степень рассогласованности совокупности мнений экспертов и связанное с ней качество экспертизы в данной модели могут рассматриваться как «расстояние» до ближайшего консонансного множества. Оно выражается в виде суммы числа повершинных перебросов, необходимых для перевода исходного множества в ближайшее к нему ассонансное множество с сильными диссонансными связями, и числа этих связей. Несмотря на общий переборный характер решения данной задачи, существует ряд практических алгоритмов для нахождения ближайшего консонансного прообраза исходного множества. Один из наиболее эффективных из них описан и применен к рассматриваемой задаче диссеминации документов в [7]. Там же приведено описание его программной реализации в виде автоматизированной интерактивной системы Intelledger.

3 Комплексный подход

Проведенный выше анализ различных методик показывает, что любая из них, применяемая индивидуально, не решает поставленную задачу полностью. Кроме того, у каждого алгоритма существует ряд параметров, сильно влияющих на качество получаемого результата, и при этом не вполне ясен механизм их коррекции в случае необходимости. Тем не менее очевидны точки соприкосновения различных методик и возможности их взаимодействия друг с другом.

В такой ситуации вполне логичным представляется объединение описанных алгоритмов в единую замкнутую схему. Подобный комплексный подход к решению поставленной задачи представлен на рис. 3.

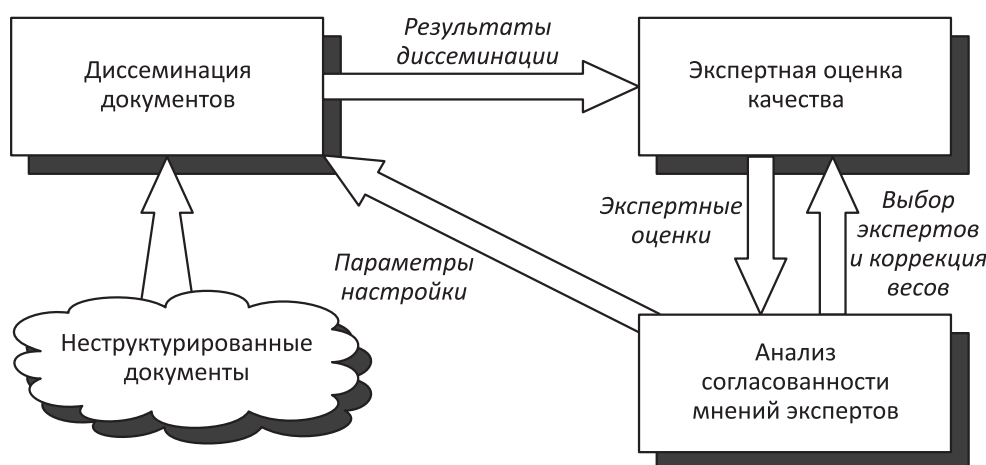


Рис. 3 Комплексная система диссеминации текстовой информации

Согласно данной схеме выделяются следующие этапы решения задачи и взаимосвязи между компонентами:

1. **Диссеминация.** Неструктурированные текстовые документы — аналитические статьи и информационные сообщения из Интернета — подаются на вход блока диссеминации, использующего алгоритм LSI. При этом интересы пользователей, являющихся конечными потребителями информации, формализуются через набор предоставляемых ими ключевых слов.

Результатом работы данного блока является бинарная матрица, каждая ячейка которой содержит единицу, если алгоритм LSI определил соответствующий ей документ как релевантный информационным потребностям пользователя, и ноль в противном случае. Размерность этой матрицы — число поступивших на вход документов на число пользователей.

2. **Экспертная оценка качества диссеминации.** Исходные текстовые документы, ключевые слова, определяющие интересы пользователей, и бинарная матрица, описывающая результаты диссеминации, предоставляются группе экспертов. Они дают свои оценки того, насколько правильно алгоритмом LSI определена релевантность каждого документа информационным потребностям каждого пользователя. Предполагается, что эксперты действуют независимо друг от друга.

На выходе каждый эксперт предоставляет матрицу рейтингов, размеры которой равны числу документов на число пользователей. Компоненты матрицы характеризуют степень его согласия с результатом диссеминации каждой статьи каждому пользователю, выраженную по семибалльной шкале.

3. **Анализ экспертных оценок.** Это ключевой этап предлагаемой методики, который обеспечивает оценку качества экспертизы с точки зрения непротиворечивости мнений экспертов и необходимую обратную связь для алгоритма диссеминации. Для этого привлекается независимый аналитик-ЛПР — своего рода третейский судья, который решает следующие задачи:

- анализ совокупности мнений экспертов с точки зрения критерия структурной согласованности. На данном этапе ЛПР выбирает функцию сходства экспертных оценок и ее пороговое значение, исходя из своих представлений о приоритетах документов и допустимом уровне рассогласованности. На выходе данного шага формируется структура множества экспертных оценок в виде полного знакового графа и определяется его тип (консонанс, диссонанс или ассонанс);
- анализ качества экспертизы с использованием алгоритма поиска консонансного множества, ближайшего к полученному на предыдущем шаге. Характеристикой качества в такой постановке является число шагов, необходимых для перехода в согласованное состояние, а именно: число повершинных перебросов плюс число сильных диссонансных связей в полученном множестве. Неудовлетворительный результат (большое расстояние от исходного множества до консонанса) рассматривается аналитиком либо как следствие чрезмерной жесткости критерия сходства, либо как низкое качество работы блока диссеминации, которое привело к сильному разбросу экспертных оценок. В первом случае ЛПР пересматривает функцию сходства и/или ее порог, во втором — модифицирует параметры алгоритма LSI, после чего проводится еще одна экспертиза;
- результирующая оценка качества диссеминации, в ходе которой ЛПР рассматривает рейтинги, предоставленные экспертами, как случайные величины и с помощью весов моделирует степень своего доверия к мнению каждого из них. Через эти веса выражаются функции правдоподобия для каждого эксперта, а затем с использованием байесовской модели строится распределение вероятности рейтингов. Результирующие оценки рейтингов диссеминации каждого документа, характеризующие качество работы

алгоритма LSI, находятся из условия максимума плотности полученной функции распределения.

В данной схеме ЛПР играет центральную роль, обеспечивая обратную связь с остальными компонентами. С одной стороны, ЛПР интерпретирует противоречивые экспертные оценки как высокую степень неопределенности результатов алгоритма LSI, которая может привести к низкому качеству диссеминации (несоответствию большого числа документов, определенных как релевантные, информационным потребностям пользователей). В такой ситуации ЛПР может изменить параметры задачи — число ключевых слов, определяющих интересы пользователей, число «индексирующих» размерностей в алгоритме LSI и т. д. С другой стороны, ЛПР учитывает квалификацию экспертов через веса и может корректировать их по результатам экспертизы. Кроме того, исходя из критерия структурной согласованности, ЛПР может выбирать подгруппу экспертов, мнения которых более всего подтверждают друг друга (т. е. соответствующее знаковое подмножество является наиболее близким к консонансному), и оценивать результирующие рейтинги, основываясь только на базе информации, полученной от этой подгруппы.

4 Пример использования предложенной методики

Для тестирования предложенной методики было отобрано 10 статей с ленты новостей информационного агентства Росбизнесконсалтинг (рис. 4). В основном были представлены политические и экономические новости, причем некоторые из статей являлись «продолжением» других, т. е. имели схожий набор ключевых слов. Документы подбирались таким образом, чтобы среди них были как далекие, так и весьма близкие по содержанию, чтобы проверить работу алгоритма в различных условиях.

Для эксперимента были смоделированы информационные интересы (профили) трех пользователей через наборы ключевых слов и словосочетаний, приведенных в табл. 2.

Как видно из табл. 2, первые двое из трех пользователей имеют схожие наборы ключевых слов, в то время как профиль третьего сильно отличается от них. Это также сделано для проверки качества работы предлагаемой методики в различных ситуациях.

Выбранные документы и профили пользователей были поданы на вход алгоритма диссеминации LSI, реализованного в рамках системы Intelledger, в которой было задано число индексирующих размерностей, равное 10. В результате работы алгоритма была получена бинарная матрица, описывающая релевантность каждой статьи информационным потребностям каждого пользователя (единица — релевантна, ноль — нет) (табл. 3).

Для оценки качества диссеминации было смоделировано участие семи независимых экспертов. На основе сопоставления исходных статей с профилями

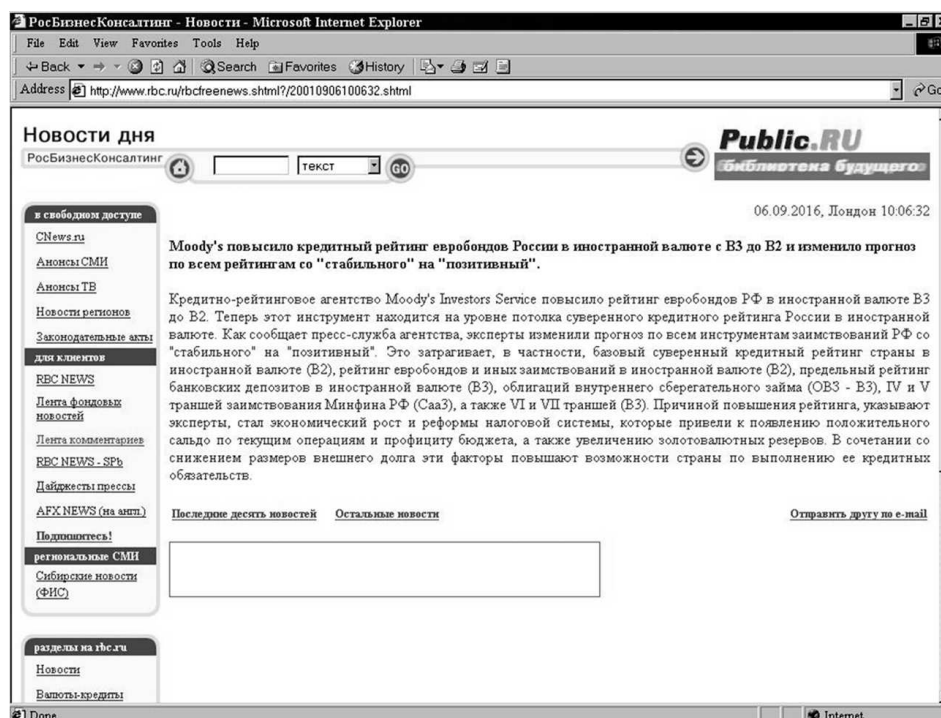


Рис. 4 Пример статьи с ленты новостей Росбизнесконсалтинг

Таблица 2 Тестовые профили пользователей

Пользователь	Ключевые слова
1	Бюджет, экономика, реформа, МВФ, внешний долг, ВТО, валюта, Центральный Банк, правительство
2	Бюджет, экономика, инфляция, промышленность, развитие, торговля, индекс цен, ВВП, Центральный Банк, правительство, рубль
3	Сирия, вооруженные формирования, беженцы, федеральные силы

Таблица 3 Результаты работы алгоритма LSI

Пользователь	Статья									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1	1	0	0	1	0	0	0	1	0
2	1	1	0	1	1	0	1	0	1	0
3	0	0	1	0	1	1	1	0	0	1

Таблица 4 Матрица рейтингов качества диссеминации, данных первым экспертом

Пользователь	Статья									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	5	3	6	2	6	3	4	4	6	4
2	4	5	5	4	5	3	2	5	5	3
3	4	3	1	4	3	4	5	3	4	4

пользователей они делали свои заключения относительно правильности результата работы алгоритма LSI в виде рейтингов, отражающих степень их согласия с определением релевантности каждого документа профилю каждого пользователя с использованием семибалльной шкалы (оценки от 0 до 6). В табл. 4 приведены оценки качества диссеминации, сделанные первым экспертом.

Мнения остальных экспертов также были представлены в виде бинарных матриц, аналогичных по структуре представленной в табл. 4.

Для анализа противоречивости экспертных оценок была выбрана следующая функция сходства:

$$f(i, j) = 1 - \frac{1}{MN} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \frac{|p_{mn}^i - p_{mn}^j|}{\max_{ij} |p_{mn}^i - p_{mn}^j|},$$

где M — число документов; N — число экспертов; p_{mn}^i — рейтинги качества, т. е. степень согласия i -го эксперта с результатом диссеминации m -го документа n -му пользователю.

Порог функции сходства был выбран равным 0,6, в результате чего получена знаковая матрица связности, представленная в табл. 5.

В соответствии с алгоритмом уменьшения рассогласованности, изложенным в [7], данная матрица с помощью процедуры последовательных попершинных перебросов экспертов $\mathcal{E}_1$, $\mathcal{E}_4$ и $\mathcal{E}_3$ была приведена к виду, представленному в табл. 6.

Как видно из табл. 6, полученная матрица связности имеет ассонансную структуру, близкую к консонансу типа (4 : 3). При этом имеются две сильные диссонансные связи — между экспертами $\mathcal{E}_1$ и $\mathcal{E}_6$ и между $\mathcal{E}_3$ и $\mathcal{E}_6$. Таким образом, расстояние от исходной матрицы связности, полученной в результате вычислительного эксперимента, до консонансного множества равно 5 (три попершинных переброса плюс две сильные диссонансные связи), что соответствует сравнительно высокой степени согласованности экспертных оценок.

Далее мнения экспертов относительно результатов работы алгоритма LSI были использованы для вычисления совокупных рейтингов качества. Помимо самих экспертных оценок параметрами данной подзадачи являются веса мнений

Таблица 5 Матрица связности экспертных оценок при пороге 0,6

Э ₁	–	+	+	+	–	+
–	Э ₂	–	–	–	–	–
+	–	Э ₃	+	+	–	+
+	–	–	Э ₄	+	+	+
–	–	–	–	Э ₅	+	+
–	–	–	–	–	Э ₆	+
+	–	+	+	+	+	Э ₇

Таблица 6 Матрица связности, полученная с помощью алгоритма уменьшения рассогласованности

Э ₁	+	+	+	–	+	–
+	Э ₂	+	+	–	–	–
+	–	Э ₃	+	–	+	–
+	–	–	Э ₄	–	–	–
–	–	–	–	Э ₅	+	+
+	–	+	–	+	Э ₆	+
–	–	–	–	+	+	Э ₇

экспертов, характеризующие степень доверия к ним со стороны ЛПР. В данном примере были выбраны веса, нормированные в диапазоне $[0; 1]$, представленные в табл. 7.

На базе байесовского подхода, изложенного в [8], в рамках которого была выбрана аддитивная модель ошибок экспертов и равномерное априорное распределение оценок экспертов, были рассчитаны совокупные рейтинги качества работы алгоритма диссеминации (табл. 8).

Как видно из табл. 8, качество работы алгоритма LSI для первых двух пользователей было в целом удовлетворительным — большинство совокупных рейтингов относительно высоки. В то же время результаты экспертизы для третьего пользователя показывают достаточно низкое качество диссеминации. На базе этих выводов могут быть приняты различные решения по изменению параметров задачи. В данном случае, учитывая хорошее качество диссеминации для первых двух пользователей, необходима не коррекция характеристик алгоритма LSI, а уточнение профиля третьего пользователя — например, расширение списка ключевых слов.

Таблица 7 Веса мнений экспертов

Эксперт	Вес
Э ₁	0,9
Э ₂	0,5
Э ₃	0,75
Э ₄	0,4
Э ₅	0,65
Э ₆	0,5
Э ₇	0,7

Таблица 8 Матрица совокупных рейтингов качества диссеминации

Пользователь	Статья									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	4,34	3,20	5,79	2,94	5,55	5,12	4,39	4,61	5,50	3,87
2	4,88	5,07	5,37	4,11	5,30	4,02	2,49	5,44	5,22	3,41
3	4,06	4,19	1,52	4,58	2,76	4,51	4,60	3,19	4,15	4,01

5 Выводы

В данной работе проанализированы существующие подходы и алгоритмы диссеминации текстовых документов на примере сообщений и лент новостей из

Интернета. В качестве отправной точки выбран алгоритм латентного семантического индексирования (LSI), который сочетает в среднем более высокое качество результатов, чем простейшие детерминированные методы, и более низкую по сравнению с ними вычислительную сложность.

Авторами выделен основной недостаток данного алгоритма, который заключается в отсутствии какой бы то ни было процедуры оценки эффективности его работы и принятия решения о коррекции параметров.

Для преодоления данного недостатка разработан комплексный подход, базирующийся на анализе оценок результатов диссеминации, даваемых независимыми экспертами. При этом для снижения фактора случайных ошибок, связанного с их привлечением, их мнения анализируются ЛПП на предмет непротиворечивости. Качество полученных алгоритмом LSI результатов определяется не субъективным суждением ЛПП, а согласованностью мнений экспертов, которые оценивают это качество. Ситуация, когда их оценки противоречат друг другу, соответствует высокой степени неопределенности полученных алгоритмом результатов, приводящей к низкому качеству диссеминации, и требует модификации его параметров.

Такой подход имеет ряд преимуществ. Во-первых, он обеспечивает алгоритму LSI необходимую обратную связь и позволяет динамически его настраивать, причем этот процесс может быть итеративным и давать все более высокое качество диссеминации. Во-вторых, в процессе согласования снижается риск получения неверных результатов, обусловленных ошибками отдельных экспертов, за счет возможности выбора подмножества тех из них, мнения которых находятся в консонансе. В-третьих, ЛПП не обязательно должен быть специалистом в предметной области, к которой относятся поступающие на вход документы, а это значит, что процесс анализа результатов экспертизы можно формализовать и автоматизировать.

Разработанная система после определенного числа проведенных экспертиз, оценки их качества и соответствующей настройки параметров может рассматриваться как инструмент анализа компетентности экспертов. Лицо, принимающее решение, может оценивать вес нового эксперта, включая его мнение в уже существующую структуру и анализируя состояние консонансности полученного расширенного множества. Таким образом решается сопряженная задача привлечения наиболее подходящих экспертов для конкретной предметной области.

Литература

1. *O'Neil E. K.* Selective dissemination of information in the dynamic web environment. A thesis presented to the Faculty of the School of Engineering and Applied Science University of Virginia, 2001. 131 p. www.cs.virginia.edu/~cyberia/papers/eko.thesis.pdf.
2. *Landauer T. K., Kireyev K., Panaccione C.* Word maturity: A new metric for word knowledge // *Sci. Stud. Read.*, 2011. Vol. 15. No. 1. P. 92–108.

3. *Radhakrishna K. A.* Information filters: Revival of selective dissemination of information (SDI) service in the Internet era // *Libr. Sci. Slant Doc. Inform. Studies*, 1999. Vol. 36. No. 4. P. 257–260.
4. *Jessup E., Martin J.* Taking a new look at the latent semantic analysis approach to information retrieval // *Computational information retrieval* / Ed. M. W. Berry. — Philadelphia, PA, USA: SIAM, 2001. P. 121–144.
5. *Lizza M., Sartoretto F.* A comparative analysis of LSI strategies // *Computational information retrieval* / Ed. M. W. Berry. — Philadelphia, PA, USA: SIAM, 2001. P. 171–181.
6. *Shultz M.* Medline SDI services: How do they compare? // *J. Med. Libr. Assoc.*, 2003. Vol. 91. No. 4. P. 460–467.
7. *Дулин С. К.* Структурная согласованность данных и знаний. — М.: МЗ-Пресс, 2005. 143 с.
8. *Дулин С. К., Самохвалов Р. В.* Об одном подходе к оценке «риска в риске» // *Известия РАН. Техническая кибернетика*, 1996. № 5. С. 51–60.
9. *Розенберг И. Н., Дулин С. К.* Проблемы согласованной интеграции геоинформационных ресурсов // *Фундаментальные исследования для долгосрочного развития железнодорожного транспорта: Сб. тр. членов и научных партнеров Объединенного ученого совета ОАО РЖД.* — М.: Интекст, 2013. С. 193–203.

Поступила в редакцию 05.03.18

USE OF DISSEMINATION ALGORITHMS FOR FORMATION OF NONSTRUCTURED TEXT INFORMATION IN THE GEODATA BASE

S. K. Dulin^{1,2} and N. G. Dulina³

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

²Research & Design Institute for Information Technology, Signalling and Telecommunications on Railway Transport (JSC NIIAS), 27-1 Nizhegorodskaya Str., Moscow 109029, Russian Federation

³A. 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 proposes a comprehensive approach to constructing an agreed knowledge base according to dissemination algorithms with subsequent expert evaluation of the quality of the result obtained. As a practical task, dissemination of text documents is considered, implying the relevance of their content to the information needs of users. Several methods of disseminating

knowledge by the example of information messages from the Internet are analyzed, their main advantages and disadvantages are revealed, and an attempt is made to combine several algorithms into a single closed loop and thus overcome the problems that are specific to each of them individually.

Keywords: agreed knowledge base; dissemination algorithms; structural consistency; expert assessments

DOI: 10.14357/08696527180204

Acknowledgments

The work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (project 17-20-02153 ofi_m_RZhD).

References

1. O'Neil, E. K. 2001. Selective dissemination of information in the dynamic web environment. A thesis presented to the Faculty of the School of Engineering and Applied Science University of Virginia. 131 p. Available at: www.cs.virginia.edu/~cyberia/papers/eko_thesis.pdf (accessed March 2018).
2. Landauer, T. K., K. Kireyev, and C. Panaccione. 2011. Word maturity: A new metric for word knowledge. *Sci. Stud. Read.* 15(1):92–108.
3. Radhakrishna, K. A. 1999. Information filters: Revival of selective dissemination of information (SDI) service in the Internet era. *Libr. Sci. Slant Doc. Inform. Studies* 36(4):257–260.
4. Jessup, E., and J. Martin. 2001. Taking a new look at the latent semantic analysis approach to information retrieval. *Computational information retrieval*. Ed. M. W. Berry. Philadelphia, PA: SIAM. 121–144.
5. Lizza, M., and F. Sartoretto. 2001. A comparative analysis of LSI strategies. *Computational information retrieval*. Ed. M. W. Berry. Philadelphia, PA: SIAM. 171–181.
6. Shultz, M. 2003. Medline SDI services: How do they compare? *J. Med. Libr. Assoc.* 91(4):460–467.
7. Dulin, S. K. 2005. *Strukturnaya soglasovannost' dannykh i znaniy* [Structural coherence of data and knowledge]. Moscow: MZ-Press. 143 p.
8. Dulin, S. K., and R. V. Samokhvalov. 1996. Ob odnom podkhode k otsenke "riska v riske" [One approach to assessing "risk in risk"]. *Izvestiya RAN. Tekhnicheskaya kibernetika* [Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Technical Cybernetics] 5:51–60.
9. Rozenberg, I. N., and S. K. Dulin. 2013. Problemy soglasovannoy integratsii geoinformatsionnykh resursov [The problems of coordinated integration of geoinformation resources]. *Fundamental'nye issledovaniya dlya dolgosrochnogo razvitiya zheleznodorozhnogo transporta: Sb. tr. chlenov i nauchnykh partnerov Ob"edinennogo uchenogo soveta OAO "RZhD"* [Collected works of members and scientific partners of the Joint Scientific Council of JSCo "Russian Railways" "Fundamental research for long-term development of railway transport"]. Moscow: Intekst. 193–203.

Received March 5, 2018

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; principal scientist, Research & Design Institute for Information Technology, Signalling and Telecommunications on Railway Transport (JSC NIIAS), 27-1 Nizhegorodskaya Str., Moscow 109029, Russian Federation; s.dulin@gismps.ru

Dulina Natalia G. (b. 1947) — Candidate of Science (PhD) in technology, leading programmer, 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

СОПОСТАВЛЕНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ГЕОДАННЫХ В КАРТОГРАФИИ И В ГЕОИНФОРМАТИКЕ

*Д. А. Никитин*¹

Аннотация: Целью исследования является обзор и анализ исходных данных для формирования подхода к будущему созданию методологии обратимой генерализации информационных объектов (ОГИО) в системах и средствах информатики. Представлен сравнительный анализ моделей геоданных в аналоговой и цифровой парадигмах их представления и обработки. Показано, что геоданные можно рассматривать как пример комплексного типа данных, обладающего свойствами альтернативности и вариантности обобщения и включающего наряду с семантикой пространственную или пространственно-временную компоненту. Рассматривается организация многоуровневых баз геоданных, предлагается расширенная типология связей в такой модели. Описаны свойства вариантности и альтернативности геоданных, которые являются ключевыми для формирования подхода к будущему созданию методологии ОГИО.

Ключевые слова: геоданные; цифровая картография; геоинформатика; многоуровневые базы геоданных; картографическая генерализация

DOI: 10.14357/08696527180205

1 Введение

Целью исследования является формирование подхода к построению в рамках информатики методологии ОГИО в текстовой [1, 2] и пространственно-временной формах в интегрированных информационных системах. В этом контексте возникает задача сравнительного анализа основных моделей геоданных в аналоговой и цифровой парадигмах их представления и обработки; первая из двух парадигм является основой традиционной картографии, а вторая — цифровой картографии и геоинформационных технологий. Для решения данной задачи рассматриваются структура и особенности представления геоданных, которые, как будет показано далее, можно рассматривать как обобщенный, комплексный тип данных, включающий наряду с семантикой пространственную или пространственно-временную составляющую. Также рассматриваются вопросы организации многоуровневых баз геоданных в контексте процессов генерализации данных,

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

практическим примером которых выступает процесс автоматизированной генерации масштабного ряда топографических карт.

Актуальность данного направления исследований определяется необходимостью совершенствования методологического аппарата информатики для описания конкретно-абстрактных информационных трансформаций [3–5].

Практическая значимость этого направления исследований определяется тем, что предлагаемое развитие типологии связей модели геоданных для поддержки методов генерализации в геоинформационной системе (ГИС) позволит привести их терминологию и алгоритмическую составляющую к единообразному, согласованному виду, что, в свою очередь, несет потенциал для их обобщения как методологии ОГИО в информатике.

2 Компоненты данных

Геоданные предназначены для описания как пространственного местоположения (локализации) геообъектов, так и пространственных отношений между ними (их топологии). Более полным, хотя и значительно более сложным и ресурсоемким в реализации, является пространственно-временное описание локализации геообъектов и отношений между ними (их пространственно-временной метрики и топологии) [6].

Таким образом, геоданные в общем случае включают в себя пространственную, временную и семантическую компоненты. При этом можно утверждать, что семантика является первичным, необходимым из этих трех компонентов данных, хотя и не достаточным для решения некоторых видов задач геоинформатики. Это утверждение обусловлено тем, что метрика без семантики бессмысленна, поскольку в этом случае непонятно, что отражает эта метрика, каково ее смысловое содержание; семантика без метрики существовать хотя и может, но сама по себе, без пространственной/метрической компоненты, недостаточна для целей пространственного или топологического анализа.

Пространственная и временная составляющие могут задаваться в координатном (абсолютном) или топологическом (относительном) виде, при этом они могут присутствовать независимо друг от друга. Семантическая составляющая отвечает за описание смыслового значения данной пространственной конструкции; по аналогии с пространственной составляющей здесь следует также отметить потенциальную необходимость описания «семантической (смысловой) топологии»¹.

Для описания топологии используются различные модели связности геообъектов, например топологические сети. Характерным применением топологической сети является граф дорог, используемый в широко известных сервисах автодорожной навигации [7–10], в которых:

¹Эта аналогия проводится только для целей наглядности, поскольку семантическое поле имеет гораздо более сложную структуру по сравнению с метрическими пространствами, и здесь будут иметь место уже другие виды отношений, в общем случае не имеющие соответствия в пространственной топологии.

- семантическая составляющая определяет непространственные свойства участков (сегментов) дорог, например их классность (включая пропускную способность), тип покрытия, среднюю степень загруженности и т. п.;
- пространственная составляющая собственно обеспечивает построение связанного маршрута на основе принятого критерия оптимальности (например, кратчайшего или быстрейшего) на основе подмножества (подсети) сегментов, обладающих определенными свойствами — например, одного класса, степени загруженности и т. п.;
- временная составляющая включает темпоральные характеристики, например распределение степени загруженности по времени суток или в сезонном измерении.

3 Базовые модели данных

В геоинформатике используется широкий спектр моделей, обеспечивающих описание геообъектов в пространствах различной размерности и в различных системах координат. В литературе представлено множество классификаций моделей и наименований конкретных моделей [11–14]. Однако для данного исследования целесообразно обобщить их в виде следующих двух основных типов пространственных моделей (аналогичный подход в [15–17]):

- (а) *композиционные* — геообразы, или собственно геоизображения¹, представляющие собой аналоговое или цифровое описание распределения яркости электромагнитного излучения (волнового фронта), поступающего от исследуемой предметной области (участка местности или объекта) в определенном диапазоне(ах) длин волн, по полю изображения. При этом характер расположения значений яркости по полю изображения может быть как регулярным (цифровой «растр»), так и диффузным (аналоговое фотоизображение). Во всей своей совокупности это распределение представляет собой изображение данной предметной области, построенное по определенному закону проектирования. Геоизображение — одна из наиболее простых по своей внутренней сути пространственных моделей, но вместе с тем очень сложная для анализа изображенных на ней сущностей как в связи со сложностями декомпозиции на отдельные сущности, так и ограниченными возможностями их описания пиксельной моделью данных;

¹Следует отметить, что в ряде источников термин «геоизображение» употребляется в широком смысле — как изображение местности, получаемое на основе геоданных любого рода [11]. Это является следствием традиционного картографического представления геоданных как, в первую очередь, визуального, графического (аналогового) изображения местности. В цифровых картографических технологиях в качестве первичного выступает уровень собственно цифровых данных, а их визуальное отображение является вторичным. В данном тексте термин «геоизображение» употребляется в узком смысле — только как композитивный образ местности или объекта (фото- или картографическое изображение). А в качестве обобщающего понятия геоданных представляется целесообразным использование термина «геомодель».

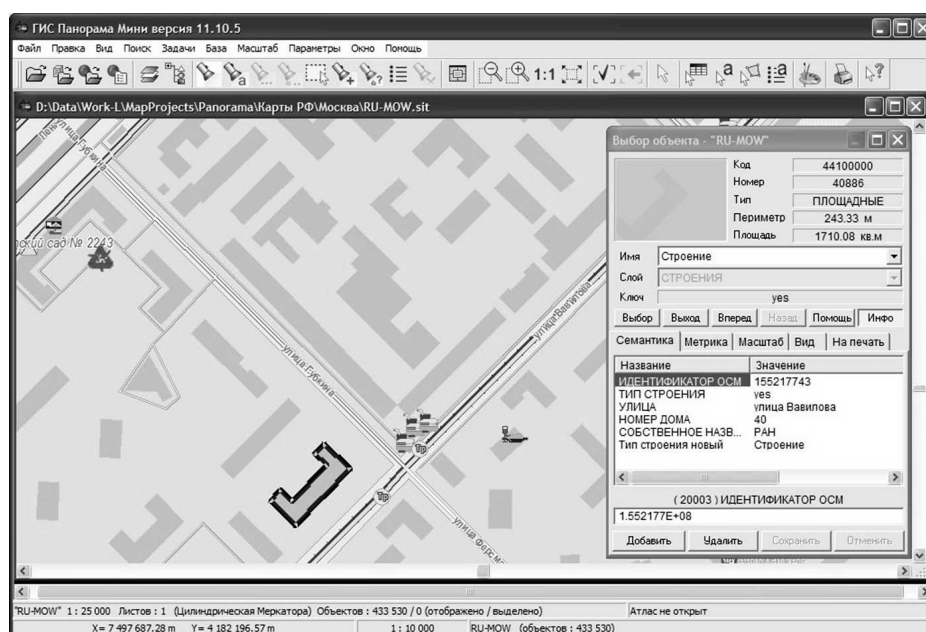


Рис. 1 Пример визуализации пространственного объекта и связанных с ним семантических данных

(б) *аппроксимирующие*, основанные на примитивах аналитической геометрии или линейной алгебры, реже — на полиномах невысоких степеней (сплайнах, например кривых Безье), а чаще — полилинейные (векторные). Данные таких моделей представляют собой описания узловых точек пространства (вершин), а также неявно или явно определенные правила аппроксимации сегментов между ними и топологию соединения этих сегментов в конструкцию, соответствующую пространственной локализации отдельного геообъекта.

Пример визуализации полилинейной модели представлен на рис. 1, там же показано, как для выбранного пространственного объекта — одного из зданий Вычислительного центра ФИЦ ИУ РАН (Москва) в дополнительной форме отображены его семантические характеристики, в частности сведения о его адресе (улица Вавилова, дом 40).

К разновидностям этой модели можно отнести модели поверхностей (например, модель TIN (triangulated irregular network)), а также модели «облака точек», получаемых методами радиолокации или лазерного сканирования. Данные для аппроксимирующих моделей могут формироваться либо на основе анализа и обработки геоизображений, либо получаться непосредственно различными измерительными средствами: спутниковым позиционированием, различными видами полевой топографической съемки и т. п.

4 Формы представления данных

Данные могут существовать как в *аналоговой* форме (на их использовании основана традиционная картография), так и в *цифровой* форме, применением которых занимаются цифровая картография и геоинформатика.

Традиционная картография хранит свои данные в аналоговой форме. Они представляют собой фотоизображения и бумажные картографические изображения, а также различные текстовые и числовые сведения об объектах и местности, например: каталоги координат, физико-географическая характеристика местности для карт масштаба 1 : 200 000 и т. п. Для обработки таких данных численными методами необходимо сначала извлечь данные из аналогового носителя (т. е. выполнить измерения по карте или снимку), затем выполнить числовую обработку данных, а полученные данные затем вновь оформить в виде картографического материала. Помимо явного неудобства осуществляемых вручную аналогово-цифрового и цифроаналогового преобразований здесь еще играет роль фактор постепенного снижения точности с каждым новым преобразованием¹.

По этой причине картография стала одной из первых отраслей знания, которая уже с начала 1960-х гг. стала использовать вычислительную технику и прочие методы автоматизации, а также хранить свои данные в цифровом виде. Например, в Канаде в 1963–1971 гг. под руководством Р. Томлинсона был разработан классический пример крупной универсальной региональной ГИС — Канадская ГИС. На основе этих работ был принят стандарт по формированию национальной топографической базы данных [18]. С этого времени началось развитие цифровой картографии и геоинформатики. Для наглядности в таблице представлено сопоставление рассмотренных выше моделей.

5 Сравнение особенностей представления семантики

В завершение данного обзора следует сказать об особенностях и возможностях представления семантики в каждой разновидности моделей.

Аналоговые изображения (листы карты или фотоизображения) являются основным способом хранения данных в традиционной картографии, поэтому вся необходимая семантика, относящаяся как к отдельным геообъектам, так и к изображению в целом, наносится непосредственно на изображение. В случае карты к семантической составляющей относятся: изобразительные способы оформления этих объектов (включая их условные обозначения); подписи географических названий, числовых и текстовых характеристик объектов карты; зарамочное оформление, содержащее сведения, относящиеся к листу карты в целом. Очевидно, что при таком подходе далеко не вся семантика объектов

¹Помимо методических ошибок преобразований — аналогово-цифрового (измерений) и цифроаналогового (оформление картматериала) — существенную роль играет также высокая вероятность возникновения ошибок, вызванных человеческим фактором.

Сопоставление моделей геоданных

Вид геоданных	Форма представления	
	Аналоговая	Цифровая
Композитный образ	– фотографические аэрокосмические и наземные изображения – аналоговые картографические изображения (бумажные и прочие карты, планы и др.)	– растровые аэрокосмические и наземные изображения (в том числе гиперспектральные кубы) – регулярные цифровые модели поверхностей и пространства (матрицы высот, качеств, слоев) – сканированные образы бумажных картматериалов
Аппроксимирующая модель	– каталоги координат и/или высот и описания объектов местности (бумажные)	– модели геообъектов и поверхностей (сплайновые и векторные)

местности может быть отражена на карте, поэтому отражаются только наиболее значимые характеристики объектов местности, т. е., как правило, здесь присутствует *необратимая семантическая генерализация*. Аналогичная ситуация имеет место и для фотоснимков.

Аналоговыми аппроксимирующими моделями выступают геоданные в виде каталогов координат и высот, всевозможные семантические сведения и описания, а также пространственно-привязанные к конкретным объектам местности; физически они существуют в бумажном виде.

Цифровые изображения содержат в себе, как правило, развитую систему семантических характеристик, относящихся к изображению в целом, примером является расширяемая система тегов, реализуемая, например, форматом файлов изображений TIFF и отражающая практически значимые свойства изображения.

Цифровые аппроксимирующие модели, в отличие от ситуации в традиционной картографии, выступают в качестве одного из основных современных способов представления геоданных. Их возможности семантического описания всецело определяются только конкретными реализациями моделей и форматов описания данных — семантические атрибуты могут присутствовать на любом уровне объектной модели. Вместе с тем по технологическим причинам обычно применяется раздельное хранение метрики и семантики — метрика геообъектов обычно хранится в специализированных базах данных (БД), оптимизированных под работу с пространственными данными, а семантика (количественные и качественные характеристики геообъектов и метаданные геоданных, имеющие сложную структуру) — в атрибутивных БД, представляющих собой обычно реляционные БД

общего назначения; однако практикуются и варианты совместного хранения, например в обменных форматах.

6 Типология связей многоуровневой структуры геоданных

В контексте исследования процессов генерализации, ориентированного на создание в информатике методологии ОГИО, необходимо рассмотреть некоторые специфические свойства поддерживающих эти процессы структур геоданных. Дело в том, что для обеспечения процессов генерализации необходимо применение специальной, *многоуровневой* структуры геоданных: аналогично «пирамиде», используемой для ускорения визуализации изображений [19], наборы геоданных с различной степенью обобщения, по сути, образуют собой пирамиду данных — так называемую *мультимасштабную* базу геоданных [20]. Уровни этой структуры в литературе обозначаются как уровни детализации (Level of Detail, LoD) [15, 16, 20].

Отличительной чертой аналоговой генерализации являлась принципиальная невозможность автоматизации ее обратимости, возможно только ручное обращение к исходным картографическим материалам. Цифровая технология представления данных дает принципиальную возможность в явном виде задать и в дальнейшем использовать установленное в информационной системе соответствие между исходными и генерализованными данными одного и того же объекта, т. е. становится возможным программно реализовать детерминированный обратный переход от генерализованных к исходным данным — *обратимость генерализации*.

Вместе с тем, в практике геоинформатики генерализация перестала быть разовым процессом составления масштабного ряда карт, выполняемым только при накоплении «критической массы» изменений на местности. Современные реалии выдвигают более жесткие требования к качеству геоданных (их точности, полноте, достоверности), что достигается их регулярной актуализацией, сопровождающейся каскадным обновлением существующих, добавлением вновь возникших и исключением исчезнувших геообъектов [7, 16, 20]. Вследствие этого генерализация данных стала, по сути, непрерывно выполняемым процессом. Наряду с этим при визуализации данных часто возникает необходимость выполнять процесс генерализации в режиме реального времени, «на лету»; однако в данном случае могут быть использованы предварительно генерализованные данные ближайшего к текущему масштабу изображения уровня обобщения.

С учетом перечисленных особенностей для обеспечения полноценной поддержки обратимости и автоматизации процессов генерализации необходима специальная многоуровневая структура данных, отдельные аспекты функционирования которой упоминаются в [7, 15, 16, 20–22]; среди них, как правило, рассматриваются следующие: обеспечение связей между одноименными объектами в различных LoD, например в [7, 15, 16, 20, 21], а также поддержание

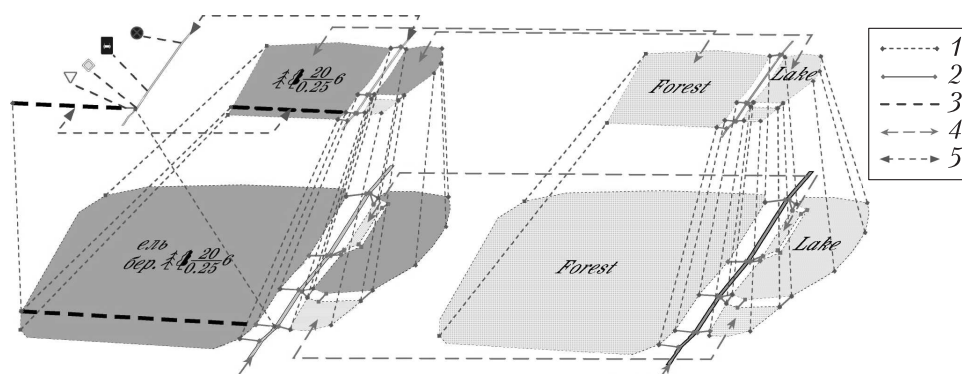


Рис. 2 Структура связей многоуровневой обратимой модели геоанных: 1 — масштабные; 2 — топологические; 3 — семантические; 4 — альтернативные; 5 — варианты

топологической согласованности, что является одним из правил генерализации [7, 16, 22]. Вместе с тем эти аспекты не исчерпывают все возможные виды связей.

На рис. 2 показана предлагаемая более общая структура связей многоуровневой обратимой модели геоанных¹. Каждый из элементов этой структуры — набор данных геообъекта, соответствующий определенному уровню обобщения (LoD), — имеет как «вертикальные» *масштабные связи* с соответствующими элементами других LoD, так и «горизонтальные», которые отражают *топологические связи* между геообъектами, принадлежащими одному LoD.

В дополнение к этому также могут иметь место и «диагональные» связи, отражающие преемственность различных производных вариантов генерализации одних и тех же исходных данных (например, базовой топографической карты и создаваемых на ее основе специальных тематических карт более мелкого масштаба) — *вариантные связи*. С информационной точки зрения вариантный подход упоминается, например, в работе Э. Кодда [23]. Так, на рис. 2 в верхнем левом углу показан вариант создания на основе базовых геоанных специализированной модели дорожной сети. На этой же модели показаны семантические связи, которые обогащают узлы пространственной модели дополнительной семантической нагрузкой — правилами движения по транспортной сети, отраженные посредством дорожных знаков.

Помимо этого, можно представить еще один класс связей — между аналогичными по описываемому содержанию, но принципиально не родственными между собой данными — *альтернативные связи*. В качестве примера таких связей

¹Здесь речь идет только об аппроксимационной модели — векторных данных. Возможно также аналогичное рассмотрение растровой модели, однако в цифровой картографии именно векторные данные обеспечивают полную реализацию основных функциональных возможностей ГИС, а растровая модель имеет хотя и широкое, но ограниченное применение.

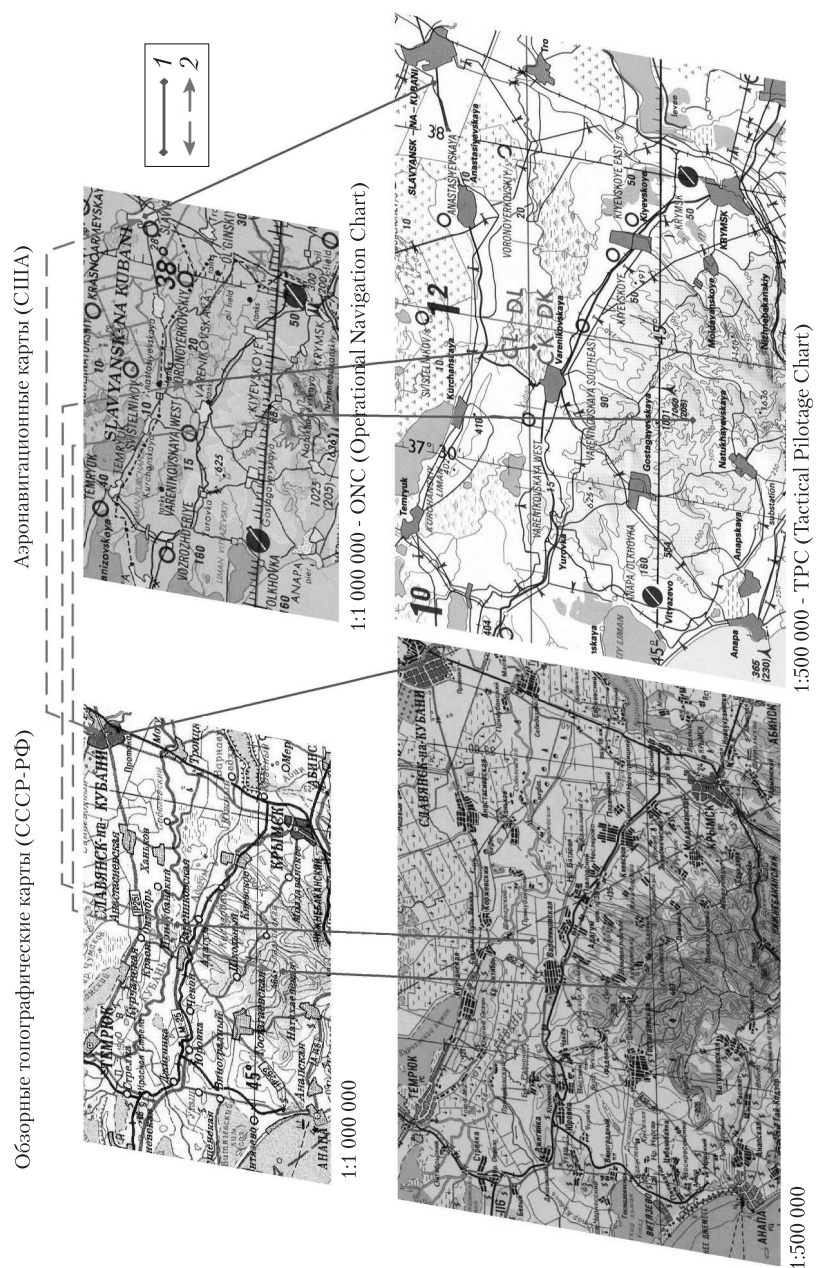


Рис. 3 Иллюстрация некоторых типов связей модели геоанных: 1 — масштабные связи; 2 — альтернативные связи

можно указать, например, взаимное увязывание содержания карт, создаваемых независимо в различных странах и в различных картографических традициях. Другой пример — использование нескольких тематических вариантов (альтернатив) базовой подложки в работе веб-порталов [24]. Иллюстрация масштабных и альтернативных связей на наглядном примере сопоставления изображений отечественной топографической карты и аэронавигационных карт США (созданных Aeronautical Chart and Information Center, U.S. Air Force) показана на рис. 3.

Подход, связанный с выделением вариантных и альтернативных связей в контексте анализа методов картографической генерализации, в исследованных источниках не встречался.

С прикладной точки зрения выделение вариантного типа связей позволит обеспечить в хранилищах данных преемственность между исходными наборами данных и производными от них вариантами обобщения, создаваемыми с конкретными целями различными методами, например комплексной топографической карты и специфической модели транспортной сети, показанных на рис. 2. Альтернативный тип связей может представлять интерес для решения задач обеспечения интероперабельности данных из альтернативных источников данных (см. рис. 2 и 3), в том числе с целью заполнения лагун в покрытии геоданными заданного района. В дальнейших исследованиях предполагается более тщательно рассмотреть роль вариантных и альтернативных связей в контексте анализа методов картографической генерализации.

Подводя итоги, можно отметить, что геообъекту в общем случае соответствует набор вариантов его информационного описания, каждый из которых предназначен для использования согласно целям, задачам и уровням обобщения геоданных. Множественность вариантов и альтернативность информационного описания обусловлена тем, что одному и тому же геообъекту в общем случае могут соответствовать несколько метрических и семантических описаний, каждое из которых предназначено для использования в качестве текущего варианта метрики или семантики данного геообъекта в процессах обработки на различных уровнях обобщения. При этом можно выделить специфику метрического описания пространственных данных, которая выражается в том, что каждая из метрик может отличаться от других не только степенью подробности пространственного описания, но и типом метрики: в общем случае имеет место переход от площадной/контурной метрики (полигона) к линейной (полилинии, кривой) или к точечной метрике.

7 Заключение

В работе рассмотрены особенности моделей представления геоданных в аналоговой и цифровой парадигмах отражения и обработки геоданных. Анализ этих особенностей позволяет сделать вывод о том, что геоданные могут служить примером обобщенного типа данных, включающим в себя пространственный, временной и семантический аспекты.

В контексте генерализации как процесса конкретно-абстрактных информационных трансформаций необходимо учитывать, что:

- (а) этот процесс касается не только обобщения данных каждого отдельно взятого объекта, но должен рассматриваться в контексте преобразования всей топологической структуры геопространства;
- (б) модель данных, обеспечивающая возможность хранения информационных объектов разных уровней обобщения, полученных в результате многоэтапного процесса информационных трансформаций, представляет собой *многоуровневую* структуру («пирамиду»). В работе предложена расширенная типология связей такой модели, которая включает пять типов связей: масштабные, топологические, семантические, вариантные и альтернативные. Полученные результаты планируется использовать при создании методологии ОГИО в ГИС и других информационных системах.

Элементом новизны данной работы является построение расширенной типологии связей, которые, в общем случае, могут иметь место в многоуровневой модели данных, а также выделение в явном виде свойств вариантности и альтернативности процессов генерализации, которые играют важную роль в создаваемой методологии ОГИО текстовой [1, 2] и пространственно-временной природы.

Литература

1. Зацман И. М., Мамонова О. С., Щурова А. Ю. Обратимость и альтернативность генерализации моделей перевода коннекторов в параллельных текстах // Системы и средства информатики, 2017. Т. 27. № 2. С. 125–142.
2. Зацман И. М., Кружков М. Г., Лощилова Е. Ю. Методы анализа частотности моделей перевода коннекторов и обратимость генерализации статистических данных // Системы и средства информатики, 2017. Т. 27. № 4. С. 164–176.
3. Taillandier P., Duchêne C., Drogoul A. Knowledge revision in systems based on an informed tree search strategy: Application to cartographic generalisation // 5th Conference (International) on Soft Computing as Transdisciplinary Science and Technology Proceeding. — New York, NY, USA: ACM, 2008. P. 273–278. doi: 10.1145/1456223.1456281.
4. Beard K. A semantic web based gazetteer model for VGI // ACM SIGSPATIAL Workshop (International) on Crowdsourced and Volunteered Geographic Information Proceedings. — New York, NY, USA: ACM, 2012. P. 54–61. doi: 10.1145/2442952.2442962.
5. Rosenbloom P. S. On computing: The fourth great scientific domain. — Cambridge, MA, USA: MIT Press, 2013. 307 p.
6. Döllner J., Kersting O. Dynamic 3D maps as visual interfaces for spatio-temporal data // 8th ACM Symposium (International) on Advances in Geographic Information Systems Proceedings. — New York, NY, USA: ACM, 2000. P. 115–120. doi: 10.1145/355274.355291.

7. *Dogru A., Ulugtekin N.* Junction modeling in vehicle navigation maps and multiple representations // 20th ISPRS Congress Proceedings, 2004. Vol. 35. Part B4. P. 244–248.
8. *Chimani M., van Dijk T. C., Haunert J.-H.* How to eat a graph: Computing selection sequences for the continuous generalization of road networks // 22nd ACM SIGSPATIAL Conference (International) on Advances in Geographic Information Systems Proceedings. — New York, NY, USA: ACM, 2014. P. 243–252. doi: 10.1145/2666310.2666414.
9. *Schäfers M., Lipeck U. W.* SimMatching: Adaptable road network matching for efficient and scalable spatial data integration // 1st ACM SIGSPATIAL PhD Workshop Proceedings. — New York, NY, USA: ACM, 2014. P. 43–48. doi: 10.1145/2694859.2694866.
10. *Oehrlein J., van Dijk T. C., Haunert J.-H.* Location-dependent generalization of road networks based on equivalent destinations // Eurographics / IEEE VGTC Conference on Visualization Proceedings. — Goslar, Germany: Eurographics Association, 2016. P. 451–460.
11. *Капралов Е. Г., Кошкарёв А. В., Тикунов В. С. и др.* Основы геоинформатики. — М.: Академия, 2004. Т. 1. 352 с.
12. *Чандра А. М., Гош С. К.* Дистанционное зондирование и географические информационные системы. — М.: Техносфера, 2008. 312 с.
13. *Шовенгердт Р. А.* Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений. — М.: Техносфера, 2010. 560 с.
14. *Дулин С. К., Дулина Н. Г., Никушин Д. А.* Особенности моделей геоданных и методов их обработки в аспекте обеспечения семантической геоинтероперабельности // Информационные технологии, 2015. Т. 21. № 3. С. 224–235.
15. *Davis C. A., Laender A. H. F.* Multiple representations in GIS: Materialization through map generalization, geometric, and spatial analysis operations // 7th ACM Symposium (International) on Advances in Geographic Information Systems Proceedings. — New York, NY, USA: ACM, 1999. P. 60–65. doi: 10.1145/320134.320151.
16. *Qiang H., Bertolotto M.* A multi-level data structure for vector maps // 12th Annual ACM Workshop (International) on Geographic Information Systems Proceedings. — New York, NY, USA: ACM, 2004. P. 214–221. doi: 10.1145/1032222.1032254.
17. *Corcoran P., Mooney P., Bertolotto M.* Utilizing geometric coherence in the computation of map transformations // Comput. Geosci., 2012. Vol. 47. P. 151–159.
18. *Журкин И. Г., Шайтура С. В.* Геоинформационные системы. — М.: КУДИЦ-Пресс, 2009. 272 с.
19. *Комиссаров Д. В.* Методика решения проблем цифрового фототриангулирования // Тр. Междунар. конф. RDAMM-2001, 2001. Т. 6. Ч. 2. С. 213–217.
20. *Лурье И. К., Самсонов Т. Е.* Структура и содержание базы пространственных данных для мультимасштабного картографирования // Геодезия и картография, 2010. № 11. С. 17–23.
21. *Belussi A., Catania B., Bertino E.* A reference framework for integrating multiple representations of geographical maps // 11th ACM Symposium (International) on Advances in Geographic Information Systems Proceedings. — New York, NY, USA: ACM, 2003. P. 33–40. doi: 10.1145/956676.956681.

22. *Gubiani D., Montanari A.* A conceptual spatial model supporting topologically-consistent multiple representations // 16th ACM SIGSPATIAL Conference (International) on Advances in Geographic Information Systems Proceedings. — New York, NY, USA: ACM, 2008. P. 90–100. doi: 10.1145/1463434.1463446.
23. *Codd E. F.* Extending the database relational model to capture more meaning // ACM T. Database Syst., 1979. Vol. 4. No. 4. P. 395–434.
24. *Воронина М. В., Зайченко С. А., Зыкова Е. Ф.* Развитие базовой подложки в мультимасштабном картографировании // InterCarto/InterGIS: Мат-лы Междунар. конф. ИнтерКарто/ИнтерГИС, 2013. Т. 19. С. 19–22. doi: 10.24057/2414-9179-2013-1-19-19-22.

Поступила в редакцию 05.03.18

COMPARISON OF THE FEATURES OF THE REPRESENTATION OF GEODATA IN CARTOGRAPHY AND GEOINFORMATICS

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 aim of the study is formation of approaches to creation of the methodology of data generalization. The comparative analysis of models of GEODATA in analogue and digital paradigms is presented. It is shown that GEODATA can be considered as an example of the generalized complex data type, which includes along with semantics spatial or spatial-temporal components. The features of organization of multilevel geodata bases form the extended typology of relations in this model. The features of variability and alternativeness of GEODATA, which play an important role in the created methodology of reversible generalization of information objects, are considered.

Keywords: geodata; digital cartography; geoinformatics; multilevel geodata base; cartographic generalization

DOI: 10.14357/08696527180205

References

1. Zatsman, I. M., O. S. Mamonova, and A. Yu. Shchurova. 2017. Obratimost' i al'ternativnost' generalizatsii modeley perevoda konnektorov v parallel'nykh tekstakh [Reversibility and alternativeness of generalization of connectives translations models in parallel texts]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 27(2):125–142.

2. Zatsman, I. M., M. G. Kruzhkov, and E. Yu. Loshchilova. 2017. Metody analiza chastotnosti modeley perevoda konnektorov i obratimost' generalizatsii statisticheskikh dannykh [Methods of frequency analysis of connectives translations and reversibility of statistical data generalization]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 27(4):164–176.
3. Taillandier, P., C. Duchêne, and A. Drogoul. 2008. Knowledge revision in systems based on an informed tree search strategy: Application to cartographic generalisation. *5th Conference (International) on Soft Computing as Transdisciplinary Science and Technology Proceedings*. New York, NY: ACM. 273–278. doi: 10.1145/1456223.1456281.
4. Beard, K. 2012. A semantic web based gazetteer model for VGI. *1st ACM SIGSPATIAL Workshop (International) on Crowdsourced and Volunteered Geographic Information Proceedings*. New York, NY: ACM. 54–61. doi: 10.1145/2442952.2442962.
5. Rosenbloom, P. S. 2013. *On computing: The fourth great scientific domain*. Cambridge, MA: MIT Press. 307 p.
6. Döllner, J., and O. Kersting. 2000. Dynamic 3D maps as visual interfaces for spatio-temporal data. *8th ACM Symposium (International) on Advances in Geographic Information Systems Proceedings*. New York, NY: ACM. 115–120. doi: 10.1145/355274.355291.
7. Dogru, A., and N. Ulugtekin. 2004. Junction modeling in vehicle navigation maps and multiple representations. *20th ISPRS Congress Proceedings* 35(B4):244–248.
8. Chimani, M., T. C. van Dijk, and J.-H. Haunert. 2014. How to eat a graph: Computing selection sequences for the continuous generalization of road networks. *22nd ACM SIGSPATIAL Conference (International) on Advances in Geographic Information Systems Proceedings*. New York, NY: ACM. 243–252. doi: 10.1145/2666310.2666414.
9. Schäfers, M., and U. W. Lipeck. 2014. SimMatching: Adaptable road network matching for efficient and scalable spatial data integration. *1st ACM SIGSPATIAL PhD Workshop Proceedings*. New York, NY: ACM. 43–48. doi: 10.1145/2694859.2694866.
10. Oehrlein, J., T. C. van Dijk, and J.-H. Haunert. 2016. Location-dependent generalization of road networks based on equivalent destinations. *Eurographics/IEEE VGTC Conference on Visualization Proceedings*. Goslar, Germany: Eurographics Association. 451–460.
11. Kapralov, E. G., A. V. Koshkarev, and V. S. Tikunov. 2004. *Osnovy geoinformatiki* [Fundamentals of geoinformatics]. Moscow: Akademiya. Vol. 1. 352 p.
12. Chandra, A. M., and S. K. Gosh. 2008. *Distsionnoe zondirovanie i geograficheskie informatsionnye sistemy* [Remote sensing and geographical information system]. Moscow: Tekhnosfera. 312 p.
13. Shovengerdt, R. A. 2010. *Distsionnoe zondirovanie. Modeli i metody obrabotki izobrazheniy* [Remote sensing. Models and methods for image processing.]. Moscow: Tekhnosfera. 560 p.
14. Dulin, S. K., N. G. Dulina, and D. A. Nikishin. 2015. Osobennosti modeley geodannykh i metodov ikh obrabotki v aspekte obespecheniya semanticheskoy geointeroperabel'nosti [Features of models of geodata and methods of their processing in aspect of maintenance semantic geointeroperability]. *Informatsionnye tekhnologii* [Information Technologies] 21(3):224–235.

15. Davis, C. A., and A. H. F. Laender. 1999. Multiple representations in GIS: Materialization through map generalization, geometric, and spatial analysis operations. *7th ACM Symposium (International) on Advances in Geographic Information Systems Proceedings*. New York, NY: ACM. 60–65. doi: 10.1145/320134.320151.
16. Qiang, H., and M. Bertolotto. 2004. A multi-level data structure for vector maps. *12th Annual ACM Workshop (International) on Geographic Information Systems Proceedings*. New York, NY: ACM. 214–221. doi: 10.1145/1032222.1032254.
17. Corcoran, P., P. Mooney, and M. Bertolotto. 2012. Utilizing geometric coherence in the computation of map transformations. *Comput. Geosci.* 47:151–159.
18. Zhurkin, I. G., and S. V. Shaytura. 2009. *Geoinformatsionnye sistemy* [Geoinformation systems]. Moscow: KUDITS-Press. 272 p.
19. Komissarov, D. V. 2001. Metodika resheniya problem tsifrovogo fototriangulirovaniya [Method of addressing of digital phototriangulation]. *Conference (International) RDAMM-2001 Proceedings*. 6(2):213–217.
20. Lurie, I. K., and T. E. Samsonov. 2010. Struktura i sodержanie bazy prostranstvennykh dannykh dlya mul'timasshtabnogo kartografirovaniya [Structure and content of spatial database for multi-dimensional mapping]. *Geodeziya i kartografiya* [Geodesy and Cartography] 11:17–23.
21. Belussi, A., B. Catania, and E. Bertino. 2003. A reference framework for integrating multiple representations of geographical maps. *11th ACM Symposium (International) on Advances in Geographic Information Systems Proceedings*. New York, NY: ACM. 33–40. doi: 10.1145/956676.956681.
22. Gubiani, D., and A. Montanari. 2008. A conceptual spatial model supporting topologically-consistent multiple representations. *16th ACM SIGSPATIAL Conference (International) on Advances in Geographic Information Systems Proceedings*. New York, NY: ACM. 90–100. doi: 10.1145/1463434.1463446.
23. Codd, E. F. 1979. Extending the database relational model to capture more meaning. *ACM T. Database Syst.* 4(4):395–434.
24. Voronina, M. V., S. A. Zaychenko, and Y. F. Zykova. 2013. Razvitie bazovoy podlozhki v mul'timasshtabnom kartografirovanii [Basemap evolution in multiscale cartography]. *InterCarto/InterGIS* 19(1):19–22. doi: 10.24057/2414-9179-2013-1-19-19-22.

Received March 5, 2018

Contributor

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

ОСОБЕННОСТИ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГЕОИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ КАК ЭЛЕМЕНТА СИТУАЦИОННОГО ЦЕНТРА

А. А. Зацаринный¹, А. В. Воронин², Ю. С. Ионенков³

Аннотация: Статья продолжает тематический цикл работ, посвященных оценке эффективности информационных систем. В данном случае рассматривается геоинформационная система (ГИС) как элемент ситуационного центра (СЦ). Предложен интегральный показатель эффективности использования ГИС (ПЭИГИС), позволяющий объединить оценку качества визуализации динамического конфигурирования электронного атласа (ЭА) по критерию наглядности и затратам на конструктивное исполнение собственно технической части ГИС. Представлены расчет и экспериментальная проверка эффективности ГИС. Изложенный подход позволяет оценить эффективность ГИС при их использовании в составе СЦ, что имеет большое практическое значение в совершенствовании механизма управления соответствующими организационными системами.

Ключевые слова: геоинформационные системы (ГИС); интегральный показатель эффективности использования геоинформационной системы; ПЭИГИС; визуализация

DOI: 10.14357/08696527180206

1 Введение

Ситуационные центры в последние годы находят все большее применение в сфере принятия обоснованных решений для сложных аналитических задач. Они эффективно используются для управления ресурсами министерств, ведомств, компаний и регионов, ускорения подготовки управленческих решений и в других областях.

В структурно-функциональном плане СЦ представляет собой взаимосвязанную совокупность трех составляющих: информационно-аналитической, информационно-технологической и технической [1, 2]. Первая составляющая определяет перечень типовых функциональных задач, вторая — технологии их решения,

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

²Институт проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук, aleksey.v.v@mail.ru

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

а третья — аппаратно-программные комплексы, непосредственно решающие задачи СЦ. Качество функционирования СЦ как сложных систем определяется научной обоснованностью предъявляемых к ним требований и их точной реализацией на всех стадиях жизненного цикла, что предполагает необходимость развития соответствующего методического аппарата оценки эффективности СЦ. В [3, 4] рассмотрены методические вопросы оценки эффективности СЦ на основе их структурно-функционального представления. При этом использован принцип комплексности оценки, заключающийся в том, что эффективность функционирования СЦ определяется показателями эффективности его компонентов: функционального, технологического, технического, эксплуатационного и организационного.

Одним из элементов СЦ являются ГИС [5, 6]. Под ГИС понимаются системы, предназначенные для сбора, хранения, анализа и графической визуализации пространственных данных и связанной с ними информации о представленных в ГИС объектах. Создание и развитие ГИС как элементов технологического компонента СЦ требует объективной оценки их эффективности и выявления проблемных аспектов. Вместе с тем, в литературе, посвященной ГИС [7–13], методические вопросы оценки их эффективности практически не представлены.

В настоящей статье рассмотрен подход к определению интегрального ПЭИГИС, позволяющего объединить оценку качества визуализации динамического конфигурирования ЭА по критерию наглядности и затратам на конструктивное исполнение собственно технической части ГИС. Предлагаемый подход позволяет оценить эффективность ГИС при их использовании в составе СЦ.

2 Подход к оценке эффективности использования геоинформационной системы

Одной из функций ГИС является отображение разнородных данных на экране оператора СЦ с возможностью принятия решения по рассматриваемой задаче.

Исходя из этого, оценка эффективности использования ГИС может быть произведена на основе показателя качества визуализации и затрат на конструктивное исполнение технической части ГИС. При этом, чтобы рассматривать относительные единицы эффекта, требуется соотнести показатель качества визуализации и затраты на разработку и эксплуатацию ГИС с показателем качества и затратами ГИС предыдущего поколения [14].

В результате предлагается интегральный ПЭИГИС, позволяющий объединить оценку качества визуализации динамического конфигурирования ЭА по критерию наглядности и затрат на конструктивное исполнение собственно технической части ГИС, соотнесенных с показателями обычной ГИС — ОГИС (предшествующего поколения).

Математическая форма записи интегрального показателя:

$$\Pi = \frac{k_{\text{ОГИС}} \Pi_{\text{ОГИС}}}{k_{\text{ГИС}} \Pi_{\text{ГИС}}}, \quad (1)$$

где $k_{\text{ОГИС}}$ — оценка качества визуализации ОГИС; $\Pi_{\text{ОГИС}}$ — цена ОГИС; $k_{\text{ГИС}}$ — оценка качества визуализации динамического конфигурирования ЭА ГИС, реализующей новые разработки; $\Pi_{\text{ГИС}}$ — цена ГИС.

Оценка качества визуализации динамического конфигурирования ЭА ГИС, отображающей геообъекты и разнородную описательную информацию, определяется выражением:

$$k(M, I, l_i, q_i, L, H) = \frac{S_{\Sigma_{\text{го}}}(M, I, l_i, q_i) + S_{\Sigma_{\text{ри}}}(J, u_j, o_j)}{S(L, H)}, \quad (2)$$

где M — масштаб ЭА; I — число геообъектов; l_i — длина i -го геообъекта в реальности; q_i — ширина i -го геообъекта в реальности; L и H — линейные размеры экрана; $S_{\Sigma_{\text{го}}}$ — площадь на экране геообъектов, выводимых в ЭА с учетом их пространственных размеров и масштаба, используемого в ЭА; $S_{\Sigma_{\text{ри}}}$ — площадь на экране разнородной сопроводительной информации с учетом ее размеров; J — число блоков разнородной описательной информации; u_j — длина j -го блока разнородной сопроводительной информации; o_j — высота j -го блока разнородной сопроводительной информации; S — площадь экрана.

Цена ГИС определяется следующим образом:

$$\Pi_{\text{ГИС}} = Z_{\text{рп}}, \quad (3)$$

где $Z_{\text{рп}}$ — затраты на разработку специализированной ГИС (СГИС).

Затраты на разработку продукта:

$$Z_{\text{рп}} = \Pi_{\text{тч}} + Z_{\text{пп}} + A_{\text{вт}_p} + Z_{\text{эл}}, \quad (4)$$

где $\Pi_{\text{тч}}$ — стоимость технической части ГИС; $Z_{\text{пп}}$ — затраты на оплату труда персонала; $A_{\text{вт}_p}$ — затраты на амортизацию вычислительной техники; $Z_{\text{эл}}$ — затраты на электроэнергию.

Затраты на оплату труда персонала рассчитываются по формуле:

$$Z_{\text{пп}} = t_{\text{прт}} S_{\text{чтс}}, \quad (5)$$

где $t_{\text{прт}}$ — трудоемкость разработки СГИС; $S_{\text{чтс}}$ — часовая тарифная ставка исполнителя.

Трудоемкость на разработку ГИС определяется выражением:

$$t_{\text{прт}} = t_{\text{и}} + t_{\text{а}} + t_{\text{п}} + t_{\text{от}} + t_{\text{д}}, \quad (6)$$

где $t_{\text{И}}$ — затраты труда на изучение и постановку задачи; $t_{\text{А}}$ — затраты труда на разработку решения задачи; $t_{\text{П}}$ — затраты труда на программирование; $t_{\text{ОТ}}$ — затраты труда на отладку продукта; $t_{\text{Д}}$ — затраты труда на подготовку документации.

Затраты труда на изучение и постановку задачи определяются как

$$t_{\text{И}} = \frac{QB}{75 \div 85}, \quad (7)$$

где Q — число этапов и элементарных процедур преобразования информации (вычислительных, логических и др.); B — коэффициент увеличения затрат на изучение и постановку задачи вследствие ее сложности и новизны (от 1 до 1,5 (1 — min, 1,5 — max)).

Затраты труда на разработку решения задачи:

$$t_{\text{А}} = \frac{QK_{\text{С}}}{20 \div 25}, \quad (8)$$

где $K_{\text{С}}$ — коэффициент сложности разработки.

Затраты труда на программирование:

$$t_{\text{П}} = \frac{Q}{15K_{\text{КВ}}}, \quad (9)$$

где $K_{\text{КВ}}$ — коэффициент квалификации разработчика.

Затраты труда на отладку продукта:

$$t_{\text{ОТ}} = \frac{Q}{5K_{\text{К}}}, \quad (10)$$

где $K_{\text{К}}$ — коэффициент коррекции программы.

Затраты труда на подготовку документации:

$$t_{\text{Д}} = \frac{QN_{\text{С}}}{(15 \div 20)K_{\text{КВ}}}, \quad (11)$$

где $N_{\text{С}}$ — число страниц в документации.

Для расчета выражения (5) требуется определение часовой тарифной ставки (из расчета 8-часового рабочего дня и 24-дневного рабочего месяца):

$$S_{\text{ЧТС}} = \frac{\text{ДД}}{192}, \quad (12)$$

где ДД — заработная плата разработчиков.

Для выражения (4) затраты на электроэнергию рассчитываются согласно

$$З_{Эл} = WT_M C_{Эл}, \quad (13)$$

где W — мощность, потребляемая техникой; T_M — время использования техники в течение временного интервала; $C_{Эл}$ — стоимость 1 кВт·ч электроэнергии.

Затраты на амортизацию вычислительной техники для (4) определяются согласно

$$A_{ВТ_p} = C_{ВТ} H_{АВ} K_{Исп}, \quad (14)$$

где $C_{ВТ}$ — стоимость вычислительной техники; $H_{АВ}$ — норма амортизационных отчислений за временной интервал; $K_{Исп}$ — коэффициент использования вычислительной техники за временной интервал:

$$K_{Исп} = \frac{\Sigma_t}{F_{ЭффВТ}}, \quad (15)$$

где Σ_t — суммарное время использования вычислительной техники за временной интервал; $F_{ЭффВТ}$ — эффективный фонд времени работы вычислительной техники за временной интервал.

Цена ОГИС определяется стоимостью ее технической части и соответствующего программного обеспечения:

$$Ц_{ОГИС} = C_{ТЧ} + C_{ОГИС}, \quad (16)$$

где $C_{ТЧ}$ — стоимость технической части ОГИС; $C_{ОГИС}$ — стоимость программного обеспечения ОГИС.

На основе выражений (1)–(16) интегральный ПЭИГИС принимает вид:

$$\Pi = \frac{S_{\Sigma_{го}}(M, I, l_i, q_i)}{S_{\Sigma_{ри}}(J, u_j, o_j) + S_{\Sigma_{го}}(M, I, l_i, q_i)} \times \frac{C_{ТЧ} + C_{ОГИС}}{\Pi_{ТЧ} + 3\Pi_{П}(t_{ПРТ}, S_{ЧТС}) + A_{ВТ_p}(C_{ВТ}, H_{АВ}, K_{Исп}) + З_{Эл}(W, T_M, C_{Эл})}. \quad (17)$$

Как видно из выражения (17), интегральный ПЭИГИС имеет прямую зависимость от площади покрытия на экране рассматриваемых геообъектов и стоимости технической части и программного обеспечения предшествующей ОГИС, обратную зависимость от суммы площадей покрытия на экране рассматриваемых геообъектов и блоков разнородной сопроводительной информации, а также стоимости технической части ГИС и затрат на ее разработку.

Далее произведем расчет и анализ результатов расчета интегрального ПЭИГИС.

3 Пример расчета показателя эффективности использования геоинформационной системы

Используя выражения (1)–(17), рассчитаем ПЭИГИС.

Расчет ПЭИГИС осуществлен с учетом исходных данных при оценке качества визуализации динамического конфигурирования ЭА по критерию наглядности: число геообъектов 1–50 000; одинаковые их средние размеры (1×2 м); неизменный масштаб электронной карты (ЭК) 1 : 10 000; выполнение условия $S_{\text{го}} = 2 \text{ мм}^2$; число блоков разнородной сопроводительной информации 1–50; одинаковые их средние размеры ($0,05 \times 0,05$ м); размеры экрана: $0,15 \times 0,3$ м — ноутбук, $0,35 \times 0,65$ м — ПЭВМ, $1,50 \times 2,50$ м — визуализационный экран; стоимость технических частей ГИС и ОГИС составляет от 10 тыс. до 1 млн руб.; стоимость программного обеспечения ОГИС — 100 тыс. руб.; затраты на разработку продукта в течение года без стоимости технической части — 500 тыс. руб. Графики представлены в нормированном виде:

$$\Pi_{H_x} = \frac{\Pi_x}{\max\{\Pi\}}. \quad (18)$$

На рис. 1 представлены графики зависимости ПЭИГИС от числа геообъектов при различной стоимости технической части ГИС ($C_{\text{ТЧ}} = 5\,000$; 50 000) и различном числе блоков разнородной сопроводительной информации ($j = 7$ и 32 для $k = 0,382$ (кривые 1 и 3 соответственно); $j = 12$ и 55 для $k = 0,618$ (кривые 2 и 4 соответственно)).

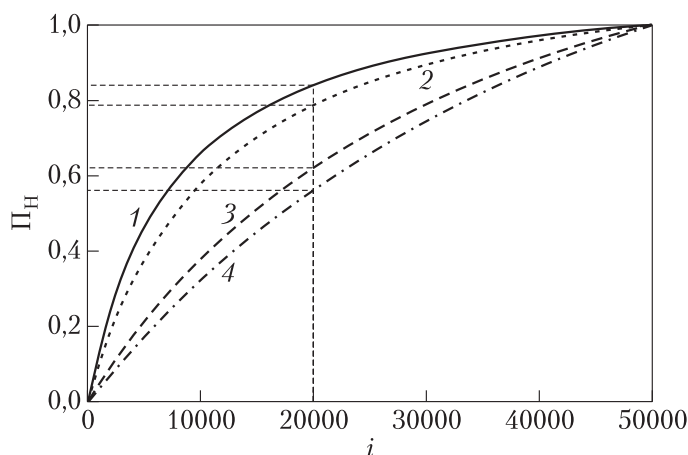


Рис. 1 Графики зависимости ПЭИГИС от числа геообъектов: 1 и 2 — $C_{\text{ТЧ}} = 5\,000$ руб. (1 — $j = 7$, $k = 0,382$; 2 — $j = 12$, $k = 0,618$); 3 и 4 — $C_{\text{ТЧ}} = 50$ тыс. руб. (3 — $j = 32$, $k = 0,382$; 4 — $j = 55$, $k = 0,618$)

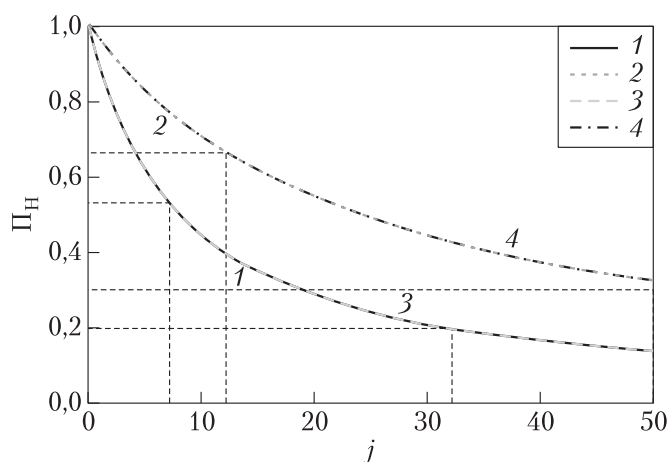


Рис. 2 Графики зависимости ПЭИГИС от числа блоков разнородной сопроводительной информации: 1 и 2 — $C_{ТЧ} = 5000$ руб.; 3 и 4 — $C_{ТЧ} = 50$ тыс. руб. (1 и 3 — $i = 10\,000$, $k = 0,382$; 2 и 4 — $i = 30\,000$, $k = 0,618$)

Анализ зависимостей позволяет сделать следующие выводы. Увеличение затрат на собственно техническую составляющую ГИС снижает эффективность использования ГИС (группа кривых 1 и 2 относительно группы кривых 3 и 4). Увеличение площади покрытия картографической среды разнородными описаниями снижает эффективность использования ГИС (кривые 1–4). Так, например, при числе геообъектов 20 000 эффективность использования ГИС составляет: кривая 1, $j = 7$, $P_H = 0,83$; кривая 2, $j = 12$, $P_H = 0,78$; кривая 3, $j = 32$, $P_H = 0,62$; кривая 4, $j = 55$, $P_H = 0,56$. Снижение наглядности (k) снижает эффективность использования ГИС (группа кривых 1 и 2; группа кривых 3 и 4).

На рис. 2 представлены графики зависимости ПЭИГИС от числа блоков разнородной сопроводительной информации при различном числе геообъектов ($i = 10\,000$ ($k = 0,382$) и $30\,000$ ($k = 0,618$)) различной стоимости технической части ГИС ($C_{ТЧ} = 5\,000$ и $50\,000$) (кривые 1 и 3 соответственно: $i = 10\,000$ ($k = 0,382$); кривые 2 и 4 соответственно: $i = 30\,000$ ($k = 0,618$)).

Анализ зависимостей позволяет сделать следующие выводы. Увеличение затрат на собственно техническую часть ГИС снижает эффективность ее использования (например, кривая 1 при $i = 10\,000$, $k = 0,382$ и $C_{ТЧ} = 5\,000$ — $P_H = 0,53$; при $i = 10\,000$, $k = 0,382$ и $C_{ТЧ} = 50\,000$ — $P_H = 0,2$). Увеличение площади покрытия картографической среды разнородными описаниями снижает эффективность использования ГИС (кривые 1–4). Так, например (кривая 2), при числе геообъектов 30 000, $C_{ТЧ} = 5\,000$; $k = 0,618$ и $j = 12$ эффективность использования ГИС составляет $P_H = 0,67$; при $j = 55$ — $P_H = 0,3$.

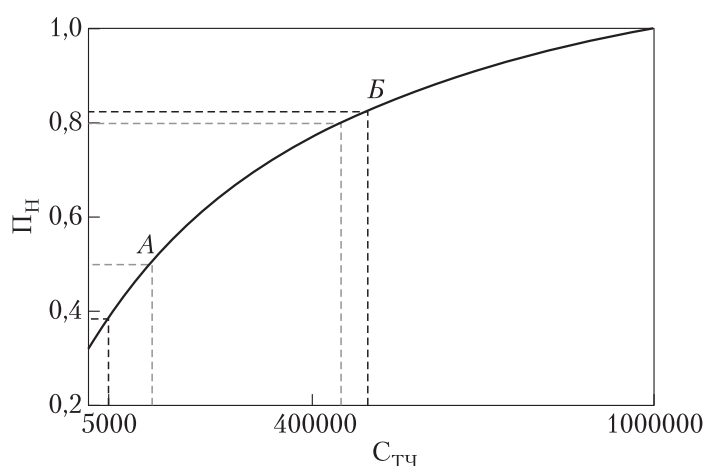


Рис. 3 График зависимости ПЭИГИС от стоимости ее технической части ($i = 50\,000$; $k = 0,382$): $A — j = 32$, $C_{ТЧ} = 50$ тыс. руб.; $B — j = 14$, $C_{ТЧ} = 500$ тыс. руб.

Размеры экрана

Вариант	H , м	L , м
1	0,2	0,4
2	0,4	0,8
3	0,6	1,2
4	0,8	1,6
5	1,0	2,0
6	1,2	2,4
7	1,4	2,8
8	1,6	3,2
9	1,8	3,6
10	2,0	4,0

На рис. 3 представлен график зависимости ПЭИГИС от стоимости ее технической части при различном числе блоков разнородной сопроводительной информации, фиксированном числе геообъектов (50 000) и $k = 0,382$.

Представленная зависимость позволяет сделать вывод, что с увеличением стоимости технической части ГИС эффективность ее использования возрастает. Это объясняется тем, что увеличение стоимости неразрывно связано с увеличением размеров используемого экрана (техническая часть ГИС). Данные по экранам представлены в исходных данных (см. таблицу).

Примерная стоимость рассматриваемых при анализе экранов составляет: $0,15 \times 0,3$ м — 5 000 руб.; $0,35 \times 0,65$ м — 10 000 руб.; $1,50 \times 2,50$ м — 50 000 руб. Увеличение размеров экранов ГИС позволяет отображать большее число блоков разнородной сопроводительной информации и геообъектов при сохранении наглядности ее восприятия. Так, например, при $i = 50\,000$, $j = 7$, $k = 0,382$ и $C_{ТЧ} = 5\,000$ — $P_H = 0,29$. При $i = 50\,000$, $j = 32$, $k = 0,382$ и $C_{ТЧ} = 50\,000$ — $P_H = 0,37$. При $i = 50\,000$, $j = 145$, $k = 0,382$ и $C_{ТЧ} = 500\,000$ — $P_H = 0,82$. Как видно из графика, зависимость имеет экспоненциальный характер, что обусловлено сложностью функции выражения (18). Следовательно, при достижении насыщения последующее увеличение стоимости технической части на приобретение экранов большей размерности дает меньший прирост ПЭИГИС. При анализируемых исходных данных целесообразный диапазон

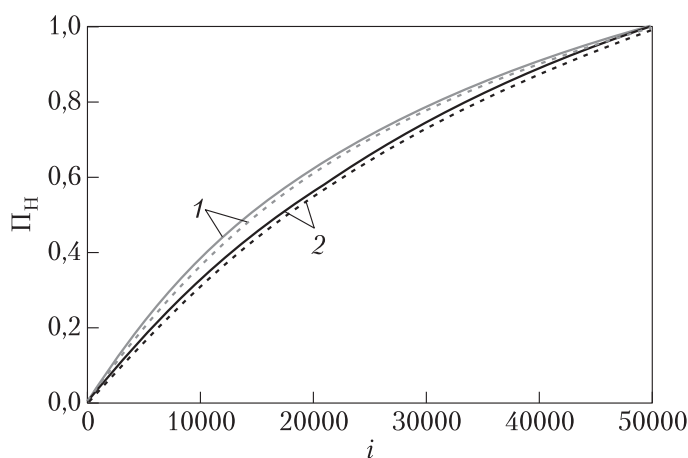


Рис. 4 Результаты расчета (сплошные кривые) и экспериментальной проверки (пунктирные кривые) ПЭИГИС, $C_{ТЧ} = 50$ тыс. руб.: 1 — $k = 0,382$; 2 — $k = 0,618$

значений стоимости технической части ГИС лежит в пределах показателя $\Pi_H \in [0,5; 0,8]$ (см. рис. 3).

Экспериментальная проверка показателя ПЭИГИС осуществлена при следующих исходных данных: число геообъектов 1–50 000; средние размеры одинаковы ($S_{го} = 2 \text{ мм}^2$); число блоков разнородной сопроводительной информации 1–50; размер экрана $0,35 \times 0,65 \text{ м}$ — ПЭВМ; стоимость технической части ГИС и ОГИС составляет 50 тыс. руб., стоимость программного обеспечения ОГИС — 100 тыс. руб. (Arc GIS — ESRI), затраты на разработку продукта в течение года без стоимости технической части 500 тыс. руб. Результаты расчета и экспериментальной проверки ПЭИГИС представлены на рис. 4 и свидетельствуют о незначительном рассогласовании экспериментальных данных (пунктирные кривые) с расчетными (сплошные кривые), что обусловлено погрешностью определения площади покрытия геообъектами площади картографического экрана (объекты имеют произвольный вид, точное определение площади которых не представляется возможным).

Таким образом, представленный подход позволяет оценить влияние ГИС на эффективность технологического компонента СЦ. Важно, что технологический компонент наиболее существенно влияет на эффективность всего СЦ при меньшем уровне развития организационной составляющей (меньших затратах на обслуживающий персонал).

4 Заключение

Качество функционирования ГИС определяется научной обоснованностью предъявляемых к ним требований, что предполагает развитие соответствующего методического аппарата оценки их эффективности.

В статье изложен подход к определению интегрального ПЭИГИС, позволяющего объединить оценку качества визуализации динамического конфигурирования ЭА по критерию наглядности и затрат на конструктивное исполнение собственно технической части ГИС.

Проведены расчет и экспериментальная проверка эффективности ГИС. Результаты расчета представлены в виде графиков зависимостей на рис. 1–4 и свидетельствуют о том, что увеличение площади покрытия картографической среды разнородными описаниями снижает эффективность использования ГИС, а увеличение затрат на собственно техническую составляющую ГИС снижает эффективность ее использования. Показатель применим для существующих и разрабатываемых ГИС. Результаты экспериментальной проверки подтвердили правильность теоретических выводов.

Изложенный подход позволяет оценить эффективность ГИС при их использовании в составе СЦ, что имеет большое практическое значение в совершенствовании механизма управления соответствующими организационными системами.

Литература

1. Зацаринный А. А., Босов А. В., Сучков А. П. Некоторые общие подходы к формированию функциональных требований к ситуационным центрам и их реализации // Системы и средства информатики, 2010. Т. 20. № 3. С. 98–125.
2. Зацаринный А. А. Организационные и системотехнические подходы к построению современных ситуационных центров // Методы построения и технологии функционирования ситуационных центров. — М.: ИПИ РАН, 2011. С. 11–26.
3. Зацаринный А. А., Ионенков Ю. С., Шабанов А. П. К вопросу о сравнительной оценке эффективности ситуационных центров // Системы и средства информатики, 2013. Т. 23. № 2. С. 155–171.
4. Зацаринный А. А., Ионенков Ю. С. К вопросу оценки эффективности автоматизированных систем с использованием метода анализа иерархий // Системы и средства информатики, 2015. Т. 25. № 3. С. 161–178.
5. Присяжнюк С. П., Филатов В. Н. Автоматизированная поддержка принятия решения на геоинформационных системах // Информация и космос, 2004. № 2. С. 4–8.
6. Присяжнюк С. П., Филатов В. Н., Федоненков С. П. Геоинформационные системы военного назначения. — СПб.: Балт. гос. техн. ун-т, 2009. 210 с.
7. Питенко А. А. Нейросетевой анализ в геоинформационных системах. — Красноярск: ФЦП «Интеграция», 2000. 97 с.
8. Орлов В. Ю. Основные понятия и определения геоинформационных систем в природоохранной деятельности. — Ярославль: Яросл. гос. ун-т, 2003. 96 с.
9. Присяжнюк С. П., Осипов Г. К. Научно-методические основы создания территориальных информационно-аналитических систем для органов местного самоуправления // Информация и космос, 2007. № 2. С. 7–9.
10. Розенберг И. Н., Беляков С. Л. Программные интеллектуальные оболочки геоинформационных систем / Под ред. Л. С. Бернштейна. — М.: Научный мир, 2010. 132 с.

11. Интеллектуальные географические информационные системы для мониторинга морской обстановки / Под общ. ред. чл.-кор. РАН Р. М. Юсупова и докт. техн. наук В. В. Поповича. — СПб.: Наука, 2013. 284 с.
12. *Ананьев Ю. С.* Геоинформационные системы. — Томск: ТПУ, 2013. 70 с.
13. *Милихин М. М., Гриценко Ю. Б., Рычагов М. М.* Комбинированный метод визуализации картографических данных веб-ориентированной геоинформационной системы // Доклады ТУСУР, 2015. № 1(35). С. 112–115.
14. *Воронин А. В.* Результаты анализа перспектив развития геоинформационных систем // Системы высокой доступности, 2017. № 4. С. 1–12.

Поступила в редакцию 01.03.18

THE FEATURES OF EFFICIENCY EVALUATION OF A GEOINFORMATION SYSTEM AS AN ELEMENT OF A SITUATIONAL CENTER

A. A. Zatsarinny, A. V. Voronin, and Yu. S. Ionenkov

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

Abstract: The article continues the thematic series of the articles devoted to information systems efficiency evaluation. In this case, a geoinformation system (GIS) is considered as an element of a situational center. In the article, the integral index of efficiency of GIS usage (IEUGIS), allowing to combine assessment of visualization quality of the dynamic configuration of the electronic atlas by the criterion of visualization and the costs of embodiment of the technical part of the GIS itself is suggested. The calculation and experimental verification of GIS efficiency are presented. This approach allows one to evaluate GIS efficiency when using them as a part of situational centers that is of great practical importance in improving the management mechanism by corresponding organizational systems.

Keywords: geoinformation systems (GIS); integral index of the geoinformation system use efficiency; IEUGIS; visualization

DOI: 10.14357/08696527180206

References

1. Zatsarinny, A. A., A. V. Bosov, and A. P. Suchkov. 2010. Nekotorye obshchie podkhody k formirovaniyu funktsional'nykh trebovaniy k situatsionnym tsentram i ikh realizatsii [Some general approaches to formation of functional requirements to situational centers and their realization]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 20(3):98–125.

2. Zatsarinny, A. A. 2011. Organizatsionnye i sistemotekhnicheskie podkhody k postroeniyu sovremennykh situatsionnykh tsentrov [Organizational and systemic-technical approaches to building of modern situational centers]. *Metody postroeniya i tekhnologii funktsionirovaniya situatsionnykh tsentrov* [Methods for building and technology of situational centers]. Moscow: IPI RAS: 11–26.
3. Zatsarinny, A. A., Yu. S. Ionenkov, and A. P. Shabanov. 2013. K voprosu o sravnitel'noy otsenke effektivnosti situatsionnykh tsentrov [Regarding comparative evaluation of situational centers efficiency]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 23(2):155–171.
4. Zatsarinny, A. A., and Yu. S. Ionenkov. 2015. K voprosu otsenki effektivnosti avtomatizirovannykh sistem s ispol'zovaniem metoda analiza ierarkhiy [Regarding automated systems efficiency evaluation using analytic hierarchy process]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 25(3):161–178.
5. Prisyazhnyuk, S. P., and V. N. Filatov. 2004. Avtomatizirovannaya podderzhka prinyatiya resheniya na geoinformatsionnykh sistemakh [The automated support of decision-making on geoinformation systems]. *Informatsiya i kosmos* [Information and Space] 2:4–8.
6. Prisyazhnyuk, S. P., V. N. Filatov, and S. P. Fedonenkov. 2009. *Geoinformatsionnye sistemy voennogo naznacheniya* [Geoinformation systems of military purposes]. St. Petersburg: Baltic State Technical University. 210 p.
7. Pitenko, A. A. 2000. *Neyrosetevoy analiz v geoinformatsionnykh sistemakh* [Neural network analysis in the geoinformation systems]. Krasnoyarsk: FCP “Integration.” 97 p.
8. Orlov, V. Yu. 2003. *Osnovnye ponyatiya i opredeleniya geoinformatsionnykh sistem v prirodookhrannoy deyatel'nosti* [The basic concepts and definitions of geoinformation systems in nature protection activity]. Yaroslavl: Yaroslavl State University. 96 p.
9. Prisyazhnyuk, S. P., and G. K. Osipov. 2007. Nauchno-metodicheskie osnovy sozdaniya territorial'nykh informatsionno-analiticheskikh sistem dlya organov mestnogo samoupravleniya [Scientific-methodical bases of creation of territorial information-analytical systems for local governments]. *Informatsiya i kosmos* [Information and Space] 2:7–9.
10. Rozenberg, I. N., and S. L. Belyakov. 2010. *Programmnye intellektual'nye obolochki geoinformatsionnykh sistem* [GIS software smart shells]. Ed. L. S. Bernshteyn. Moscow: Science World. 132 p.
11. Yusupov, R. M., and Popovich V. V., eds. 2013. *Intellektual'nye geograficheskie informatsionnye sistemy dlya monitoringa morskoy obstanovki* [Intellectual geographical information systems for monitoring of sea conditions]. St. Petersburg: Nauka. 284 p.
12. Anan'ev, Yu. S. 2013. *Geoinformatsionnye sistemy* [Geoinformation systems]. Tomsk: TPU. 70 p.
13. Milikhin, M. M., Yu. B. Gritsenko, and M. M. Rychagov. 2015. Kombinirovanny metod vizualizatsii kartograficheskikh dannykh veb-orientirovannoy geoinformatsionnoy sistemy [Combined geospatial data visualization method for web-based geographic information system]. *Doklady TUSUR* [Reports of TUSUR] 1(35):112–115.
14. Voronin, A. V. 2017. Rezul'taty analiza perspektiv razvitiya geoinformatsionnykh sistem [The results of the analysis of development prospects of geoinformation systems]. *Sistemy vysokoy dostupnosti* [Systems of High Availability] 4:1–12.

Received March 1, 2018

Contributors

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

Voronin Alexey V. (b. 1968) — Candidate of Science (PhD) in technology, associate professor, 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, Moscow 119333, Russian Federation, aleksey.v.v@mail.ru

Ionenkov Yuriy S. (b. 1956) — senior scientist, Institute of Informatics Problems, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation; uionenkov@ipiran.ru

СЕРВИС-ОРИЕНТИРОВАННЫЙ ИНТЕРФЕЙС ДЛЯ ДОСТУПА К НАУЧНЫМ ДАННЫМ В ОБЛАСТИ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОПЕРАТИВНОГО МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ ВУЛКАНОВ КАМЧАТКИ И СЕВЕРНЫХ КУРИЛ*

С. П. Королёв¹, И. М. Романова², С. И. Мальковский³, А. А. Сорокин⁴

Аннотация: На территории Дальнего Востока России располагаются десятки активных вулканов, требующих непрерывного внимания ученых для анализа и контроля их состояния. В качестве вспомогательных средств в этой работе выступают информационные системы (ИС), обеспечивающие решение различных научных задач. Однако разрозненность ИС и ограниченный доступ к информации существенно ограничивают возможность проведения комплексных исследований, что чревато в итоге катастрофическими последствиями для населения и народного хозяйства. Представлено описание разработанного сервис-ориентированного программного интерфейса, реализующего взаимодействие между основными существующими ИС для взаимного использования накопленных наборов научных данных и средств их обработки при проведении исследований и оперативного мониторинга состояния вулканов Камчатки и Северных Курил.

Ключевые слова: вулканы Камчатки; мониторинг вулканов; веб-сервисы; REST-сервис; интеграция данных; базы данных

DOI: 10.14357/08696527180207

1 Введение

В настоящее время исследование окружающей среды является одним из тех направлений научно-технической деятельности, которые формируют объективные потребности в создании новых методов работы с научными данными

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 16-37-00026 мол.а и Комплексной программы фундаментальных научных исследований ДВО РАН «Дальний Восток» (проект 18-5-091). Для обеспечения функционирования научных информационных сервисов были использованы ресурсы ЦКП «Центр данных ДВО РАН».

¹Вычислительный центр Дальневосточного отделения Российской академии наук, serejk@febras.net

²Институт вулканологии и сейсмологии Дальневосточного отделения Российской академии наук, roman@kscnet.ru

³Вычислительный центр Дальневосточного отделения Российской академии наук, sergey.malkovsky@gmail.com

⁴Вычислительный центр Дальневосточного отделения Российской академии наук, alsor@febras.net

и разработки на их основе современных информационных технологий и систем. В первую очередь, это связано с активным развитием средств инструментальных наблюдений (наземных сетей наблюдения, систем дистанционного зондирования Земли и т. п.) и непрерывным совершенствованием измерительной аппаратуры. Разнообразие фундаментальных и прикладных научных задач порождает создание разрозненных, отличных по масштабу и функциональным возможностям специализированных ИС. В то же время проведение междисциплинарных исследований требует совместного анализа всех доступных массивов неоднородной информации, сформированных с применением различных программных средств и технологий. Возникает потребность в обмене данными и организации доступа к ресурсам внешних гетерогенных источников тематической информации.

Перечисленные выше утверждения справедливы для Дальнего Востока России, где расположено 70 действующих вулканов, требующих ежедневного мониторинга со стороны ученых: 30 на Камчатке и 40 на Курилах [1]. Для их исследования и систематизации накопленных данных созданы ИС, решающие широкий круг научных задач. Однако разрозненность справочной и инструментальной информации, ограниченный доступ к результатам работ существенно ограничивают возможность проведения комплексных исследований, а также увеличивают время на анализ возникающих природных событий и, как следствие, увеличивают время реакции на них, что чревато катастрофическими последствиями для населения и народного хозяйства.

В статье представлено описание разработанного сервис-ориентированного программного интерфейса, реализующего взаимодействие между основными существующими ИС для взаимного использования накопленных наборов научных данных и средств их обработки при проведении исследований и оперативного мониторинга состояния вулканов Камчатки и Северных Курил.

2 Постановка задачи

Для проведения ретроспективных исследований и оперативного мониторинга вулканической активности на Дальнем Востоке России в разное время были созданы различные специализированные ИС. Если в начале 2000-х гг. они представляли собой интернет-сайты со справочными материалами и результатами различных экспедиций и исследований, то с развитием научной телекоммуникационной [2] и инструментальной (наземной, спутниковой) инфраструктуры наблюдений стали появляться интерактивные сервисы для сбора, обработки и анализа различной измерительной информации. Среди них можно выделить несколько ИС, обладающих уникальным набором данных и средств их обработки (табл. 1).

Информационные системы VOKKIA и KVERT являются источниками базовой метаинформации по исследуемым объектам и возникающим событиям, а ИС «Сигнал» и VolSatView агрегируют на своей платформе архивы различных инструментальных данных, а также средства для их обработки.

Таблица 1 Информационные системы для исследования и оперативного мониторинга вулканов Камчатки и Северных Курил

Название ИС	Основное назначение
1. VOKKIA (Volcanoes of Kurile-Kamchatka Island Arc — Вулканы Курило-Камчатской островной дуги) [3]	Интеграция гетерогенных научных (описательных, количественных, пространственных) данных по вулканам Курило-Камчатской островной дуги и их историческим извержениям
2. KVERT (Kamchatkan Volcanic Eruption Response Team — Камчатская группа реагирования на вулканические извержения) [4]	Автоматизация процесса подготовки сообщений KVERT о текущей активности вулканов, в том числе оперативных сообщений VONA (Volcano Observatory Notice for Aviation) о пепловых шлейфах и изменении АЦК, обеспечение хранения данных и возможности их статистического анализа
3. «Сигнал» [5, 6]	Автоматизация операций, связанных с работой сетей инструментальных наблюдений ДВО РАН, в том числе системы видеонаблюдения за вулканами Камчатки и системы компьютерного моделирования распространения пепловых облаков
4. VolSatView (Дистанционный мониторинг активности вулканов Камчатки и Курил) [7]	Оперативный мониторинг вулканической активности на основе данных дистанционного зондирования Земли

Перечисленные ИС по своим функциональным возможностям и назначению дополняют друга, одновременно с этим возникает задача обмена результатами исследований и доступа к первичной справочной информации. Требуется организовать взаимодействие между системами, на базе которых уже развиты необходимые научные компетенции, сформированы архивы данных и выстроена соответствующая вспомогательная программно-аппаратная инфраструктура. Современным и эффективным подходом к решению указанной задачи, используемым сегодня в ведущих мировых научных центрах данных (IRIS Data Management Center¹, NASA Coordinated Data Analysis System², UCAR Research Data Archive³), является создание веб-сервисов [8–10].

Использование универсальных стандартов и протокола HTTP(s) позволяет с минимальными временными затратами без внесения существенных изменений в программный код систем сформировать новые виды информационных продуктов, повысить оперативность и достоверность проводимых исследований.

¹<http://service.iris.edu>.

²<https://cdaweb.sci.gsfc.nasa.gov/WebServices/REST>.

³https://rda.ucar.edu/#!apps_api_desc.

На основе этих принципов и с учетом особенностей рассматриваемых прикладных ИС была предложена архитектура работы сервиса и разработан набор вспомогательных программных средств.

3 Архитектура и принципы работы сервиса

Программной основой для реализации веб-сервиса выступает ИС «Сигнал». Из баз данных (БД) ИС VOKKIA и KVERT в нее поступает справочная информация об активных вулканах и оперативные данные об их состоянии. К оперативной информации относятся Авиационные цветковые коды (АЦК) — коды опасности вулканов для авиации, а также данные о пепловых выбросах, содержащиеся в оперативных VONA-сообщениях [1]. Передача указанных данных организована посредством statement-based репликации соответствующих таблиц БД, где система управления БД (СУБД) ИС VOKKIA и KVERT (MariaDB) является master-сервером, а СУБД ИС «Сигнал» (MySQL) — slave-сервером (рис. 1).

Такой подход обладает следующими преимуществами:

- данные доступны сразу в момент их публикации, не требуется периодически проверять наличие новой информации;
- схема информационного взаимодействия серверов устойчива к перерывам в работе каналов связи благодаря заложенным в основу MySQL-репликации алгоритмам;

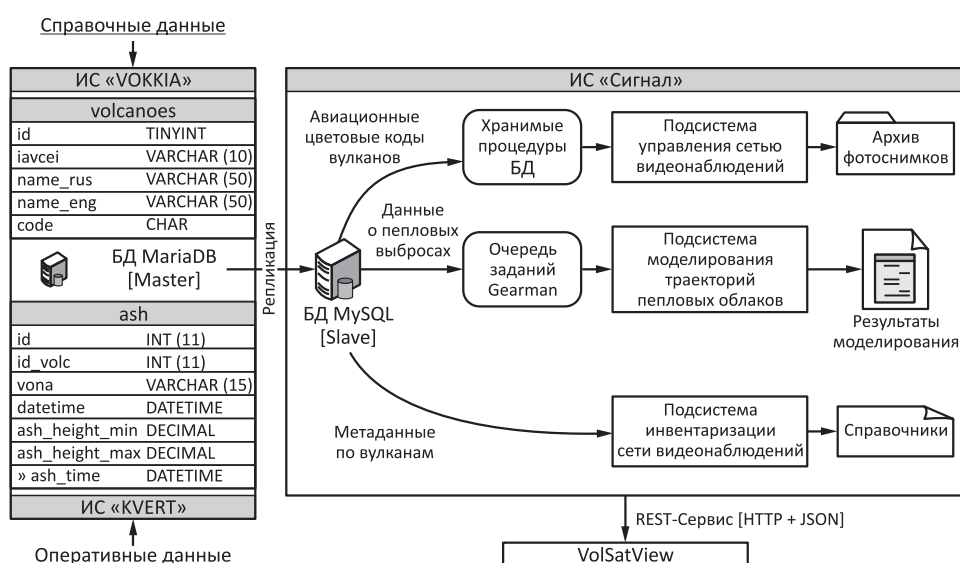


Рис. 1 Общая схема работы сервиса

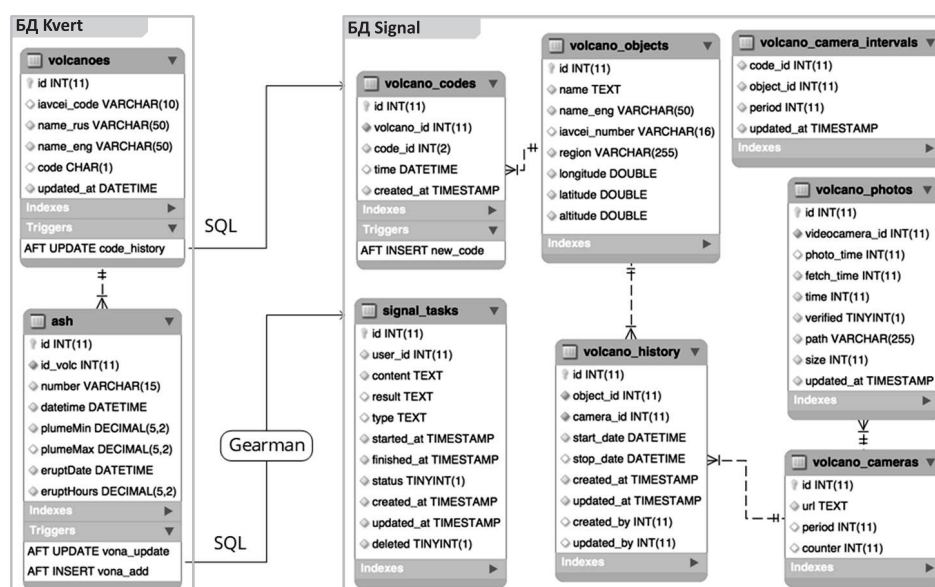


Рис. 2 Схема данных для slave-сервера ИС «Сигнал»

– программная реализация не требует больших временных затрат и перерыва в работе ИС.

На slave-сервере ИС «Сигнал» исходные данные синхронизируются с промежуточной БД Kvert, содержащей таблицы volcanoes и ash. С помощью триггеров данные из нее передаются в основную БД сервиса Signal, на основе которой осуществляется обработка поступающей информации: изменение интервала фотосъемки вулкана в зависимости от его АЦК и постановка задания на расчет траектории распространения пеплового облака при извержении вулкана (рис. 2).

При обновлении АЦК в таблицу Signal.volcano_codes добавляется соответствующая запись. Идентификатор вулкана и его АЦК передаются триггером в хранимую процедуру, выполняющую следующую последовательность действий (рис. 3):

- (1) производится поиск всех видеокамер, осуществляющих наблюдение за данным вулканом;
- (2) для каждой видеокамеры по таблице volcano_camera_intervals определяется интервал съемки, соответствующий данному АЦК;
- (3) найденное значение интервала устанавливается в качестве текущего для данной камеры.

Связи между видеокамерами и вулканами, за которыми ведется наблюдение, определяются по таблице volcano_history. Интервалы фотосъемки изображений

```

CREATE PROCEDURE `update_camera_interval_by_code` (IN `volcano_id` int, IN `code` int)
COMMENT 'Updates camera periods for given volcano and its current code'
BEGIN
    DECLARE done INT DEFAULT FALSE;
    DECLARE cam_id INTEGER;
    DECLARE new_period INTEGER;
    DECLARE volcano_history CURSOR FOR SELECT camera_id
                                         FROM volcano_history
                                         WHERE object_id = volcano_id
                                         AND stop_date IS NULL;

    DECLARE CONTINUE HANDLER FOR NOT FOUND SET done = TRUE;

    # Iterate all volcano current cameras
    OPEN volcano_history;
    read_loop: LOOP
        SET done = FALSE;
        FETCH volcano_history INTO cam_id;
        IF done THEN
            LEAVE read_loop;
        END IF;

    # Get period for camera for current code
        SET new_period = (SELECT period
                        FROM volcano_camera_intervals
                        WHERE code_id IN (code,0)
                        AND object_id IN (cam_id,0)
                        ORDER BY code_id ASC, object_id DESC
                        LIMIT 1);

    # Set new interval to camera
        UPDATE volcano_cameras SET period = new_period WHERE id = cam_id;
    END LOOP read_loop;
    CLOSE volcano_history;
END

```

Рис. 3 Процедура БД Signal, управляющая расписанием сбора фотоснимков вулканов

с каждой камеры могут настраиваться как независимо для каждой камеры (в этом случае в таблице `volcano_camera_intervals` поле `code_id` принимает значение 0), так и глобально для каждого АЦК (в этом случае в таблице `volcano_camera_intervals` поле `object_id` принимает значение 0). Значение интервала, установленное для камеры, имеет высший приоритет по отношению к глобальному значению, установленному для АЦК.

Данные из сообщений VONA, содержащие основные характеристики каждого извержения (дата и время, длительность, высота пеплового облака и т. п.), передаются в таблицу `Kvert.ash`, где на их основе для каждого события формируются задания на моделирование траектории движения пеплового облака. Задания представляют собой JSON-объекты (JavaScript Object Notation), которые с помощью UDF-расширения для СУБД MySQL¹ передаются на сервер очередей Gearman², где далее обрабатываются подсистемой моделирования ИС «Сигнал» [10]. Полученные результаты публикуются в сводных каталогах совместно со справочной, оперативной и инструментальной информацией, доступной через пользовательский интерфейс ИС «Сигнал».

¹<https://launchpad.net/gearman-mysql-udf>.

²<http://gearman.org>.

4 Интерфейс для доступа к данным

Важной задачей веб-сервиса является организация удаленного доступа к консолидированному набору данных по вулканам и результатам работы специализированных подсистем ИС «Сигнал» для внешних пользователей, в роли которых выступают сторонние ИС. Интерфейс взаимодействия с ресурсами веб-сервиса реализован в соответствии с концепцией REST [8] на основе фреймворка Yii2 [9]. Работа с ним осуществляется путем обращения по протоколу HTTP(S) к адресу <http://api.signal.febras.net/<url>>, где `<url>` — относительный адрес, обозначающий вид запрашиваемого набора данных. На данный момент в таком формате доступна информация, представленная в табл. 2.

При поиске фотоснимков также указываются параметры GET-запроса (табл. 3).

Поиск фотоснимков в архиве ведется по заданным вулканам и видеокамерам для временного периода `[time – 1,5 ч; time + 1,5 ч]`.

При успешном выполнении запроса результат возвращается в формате JSON. Он является текстовым, имеет простую (по сравнению, например, с XML) разметку, поддерживается большим числом языков программирования и программных библиотек. На рис. 4 представлены примеры взаимодействия с сервисом.

Таблица 2 Виды наборов данных, предоставляемых веб-сервисом

URL	Набор данных
<code>/volcanoes</code>	Общий список вулканов
<code>/volcanoes/#id</code>	Информация по вулкану с идентификатором <code>#id</code>
<code>/cameras</code>	Общий список видеокамер
<code>/cameras/#id</code>	Информация по видеокамере с идентификатором <code>#id</code>
<code>/photos</code>	Поиск фотоснимков вулканов
<code>/tasks</code>	Каталог результатов моделирования
<code>/tasks/#id</code>	Информация о задаче с идентификатором <code>#id</code>

Таблица 3 Параметры запроса для поиска в архиве фотоснимков

Параметр	Назначение
<code>volcano_id</code>	Список идентификаторов вулканов, разделенных запятыми
<code>camera_id</code>	Список идентификаторов видеокамер, разделенных запятыми
<code>time</code>	Дата и время, для которых ведется поиск, задается в формате <code>YYYYMMDDHHIISS</code> , где <code>YYYY</code> — 4 цифры года, <code>MM</code> — номер месяца с ведущим нулем, <code>DD</code> — день месяца с ведущим нулем, <code>HH</code> — часы с ведущим нулем, <code>II</code> — минуты с ведущим нулем, <code>SS</code> — секунды с ведущим нулем

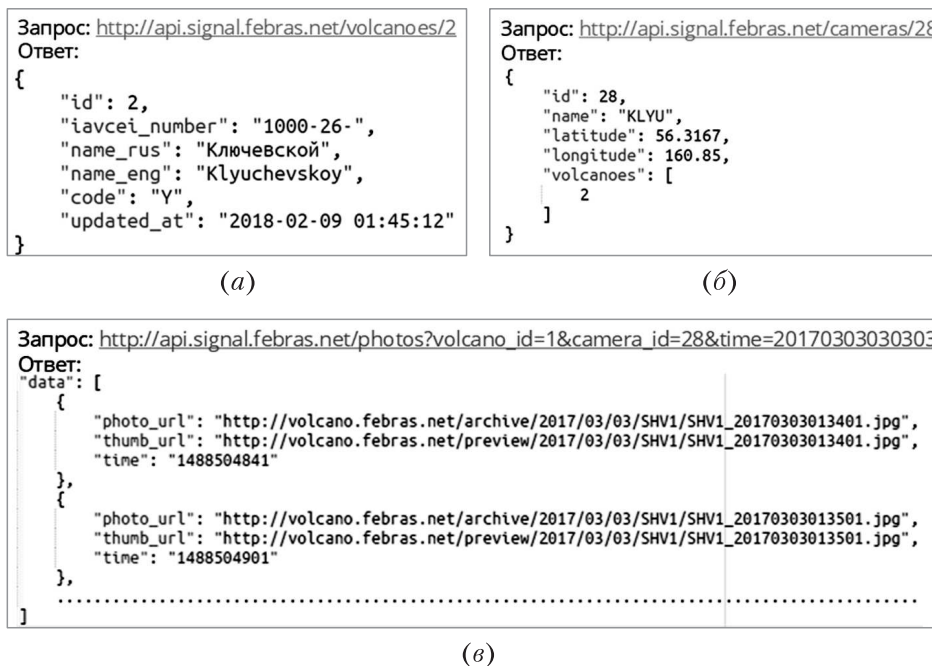


Рис. 4 Пример взаимодействия с веб-сервисом для получения информации: (а) по объектам наблюдения; (б) по сети наблюдений; (в) из архива изображений

С применением разработанных интерфейсов реализовано взаимодействие между ИС VolSatView и «Сигнал». Все доступные структурированные наборы научных данных и результаты работы специализированных подсистем ИС «Сигнал» (см. табл. 2) передаются в ИС VolSatView, где представляются уже в составе собственных пользовательских интерфейсов и программных решений. Это позволяет, в частности, проводить совместный анализ данных результатов компьютерного моделирования траекторий распространения пепловых облаков и фактических данных наблюдений, полученных средствами дистанционного зондирования Земли [7, 10].

5 Заключение

Разработанный RESTful веб-сервис позволил сформировать универсальный инструмент для централизованного доступа к разнородным научным данным в области исследования и оперативного мониторинга состояния вулканов Камчатки и Северных Курил. В рамках исследования были реализованы программные средства для обмена данными и работы с ресурсами ведущих специализированных ИС. Это позволило расширить качественные и количественные возможности

прикладных систем, создать новые средства для совместного анализа результатов обработки различных видов оперативных наблюдений и справочной информации.

Дальнейшее развитие веб-сервиса связано с подключением новых источников данных, содержащих информацию о результатах исследований вулканов Камчатки и Северных Курил, а также с внедрением новых средств обработки и представления инструментальных данных.

Литература

1. Гордеев Е. И., Гирина О. А. Вулканы и их опасность для авиации // Вестник РАН, 2014. Т. 84. № 2. С. 134. doi: 10.7868/S0869587314020121.
2. Сорокин А. А., Макогонов С. В., Королев С. П. Информационная инфраструктура для коллективной работы ученых Дальнего Востока России // Научно-техническая информация. Сер. 1: Организация и методика информационной работы, 2017. № 12. С. 14–16.
3. Романова И. М., Гирина О. А., Максимов А. П., Мелекесцев И. В. Создание комплексной информационной веб-системы «Вулканы Курило-Камчатской островной дуги» (VOKKIA) // Информатика и системы управления, 2012. № 3(33). С. 179–187.
4. Гирина О. А., Гордеев Е. И. Проект KVERT — снижение вулканической опасности для авиации при эксплозивных извержениях вулканов Камчатки и Северных Курил // Вестник ДВО РАН, 2007. № 2. С. 100–109.
5. Королёв С. П., Сорокин А. А., Верхотуров А. Л., Коновалов А. В., Шестаков Н. В. Автоматизированная информационная система для работы с инструментальными данными региональной сети сейсмологических наблюдений ДВО РАН // Сейсмические приборы, 2014. Т. 50. № 3. С. 30–41.
6. Sorokin A. A., Korolev S. P., Romanova I. M., Girina O. A., Urmanov I. P. The Kamchatka volcano video monitoring system // 6th Workshop (International) on Computer Science and Engineering. — Tokyo, Japan, 2016. P. 734–737.
7. Гордеев Е. И., Гирина О. А., Луян Е. А., Сорокин А. А., Крамарева Л. С., Ефремов В. Ю., Кашицкий А. В., Уваров И. А., Буцев М. А., Романова И. М., Мельников Д. В., Маневич А. Г., Королев С. П., Верхотуров А. Л. Информационная система VOLSATVIEW для решения задач мониторинга вулканической активности Камчатки и Курил // Вулканология и сейсмология, 2016. № 6. С. 62–77. doi: 10.7868/S0203030616060043.
8. Richardson L., Amundsen M., Ruby S. RESTful web APIs. — O'Reilly Media, 2013. 408 p.
9. Safronov M., Winesett J. Web application development with Yii2 and PHP. — Packt Publishing, 2014. 406 p.
10. Сорокин А. А., Королев С. П., Гирина О. А., Балашов И. В., Ефремов В. Ю., Романова И. М., Мальковский С. И. Интегрированная программная платформа для комплексного анализа распространения пепловых шлейфов при эксплозивных извержениях вулканов Камчатки // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2016. Т. 13. № 4. С. 9–19. doi: 10.21046/2070-7401-2016-13-12-9-19.

Поступила в редакцию 10.03.18

SERVICE-ORIENTED INTERFACE TO ACCESS SCIENTIFIC DATA FOR STUDY AND STATE OPERATIONAL MONITORING OF VOLCANOES OF KAMCHATKA AND NORTHERN KURILES

S. P. Korolev¹, I. M. Romanova², S. I. Malkovsky¹, and A. A. Sorokin¹

¹Computing Center, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, 65 Kim U Chen Str., Khabarovsk 680000, Russian Federation

²Institute of Volcanology and Seismology, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, 9 Piip Blvd, Petropavlovsk-Kamchatsky 683006, Russian Federation

Abstract: On the territory of the Russian Far East, there are dozens of active volcanoes, requiring continuous attention of scientists for analysis and control of their condition. To provide solutions of various scientific problems, different information systems were implemented. However, disunity of information systems and limited data exchange between them limit the possibility of carrying out complex studies. This may result in disastrous consequences for the population and different fields of people's activities. The article describes the developed service-oriented software interface that implements interaction between the main existing information systems. The mutual use of accumulated sets of scientific data and processing instruments improves research and operational monitoring of the state of volcanoes in Kamchatka and Northern Kuriles.

Keywords: volcanoes of Kamchatka; volcano monitoring; Web services; REST-service; data integration; databases

DOI: 10.14357/08696527180207

Acknowledgments

The work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (grant No. 16-37-00026 mol_a) and the Comprehensive Program of Basic Scientific Research of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences "Far East" (project 18-5-091). To ensure the functioning of scientific information services, the resources of the Datacenter of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences have been used.

References

1. Gordeev, E. I., and O. A. Girina. 2014. Volcanoes and their hazard to aviation. *Her. Rus. Acad. Sci.* 84(1):1–8. doi: 10.1134/S1019331614010079.
2. Sorokin, A. A., S. I. Makogonov, and S. P. Korolev. 2017. The information infrastructure for collective scientific work in the Far East of Russia. *Scientific Technical Information Processing* 44(4):302–304. doi: 10.3103/S0147688217040153.
3. Romanova, I. M., O. A. Girina, A. P. Maksimov, and I. V. Melekestsev. 2012. Sozdanie kompleksnoy informatsionnoy veb-sistemy "Vulkany Kurilo-Kamchatskoy ostrovnoy dugi" (VOKKIA) [Creation of complex information Web system "Volcanoes of the Kurile-Kamchatka island arc" (VOKKIA)]. *Informatika i sistemy upravleniya* [Information Science and Control Systems] 3(33):179–187.

4. Girina, O. A., and E. I. Gordeev. 2007. Proekt KVERT — snizhenie vulkanicheskoy opasnosti dlya aviatsii pri eksplozivnykh izverzheniyakh vulkanov Kamchatki i Severnykh Kuril [KVERT project: Reduction of volcanic hazards for aviation from explosive eruptions of Kamchatka and Northern Kuriles volcanoes]. *Vestnik of the Far East Branch of the Russian Academy of Sciences* 2:100–109.
5. Korolev, S. P., A. A. Sorokin, A. L. Verkhoturov, A. V. Konovalov, and N. V. Sheshtakov. 2015. Automated information system for instrument data processing of the regional seismic observation network of FEB RAS. *Seism. Instr.* 51(3):209–218. doi: 10.3103/S0747923915030068.
6. Sorokin, A. A., S. P. Korolev, I. M. Romanova, O. A. Girina, and I. P. Urmanov. 2016. The Kamchatka volcano video monitoring system. *6th Workshop (International) on Computer Science and Engineering*. Tokyo, Japan. 734–737.
7. Gordeev, E. I., O. A. Girina, E. A. Lupyan, A. A. Sorokin, L. S. Kramareva, V. Yu. Efremov, A. V. Kashnitskii, I. A. Uvarov, M. Burtsev, I. M. Romanova, D. V. Mel'nikov, A. G. Manevich, S. P. Korolev, and A. L. Verkhoturov. 2016. The VolSatView information system for monitoring the volcanic activity in Kamchatka and on the Kuril Islands. *J. Volcanol. Seismol.* 10(6):382–394. doi: 10.1134/S074204631606004X.
8. Richardson, L., M. Amundsen, and S. Ruby. 2013. *RESTful web APIs*. O'Reilly Media. 408 p.
9. Safronov, M., and J. Winesett. 2014. *Web application development with Yii2 and PHP*. Packt Publishing. 406 p.
10. Sorokin, A. A., S. P. Korolev, O. A. Girina, I. V. Balashov, V. Yu. Efremov, I. M. Romanova, and S. I. Malkovsky. 2016. Integrirovannaya programmnaya platforma dlya kompleksnogo analiza rasprostraneniya peplovykh shleyfov pri eksplozivnykh izverzheniyakh vulkanov Kamchatki [The integrated software platform for a comprehensive analysis of ash plume propagation from explosive eruptions of Kamchatka volcanoes]. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space] 13(4):9–19. doi: 10.21046/2070-7401-2016-13-12-9-19.

Received March 10, 2018

Contributors

Korolev Sergey P. (b. 1985) — scientist, Computing Center, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, 65 Kim U Chen Str., Khabarovsk 680000, Russian Federation; serejk@febras.net

Romanova Iraida M. (b. 1961) — leading programmer, Institute of Volcanology and Seismology, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, 9 Piip Blvd, Petropavlovsk-Kamchatsky 683006, Russian Federation; roman@kscnet.ru

Malkovsky Sergei I. (b. 1983) — scientist, Computing Center, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, 65 Kim U Chen Str., Khabarovsk 680000, Russian Federation; sergey.malkovsky@gmail.com

Sorokin Aleksei A. (b. 1980) — leading scientist, Computing Center, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, 65 Kim U Chen Str., Khabarovsk 680000, Russian Federation; alsor@febras.net

ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДА ГЕНЕРАЦИИ СЕТЕЙ ПЕТРИ БОЛЬШОГО РАЗМЕРА*

Д. И. Харитонов¹, Г. В. Тарасов², Д. В. Леонтьев³

Аннотация: Описана программная реализация метода генерации сетей Петри (СП) для числа мест и переходов свыше одного миллиона. Особое внимание уделяется внутренним структурам данных и алгоритмической сложности поставленной задачи. Представленные результаты позволили получить программное средство с вычислительной сложностью $O(n)$, где n — число элементов модели. Описанные теоретические исследования подтверждаются практическими результатами измерения производительности.

Ключевые слова: сети Петри; модель программы; структуры данных; анализ алгоритмов; объектно-ориентированное программирование

DOI: 10.14357/08696527180208

1 Введение

Известно, что одной из главных проблем верификации методом проверки модели является взрыв числа состояний. Эта проблема не может быть решена в принципе ввиду неограниченной сложности исследуемых систем. Однако разработан ряд методов, которые позволяют рассматривать модели с очень большим числом состояний. В частности, ведутся исследования в области модульного представления СП, их анализа по частям с использованием распределенных и параллельных технологий обработки [1–5]. Построение моделей большого размера, описывающих поведение реальных систем, невозможно выполнить вручную. Разработано множество различных инструментальных средств для построения и анализа моделей аппаратных систем, распределенных и параллельных программных систем [6], в том числе с использованием различных расширений теории СП [7–9]. Начиная с 2011 г. в рамках ведущей международной ежегодной конференции по СП (International Conference on Application and Theory of Petri Nets and Concurrency) проводится конкурс программных

* Работа выполнена при поддержке Программы Президиума РАН (проект 0262-2014-0157) и Программы «Дальний Восток» (проект 15-I-4-025).

¹ Институт автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения Российской академии наук, demiurg@dvo.ru

² Институт автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения Российской академии наук, george@dvo.ru

³ Институт автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения Российской академии наук, devozh@dvo.ru

систем верификации моделей (Model Checking Contest @ Petri Nets). В 2016 г. для тестирования участникам конкурса были предложены модели, максимальное число элементов которых приблизилось к 400 000 (включая дуги).

Направление исследований, связанное с автоматической генерацией моделей больших размеров, интересно с практической точки зрения. Во-первых, их можно использовать в отладочных целях для тестирования производительности и эффективности существующих методов анализа и разработки новых методов. Именно эта цель преследуется организаторами упомянутого выше конкурса. Во-вторых, модели с большим числом элементов полезны в алгоритмических целях. Способы хранения СП в оперативной памяти вычислительной машины, алгоритмы обхода и поиска по дереву элементов модели, алгоритмы добавления, удаления и связывания элементов модели и т. п. превращаются в нетривиальные задачи, когда требуемый объем памяти для хранения элементов модели приближается к предельным возможностям современных вычислительных систем (десятки и сотни гигабайт в рамках одной рабочей станции или узла вычислительного кластера).

В данной работе описана программная реализация метода генерации СП большого размера (миллионы элементов и больше) с помощью шаблонов. Основное внимание уделяется описанию алгоритмов и структур данных, использованных при реализации программного средства. Данная работа является продолжением исследований алгоритма генерации больших моделей в терминах СП, предложенного авторами ранее [10].

Материал статьи представлен следующим образом. Вначале дается краткое описание основных определений понятия шаблона, операции слияния и алгоритма генерации большой СП. Далее подробно описываются структуры данных для хранения СП и шаблона в памяти вычислительной машины. В заключение проводится анализ сложности алгоритма и результаты тестирования его производительности для сетей различного размера.

2 Генерация моделей на основе шаблонов

В основе разработанного алгоритма генерации модели лежит понятие шаблона. Математически шаблон представляет собой СП, дополненную специальной пометкой, позволяющей связывать шаблоны между собой.

Определение 1. СП-шаблоном (или просто шаблоном) называется четверка элементов $X = (\Sigma, I, O, M_0)$, где

- (1) $\Sigma = \langle S, T, \bullet(), ()^\bullet \rangle$ — СП, называемая структурой шаблона, где S — множество мест; T — множество переходов; $\bullet() \subseteq M(S)$ — входная функция переходов (мультимножества инцидентных мест); $()^\bullet \subseteq M(S)$ — выходная функция переходов;
- (2) $I = \{\iota_1, \iota_2, \dots, \iota_n\}$ — множество простых точек доступа (ТД), называемое входным интерфейсом;

(3) $O = \{\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_m\}$ — множество простых ТД, называемое выходным интерфейсом;

(4) $M_0 \in \mathcal{M}(S)$ — начальная маркировка шаблона.

Символом $\mathcal{M}(A)$ будем обозначать множество всех конечных мультимножеств на множестве A . Пустое мультимножество будем обозначать символом $\mathbf{0}$. Простой ТД будем называть пару элементов $\iota = \langle \text{id}_i, \varrho_i \rangle$, где id_i — уникальный идентификатор ТД; $\varrho_i \in [S]$ — линейно упорядоченное подмножество мест, используемое ТД.

Два СП-шаблона могут быть слиты друг с другом при помощи операции слияния по простым ТД.

Определение 2. Пусть заданы два СП-шаблона $X_1 = (\Sigma_1, I_1, O_1, M_{01})$ и $X_2 = (\Sigma_2, I_2, O_2, M_{02})$ и две их простые ТД $\iota \in I_1$ и $\phi \in O_2$, где $\iota = \langle \text{id}_1, \varrho_1 \rangle$, $\phi = \langle \text{id}_2, \varrho_2 \rangle$, и мощности подмножеств мест этих ТД равны $|\varrho_1| = |\varrho_2|$. Тогда операция слияния СП-шаблонов X_1 и X_2 формирует новый шаблон $X = (\Sigma, I, O, M_0)$ такой, что

$$X = (X_1 \oplus X_2)|_\phi^\iota.$$

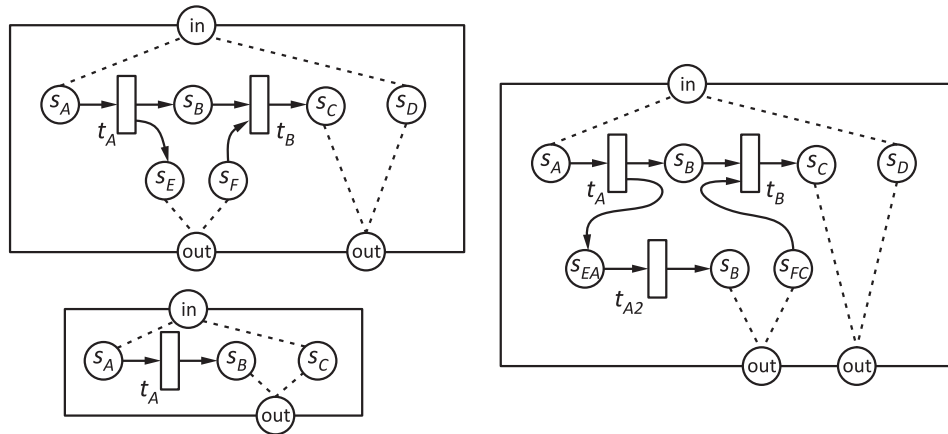


Рис. 1 Пример операции слияния шаблонов

Операцию слияния можно представить как формальное объединение двух шаблонов с последующим слиянием заданного ТД подмножества мест шаблонов. Формальное объединение структур шаблонов обозначено символом $\oplus$. Слияние по ТД обозначено вертикальной чертой с указанием ТД, участвующих в операции. На рис. 1 показан пример операции слияния.

Шаблоны могут быть объединены в коллекции.

Определение 3. Множество $\Pi = \{X_i = (\Sigma_i, I_i, O_i, M_{0i})\}$ называется коллекцией СП-шаблонов, если

- (1) в ней определен стартовый шаблон X_0 такой, что $M_{00} \neq \mathbf{0}$, $|I_0| = 0$, $|O_0| > 0$;
- (2) в ней определено несколько строительных шаблонов $|\{X_k \mid X_k \in \Pi, M_{0k} = \mathbf{0}, |I_k| = 1, |O_k| \geq 0\}| > 0$ (строительный шаблон называется завершающим, если его выходной интерфейс пуст: $|O_k| = 0$);
- (3) все простые ТД во входных интерфейсах имеют пару в выходных интерфейсах, и наоборот:

$$\forall X_i \in \Pi, \quad \phi \in O_i \rightarrow \exists X_j \in \Pi, \quad \iota \in I_j : |\phi| = |\iota|;$$

$$\forall X_i \in \Pi, \quad \iota \in I_i \rightarrow \exists X_j \in \Pi, \quad \phi \in O_j : |\iota| = |\phi|.$$

Неформально под коллекцией можно понимать такую систему, в которой результат слияния стартового шаблона с любым другим строительным шаблоном дает новый стартовый шаблон. Развитие этого процесса можно представить следующим образом. Коллекция $\Pi_{n+1} = \{X_0^{n+1}, X_1, \dots, X_k\}$ порождается коллекцией $\Pi_n = \{X_0^n, X_1, \dots, X_k\}$, если $\exists \iota, \phi$ такие, что

$$X_0^{n+1} = (X_0^n \oplus X_j)^\iota_\phi,$$

где $\iota \in I_j$ — входная ТД шаблона X_j , $\phi \in O_0$ — выходная ТД стартового шаблона. Результатом эволюции коллекции будем называть такой шаблон $X = \langle \Sigma, I, O, M_0 \rangle$, у которого $|I| = 0, |O| = 0$.

Опишем алгоритм, реализующий схему генерации СП с использованием заданного набора строительных шаблонов. Алгоритм состоит из пяти шагов, изображенных на рис. 2. На первом шаге из конфигурационного файла выполняется считывание коллекции шаблонов и параметров результирующей сети. Далее выполняется построение объекта пустой СП и списка выходных ТД для запуска итерационного алгоритма генерации сети. Список выходных ТД вначале содержит одну пустую стартовую

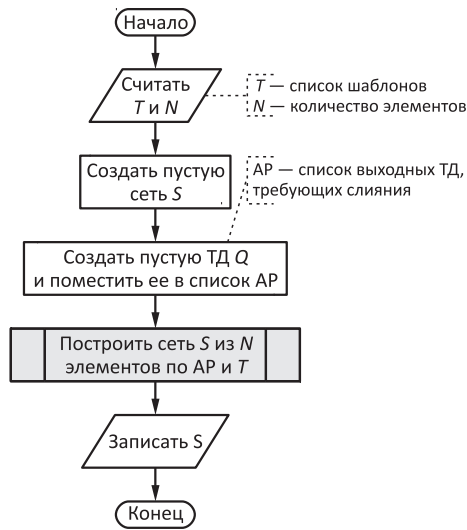


Рис. 2 Общий алгоритм построения сети

ТД. После этого следует непосредственный запуск итерационной процедуры генерации. И на последнем шаге алгоритма результаты работы записываются в выходной файл.

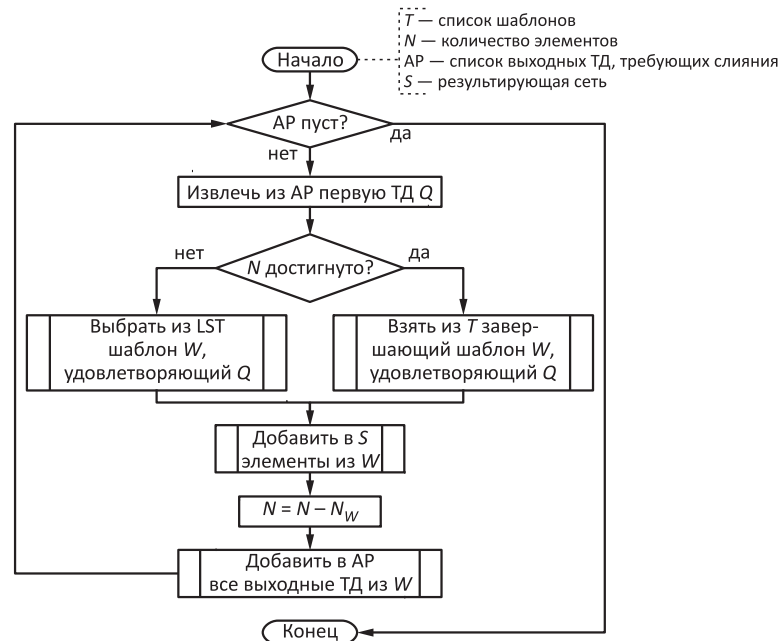


Рис. 3 Алгоритм итерационного заполнения сети

Основная работа по генерации большой СП выполняется итерационным алгоритмом, принимающим на вход список шаблонов, объект сети для генерации, число элементов для добавления в эту сеть, список шаблонов, а также список выходных ТД, по которым должна быть проведена операция слияния с каким-либо строительным шаблоном. Блок-схема алгоритма показана на рис. 3 и реализует эволюцию коллекции относительно результирующей сети S , которая служит стартовым шаблоном на каждом шаге итерации. Список AR содержит выходные ТД стартового шаблона. Когда на очередном шаге итерации оказывается, что все выходные ТД слиты с какими-либо строительными шаблонами, алгоритм заканчивает выполнение. Процедура выбора добавляемого шаблона может быть параметризована для получения результирующей сети с заданными характеристиками. Наибольшее значение с точки зрения времени выполнения имеет процедура добавления шаблона к результирующей сети, именно она определяет вычислительную сложность алгоритма относительно числа элементов.

Опишем, как можно эффективно реализовать предложенный алгоритм, а также опишем сопутствующие форматы и структуры данных, чтобы в результате получить программу генерации большой СП за $O(n)$. Информация будет представлена в следующем порядке. Сначала будет описано внутреннее представление СП в памяти ЭВМ, далее будет описан формат входных данных для алгоритма

генерации и затем будет описан формат представления шаблона в памяти ЭВМ. На каждом шаге описания будет уделяться особое внимание деталям, которые в совокупности дают эффективную и быструю реализацию программы генерации большой СП.

3 Представление сетей Петри в памяти вычислительной машины

Существуют два основных способа представления СП в памяти вычислительной машины. В первом варианте сеть может быть представлена матрицей инцидентности, а во втором — одним или несколькими списками своих элементов (мест, переходов и дуг). Оба подхода имеют свои преимущества и недостатки.

Основным преимуществом матричного представления является быстрый доступ к элементам сети и связям между ними. Вместе с тем использование матричного представления существенно увеличивает объем занимаемой памяти. Например, для СП, состоящей из 10^5 элементов, матрица инцидентности может занимать порядка 10 ГБ, что является условной границей возможностей современных персональных компьютеров. Для сокращения занимаемого пространства в памяти можно использовать разреженные матрицы, битовые маски и другие методы. Однако применение специальных методов хранения требует дополнительных средств и времени для выполнения операций добавления, удаления и поиска элементов в сети. Поскольку алгоритм генерации в значительной степени зависит от скорости выполнения операции добавления элемента в сеть, можно сказать, что матричный способ представления больших сетей будет неэффективен.

Представление на основе списков не обеспечивает быстрого доступа к элементам сети. Требуется применять дополнительные средства (например, использовать сортировку списков, составлять поисковые индексы) для реализации быстрого доступа к элементам сети. Однако представление СП в виде набора списков существенно упрощает операцию добавления элементов в сеть, а также позволяет разместить в памяти ЭВМ сети существенно большего размера без дополнительных расходов.

Для хранения СП в памяти ЭВМ был разработан формат, который содержит только значимую информацию об СП, достаточную для описания ее структурных и поведенческих свойств. Остальные данные будем считать незначимыми, полагая, что они могут быть воссозданы по требованию в процессе работы с сетью (например, индексы списков элементов для быстрого поиска). На рис. 4 представлена UML (unified modeling language) диаграмма классов, которая описывает способ представления СП в объектно-ориентированной программе. Показан только тот функционал, который важен для задачи генерации сети. Базовый класс `PN3Item` описывает общие свойства любого элемента СП, включая саму сеть. Каждый элемент содержит имя (атрибут `name`) и список предписаний (атрибут `inscriptions`). Предписания позволяют по мере необходимости наращивать описательные возможности СП. Например, работая только

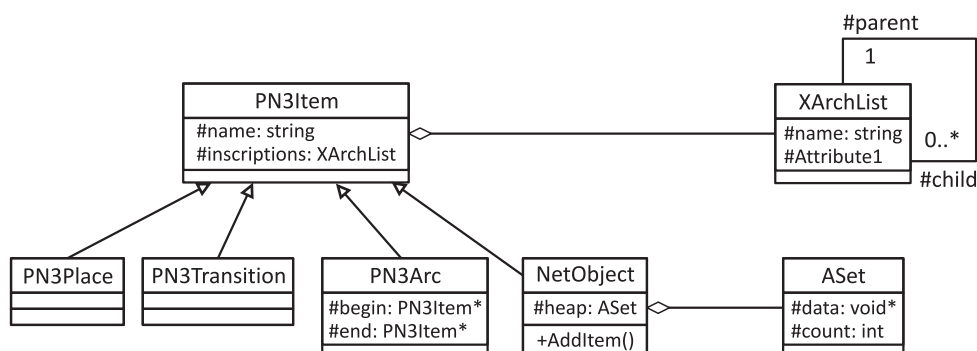


Рис. 4 Диаграмма классов для представления СП в памяти ЭВМ

с простыми СП, в предписаниях можно сохранять информацию о распределении фишек и кратности дуг. Работая с высокоуровневыми СП, в предписаниях можно сохранять информацию о типах данных, значениях, выражениях и других конструкциях языка описаний. Атрибут *inscriptions* представляет собой объект специального класса *XArchList*, реализующий структуру данных — дерево, в котором каждая вершина представляется парой строк: имя и значение. Классы *PN3Place*, *PN3Transition* и *PN3Arc* описывают поведение соответствующего элемента структуры СП. Класс *NetObject* описывает саму СП в виде множества элементов: мест, переходов и дуг. Хранение списка элементов сети выполняется отдельным классом *ASet*, представляющим собой структуру данных «линейный список».

Таким образом, для хранения одной СП должен быть создан экземпляр класса *NetObject*, в который добавляются объекты классов *PN3Place*, *PN3Transition* и *PN3Arc*. При необходимости вносятся предписания о кратности дуг и распределении фишек. Для метода *AddItem*, который добавляет некоторый элемент в сеть, при генерации можно сделать допущение об уникальности имени добавляемого элемента. Тогда *AddItem* можно реализовать на основе классического алгоритма добавления элемента в линейный список, стоимость которого составляет $O(1)$ [11].

4 Описание входных данных генерации большой сети

На вход алгоритму подается специальный конфигурационный файл, в котором дается описание всех шаблонов и параметры генерации сети. Опишем формат входных данных алгоритма генерации СП большого размера. Сначала представим общее описание синтаксиса конфигурационного файла. После этого определим синтаксис для записи шаблона и синтаксис записи параметров генерации. Далее представим простой пример генерации большой СП.

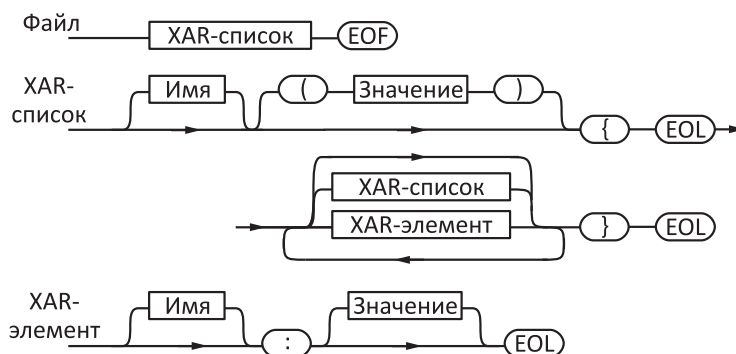


Рис. 5 Синтаксис ХАР-файла

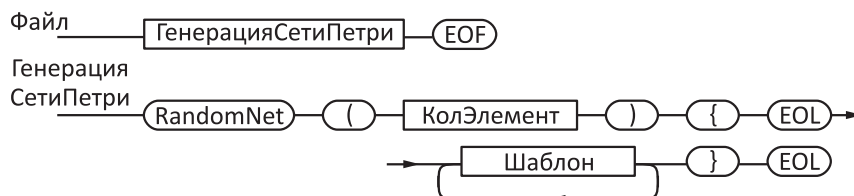


Рис. 6 Синтаксис конфигурационного файла генерации СП

За основу описания входных данных взят формат JSON (JavaScript object notation), реализованный в сильно упрощенной форме. Все описание представляет собой дерево объектов. Каждый объект состоит из двух строковых атрибутов: имя и значение. Каждый объект может иметь произвольное число дочерних объектов. Таким образом, описание конфигурации представляет собой дерево из пар строк. Далее данный формат будем называть ХАР-форматом, а компоненты дерева — ХАР-списком и ХАР-элементом. Синтаксис содержимого файла в формате ХАР показан в форме диаграмм Вирта на рис. 5.

На диаграмме нетерминалы обозначены прямоугольниками, терминалы — овалами. Терминал EOL обозначает символ конца строки, EOF — символ конца файла. Как видно из диаграммы, вся значимая информация в ХАР-формате записывается в нетерминалах Имя и Значение. Распишем синтаксис записи настроек генерации СП, включающих описание шаблонов и параметров. Синтаксис конфигурационного файла показан на рис. 6.

Как видно, описание настроек начинается с описания служебного ХАР-списка с именем RandomNet и значением количества элементов СП (мест и переходов), которые необходимо сгенерировать. Далее с новой строки следует описание шаблонов генерации в виде отдельных ХАР-списков. Детальное описание нетерминала Шаблон показано на рис. 7.

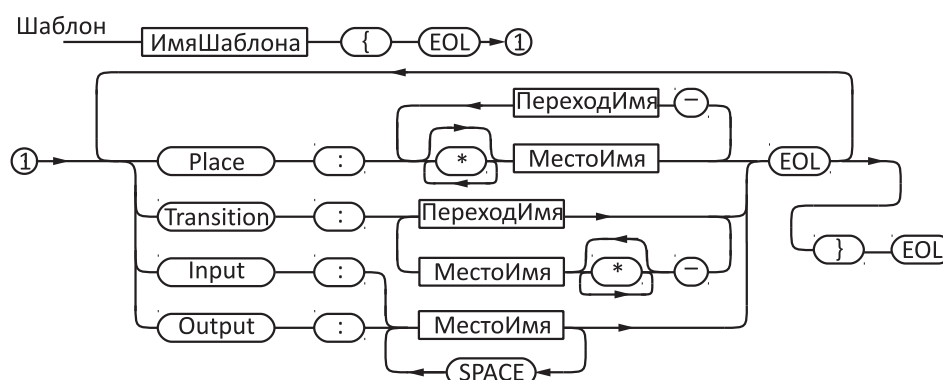


Рис. 7 Синтаксис описания шаблона СП

Текстовое представление шаблона включает описание графа СП, заданное терминалами **Place** и **Transition**, и описание ТД, по которым будет происходить слияние шаблонов. Суть использования каждой группы настроек рассмотрим на конкретном примере генерации большой СП, показанном на рис. 8. Вместо реального символа переноса строки (терминал **EOL**) для сокращения размера описания на рисунке будем использовать угловую стрелку. Для улучшения восприятия будем использовать отступы и пробельные символы. В реальном конфигурационном файле этот синтаксический «сахар» не требуется.

Результатом генерации с использованием конфигурационного файла, показанного на рис. 8, будет СП, состоящая из не менее 100 000 элементов (мест и переходов). Для генерации сети используется коллекция из четырех шаблонов. Шаблон **BEGIN** служит стартовым и имеет только одну исходящую ТД для слияния с другим шаблоном. Шаблон **END** — завершающий, он имеет

```
RandomNet(100000) {
  BEGIN { ↵ Place:*s1 ↵ Place:s2 ↵ Output:s1 s2 ↵ }
  END { ↵ Place:s1-t1-s2 ↵ Input:s1 s2 ↵ }
  LINE {
    Place:s1-t1-s2 ↵ Place:s3
    Input:s1 s3 ↵ Output:s2 s3 ↵
  }
  BRANCH {
    Place:s1-t1-s2 ↵ Place:s1-t2-s3 ↵ Place:s4
    Input:s1 s4 ↵ Output:s2 s4 ↵ Output:s3 s4
  } ↵ }
}
```

Рис. 8 Пример файла генерации большой СП

только одну входящую ТД. Остальные два шаблона LINE и BRANCH являются структурными и позволяют увеличиваться сети либо в длину, либо в ширину.

Для описания структуры шаблона и его ТД разработана *линейная* форма записи элементов. Она позволяет описать граф СП в виде набора последовательностей имен элементов. Все соседние элементы в последовательности попарно связаны между собой дугами, следующими в одном направлении. Кратность дуги принимается равной единице. Имя элемента может неоднократно встречаться в рамках одной последовательности и в разных последовательностях. В первом случае такое появление равносильно появлению петли или цикла в графе. Во втором случае такое появление позволяет строить более сложные графы из набора простых линейных подграфов. Общее число дуг элемента в шаблоне, которыми он связан с другими элементами, равно количеству символов «тире» до и после имени данного элемента. Например, в шаблоне BRANCH место s1 имеет две исходящие дуги в переходы t1 и t2. Терминалы Place и Transition обозначают, какой из элементов СП будет первым в указанной последовательности. Учитывая, что по определению граф СП является двудольным, в последовательности нетрудно определить тип следующего элемента. Кратность дуг в данном варианте записи формируется за счет повторения пары связанных элементов. Для обозначения фишки в месте используется символ «звездочка» перед именем места. Последовательность из «звездочек» определяет число фишек в данном месте.

Описание ТД также задается набором последовательностей имен мест. Тип ТД определяется соответствующим терминалом, после чего следует перечисление через пробел имен мест СП, участвующих в операции слияния мест. Порядок перечисления мест имеет значение. Слияние двух шаблонов происходит по Input и Output ТД в том порядке, в котором они перечислены в описании этих ТД.

5 Представление шаблона в памяти вычислительной машины

Рассмотрим представление коллекции шаблонов в памяти ЭВМ. На рис. 9 показана UML-диаграмма классов, описывающая поведение шаблона и его входных и выходных ТД. Класс NBR_Prototype — это шаблон, класс NBR_Param — это входная или выходная ТД шаблона.

Шаблон в памяти ЭВМ хранится в виде набора списков и массивов, инициализация которых происходит в ходе считывания входных данных. Сначала заполняются списки имен элементов и расположения фишек. На UML-диаграмме в классе NBR_Prototype данные списки обозначены атрибутами Places, Transitions, Arcs и Tokens. Также формируются списки входных и выходных ТД (объекты класса NBR_Param), атрибуты Input и Output соответственно. Эта информация является текстовой и считывается из конфигурационного файла методом Load. После этого происходит подготовка шаблона к использованию в алгоритме генерации. Подготовка заключается в заполнении специальных целочисленных массивов, которые позволяют реализовать процедуру слияния шаблонов за $O(n)$, где n в данном случае — это число мест, участвующих

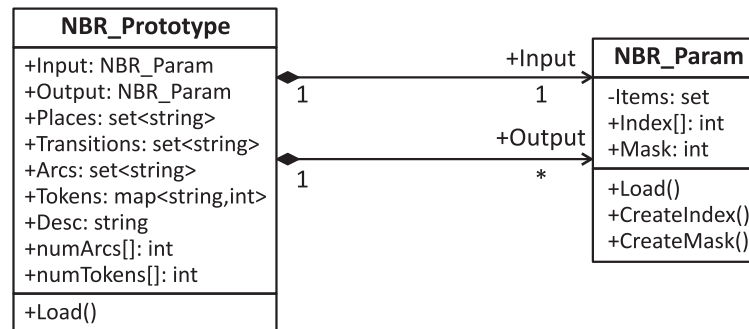


Рис. 9 Диаграмма классов, описывающая шаблон

в слиянии в одной ТД, и процедуру выбора шаблонов из коллекции за $O(1)$. Инициализируются следующие массивы: **Index** в **NBR_Param** хранит порядковый номер места в списке имен мест шаблона; **numArcs** и **numTokens** в **NBR_Prototype** также хранят значения кратности дуг и расположения токенов по порядковым номерам мест и переходов в соответствующих списках имен элементов шаблона.

Для быстрого выбора шаблона из коллекции было введено понятие целочисленной *маски*, которая играет роль хеша, построенного по текстовому описанию ТД. Разработана следующая схема побитового кодирования маски. Младшие 8 бит хранят общее число мест ТД. Биты с 9 и старше содержат флаг участия места в операции. Порядковый номер бита, не считая младшие 8 бит, соответствует индексу в массиве **Index**, который, в свою очередь, хранит индекс на массив прототипа, содержащий имена соответствующих элементов. Таким образом, при операции сравнения, когда определяется, подходит шаблон для слияния или нет, достаточно сравнить только маску входной и выходной ТД. Стоимость операции сравнения двух чисел — $O(1)$. При слиянии получение имени элемента, который нужно присоединить из шаблона к основной сети, также составляет $O(1)$. Нужно из маски взять нужный бит, по нему в индексе **Index** достать порядковый номер элемента, по которому уже получить добавляемый элемент.

На рис. 10 представлен пример описания внутренних целочисленных списков, которые сокращают время добавления шаблона в генерируемую сеть. Нетрудно видеть, что для хранения значения маски для n мест требуется $2^n + k$ бит, где k — это число бит для хранения самого значения n . В настоящее время размер маски ограничен 32-битным целым числом, а вспомогательный массив имеет 32 элемента. Соответственно, в текущей реализации шаблоны могут сливаться не более чем по 32 разным местам. Данные ограничения являются временными и могут быть легко расширены на любое число элементов шаблона применением специальных битовых массивов для хранения последовательностей битов произвольной длины.

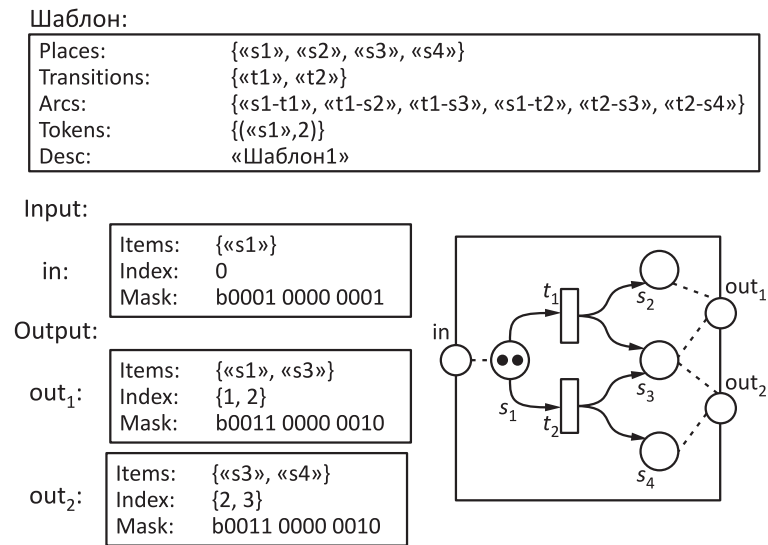


Рис. 10 Описание внутренних структур шаблона

Непосредственный выбор шаблона из коллекции по маске входной ТД происходит случайным образом. Для сокращения затрат на поиск подходящего шаблона по маске также применяется дополнительный индекс (сортировка по маске), который за $O(1)$ позволяет выбрать элемент из списка.

6 Анализ алгоритма

Проведем оценку сложности разработанного алгоритма. Алгоритм генерации СП по коллекции шаблонов является итерационным. На каждой итерации запускаются три потенциально ресурсоемкие процедуры: случайный выбор шаблона для шага эволюции коллекции, слияние стартового шаблона (результатирующая сеть) с выбранным шаблоном и пополнение списка выходных точек стартового шаблона для последующих шагов эволюции.

Общеизвестно, что процедура извлечения головного элемента из списка выходных ТД АР реализуется за $O(1)$ [11], поэтому не будем ее рассматривать. Выше уже было отмечено, что за счет применения маски и индекса шаблонов по маске процедуру выбора можно реализовать за $O(1)$. Поэтому она также не влияет на общую скорость работы шага эволюции. Ее тоже не будем рассматривать. Слияние шаблонов на каждом шаге эволюции также реализуется за $O(n)$. Это обычный цикл по числу элементов, которые последовательно добавляются в стартовый шаблон. Дуги также переносятся за $O(n)$ за счет наличия индекса порядковых номеров элементов в шаблоне.

Остается процедура дополнения списка ТД стартового шаблона. Положим, имеется в наличии такая коллекция шаблонов, что в ней каждый шаблон имеет по n элементов в своей структуре и по m ТД в выходном интерфейсе. Тогда для общей оценки времени работы итерации получим $O(n + m^2)$. Возможны четыре варианта входных данных относительно N — числа элементов генерируемой сети:

- (1) большие шаблоны с большим числом выходных ТД (число сравнимо с N);
- (2) большие шаблоны с небольшим числом выходных ТД;
- (3) небольшие шаблоны с большим числом выходных ТД;
- (4) небольшие шаблоны с небольшим числом выходных ТД.

Варианты 1 и 3 приводят к $O(m^2)$. Все время уйдет на пополнение списка ТД, по которым еще возможна эволюция коллекции шаблонов. Вариант 2 приводит к $O(n)$. Число ТД в выходных интерфейсах несравнимо меньше, чем число элементов структуры шаблона, поэтому оценкой по m можно пренебречь. Вариант 4 более сложный. Когда число элементов в структуре шаблона сравнимо с числом элементов, которые надо сгенерировать, а соответственно и число ТД тоже сравнимо с N , оценка алгоритма будет приближаться к $O(n^2)$ (m и n — сравнимые величины). Если же $N \gg n$ и $n \sim m$, то оценка будет в худшем случае приближаться к $O(n^2)$. Если же $N \gg n$ и $n \gg m$, то приходим к варианту 2, когда оценкой по m можно пренебречь, и тогда получаем $O(n)$.

Таким образом, можно сказать, что в лучшем случае алгоритм имеет оценку $O(n)$, в худшем случае — $O(n^2)$. Отметим, что варианты с большим числом выходных ТД вряд ли имеют какое-то практическое значение с точки зрения получаемой на выходе сети, а также трудоемкости подготовки входных данных (описания ТД у шаблонов). Для «хороших» входных данных, когда число ТД небольшое по сравнению с числом элементов в структуре шаблонов и число элементов в результирующей сети несравнимо больше числа элементов в шаблоне, оценка алгоритма будет оптимальной — $O(n)$.

7 Тестирование программной реализации

Рассмотрим на простом примере результаты работы предложенного алгоритма для сетей различной величины. В качестве набора шаблонов возьмем шаблоны, описывающие алгоритмические конструкции императивного языка программирования. Будем использовать общепринятое представление потока управления этих конструкций в СП [12]. Таким образом, в результате генерации предполагается получить сеть, которая имитирует поведение последовательного алгоритма, состоящего из условий, циклов и последовательных конструкций.

Для тестирования времени работы алгоритма использовался один и тот же набор шаблонов для генерации сетей размером от 10^2 до 10^7 элементов. Результаты расчетов приведены в таблице.

Результаты измерений скорости работы алгоритма генерации

Число элементов, шт	Время работы, с	Объем памяти, МБ
100	0,001	14
500	0,003	15
1 000	0,024	15,5
2 000	0,045	16
3 000	0,068	16,5
4 000	0,093	17
5 000	0,117	18
6 000	0,142	18,5
7 000	0,162	19
8 000	0,183	19,5
9 000	0,215	20
10 000	0,234	20,5
50 000	1,277	43
100 000	2,567	72
500 000	13,521	311
1 000 000	29,108	607
10 000 000	319,494	6000

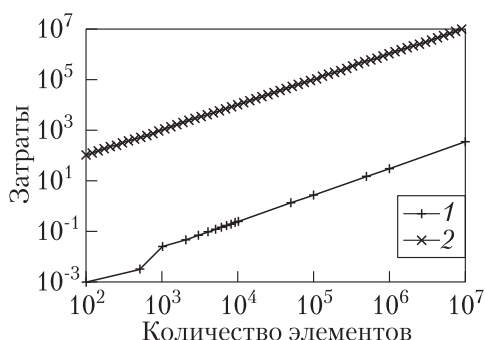


Рис. 11 График производительности алгоритма генерации: 1 — алгоритм генерации; 2 — функция $O(n)$

модели, то в первом случае эта проблема заключается в отсутствии системного подхода к автоматизации построения моделей программ и, как следствие, отсутствии автоматических средств построения этих моделей. В результате требуется вмешательство человека для того, чтобы анализируемая модель содержала все необходимые события и состояния программы и не содержала излишних событий и состояний для сокращения требований к вычислительным ресурсам при ее анализе. Такая ситуация тормозит развитие как средств анализа, так и средств

На рис. 11 представлен график производительности: 1 — это результаты измерений работы алгоритма; 2 — это линейная функция $O(n)$. Отметим, что шкалы по осям OX и OY являются логарифмическими. Видно, что после 1000 элементов алгоритм ведет себя стабильно линейно. До 1000 элементов наблюдается квадратичная зависимость от числа элементов результирующей сети.

Вместе со скоростью работы алгоритма оценивались затраты на использование оперативной памяти. Они также растут линейно в зависимости от объема генерируемой сети. Это показывает, что затраты на применение индексов являются минимальными по сравнению с объемом памяти, занимаемым самой результирующей сетью.

8 Заключение

В общем случае проблема анализа программ включает две совершенно разные задачи. Первая задача состоит в построении пригодной для анализа модели программы. Вторая — в применении к этой модели методов анализа. Обе эти задачи являются сложными, но по разным причинам. Если в случае применения методов анализа основную проблему представляет комбинаторный взрыв числа состояний анализируемой модели,

построения моделей. Предложенный в настоящей статье подход предназначен для ускорения развития методов анализа за счет подготовки первоначального множества моделей, на которых эти средства будут тестироваться, причем в качестве ориентира выбраны большие модели, требующие оптимизации алгоритмов относительно производительности и потребляемой памяти, а также адаптации алгоритмов для работы на многопроцессорных системах. Кроме того, необходима разработка новых подходов по представлению результатов анализа. В работе представлен простой генератор СП, позволяющий имитировать процесс формирования императивной программы из стандартных алгоритмических конструкций. Тестирование генератора показало его работоспособность и практически линейную зависимость производительности и требований к объему памяти относительно размера генерируемой сети.

Литература

1. *Jensen K., Kristensen L. M., Mailund T.* The sweep-line state space exploration method // *Theor. Comput. Sci.*, 2012. Vol. 429. P. 169–179. doi: 10.1016/j.tcs.2011.12.036.
2. *Abid C. A., Zouari B.* Local verification using a distributed state space // *Fundam. Inform.*, 2013. Vol. 125. No. 1. P. 1–20. doi: 10.3233/FI-2013-850.
3. *Jezequel L., Fabre E., Khomenko V.* Factored planning: From automata to Petri nets // *ACM T. Embed. Comput. S.*, 2015. Vol. 14. No. 2. Article No. 26. doi: 10.1145/2656215.
4. *Kammoun M. A., Rezg N., Achour Z., Rezig S.* State space search for safe time Petri nets based on binary decision diagrams tools: Application to air traffic flow management problem // *Stud. Inform. Control*, 2016. Vol. 25. No. 1. P. 39–50. doi: 10.24846/v25i1y201605.
5. *Wang C., Tao Y., Zhou Y.* Protocol verification by simultaneous reachability graph // *IEEE Commun. Lett.*, 2017. Vol. 21. No. 8. P. 1727–1730. doi: 10.1109/LCOMM.2017.2695191.
6. *Thierry-Mieg Y.* Symbolic model-checking using ITS-tools // 21st Conference (International) on Tools and Algorithms for the Construction and Analysis of Systems Proceedings. — London: Springer, 2015. P. 231–237.
7. *Amparore E. G., Beccuti M., Donatelli S.* (Stochastic) model checking in GreatSPN // Application and theory of Petri nets and concurrency / Eds. G. Ciardo, E. Kindler. — Lecture notes in computer science ser. — Springer, 2014. Vol. 8489. P. 354–363. doi: 10.1007/978-3-319-07734-5_19.
8. *Berthomieu B., Dal Zilio S., Fronc L.* Model-checking real-time properties of an aircraft landing gear system using fiacre // *Commun. Com. Inf. Sc.*, 2014. Vol. 433. P. 110–125. doi: 10.1007/978-3-319-07512-9_8.
9. *Wolf K.* Running LoLA 2.0 in a model checking competition // Transactions on Petri nets and other models of concurrency XI / Eds. M. Koutny, J. Desel, J. Kleijn. — Lecture notes in computer science ser. — Berlin–Heidelberg: Springer-Verlag, 2016. Vol. 9930. P. 274–285. doi: 10.1007/978-3-662-53401-4_13.
10. *Харитонов Д. И., Голенков Е. А., Тарасов Г. В., Леонтьев Д. В.* Метод генерации примеров моделей программ в терминах сетей Петри // Моделирование и анализ

информационных систем, 2015. Т. 22. № 4. С. 563–577. doi: 10.18255/1818-1015-2015-4-563-577.

11. Кормен Т. Х., Лейзерсон Ч. И., Ривест Р. И., Штайн К. Алгоритмы: построение и анализ / Пер. с англ. — 2-е изд. — М.: Вильямс, 2005. 1296 с. (*Cormen T. H., Leiserson C. E., Rivest R. L., Stein C.* Introduction to algorithms. — 2nd ed. — Cambridge, MA, USA: MIT Press; Boston: McGraw-Hill, 2001. 1184 p.)
12. Питерсон Дж. Л. Теория сетей Петри и моделирование систем / Пер. с англ. — М.: Мир, 1984. 264 с. (*Peterson J. L.* Petri net theory and the modeling of systems. — Englewood Cliffs, NJ, USA: Prentice-Hall, 1981. 241 p.)

Поступила в редакцию 10.10.17

SOFTWARE IMPLEMENTATION OF A METHOD FOR GENERATION OF PETRI NETS OF LARGE SIZE

D. I. Kharitonov, G. V. Tarasov, and D. V. Leontyev

Institute of Automation and Control Processes, Far-Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, 5 Radio Str., Vladivostok 690041, Russian Federation

Abstract: The software implementation of a method for generation of Petri nets having millions of elements of places and transitions is described. Particular attention is paid to the internal data structures and algorithmic complexity of the method. The presented material allowed the authors to obtain a software tool with computational complexity $O(n)$ where n is the number of elements in a model. The described theoretical results are justified by the performance tests in practical experiments.

Keywords: Petri nets; program model; data structures; algorithm analysis; object-oriented programming

DOI: 10.14357/08696527180208

Acknowledgments

The research was supported by the Program of the Presidium of the Russian Academy of Sciences (project 0262-2014-0157) and by the Far East Program (project 15-I-4-025).

References

1. Jensen, K., L. M. Kristensen, and T. Mailund. 2012. The sweep-line state space exploration method. *Theor. Comput. Sci.* 429:169–179. doi: 10.1016/j.tcs.2011.12.036.
2. Abid, C. A., and B. Zouari. 2013. Local verification using a distributed state space. *Fundam. Inform.* 125(1):1–20. doi: 10.3233/FI-2013-850.

3. Jezequel, L., E. Fabre, and V. Khomenko. 2015. Factored planning: From automata to Petri nets. *ACM T. Embed. Comput. S.* 14(2). Article No. 26. doi: 10.1145/2656215.
4. Kammoun, M. A., N. Rezg, Z. Achour, and S. Rezig. 2016. State space search for safe time Petri nets based on binary decision diagrams tools: Application to air traffic flow management problem. *Stud. Inform. Control* 25(1):39–50. doi: 10.24846/v25i1y201605.
5. Wang, C., Y. Tao, and Y. Zhou. 2017. Protocol verification by simultaneous reachability graph. *IEEE Commun. Lett.* 21(8):1727–1730. doi: 10.1109/LCOMM.2017.2695191.
6. Thierry-Mieg, Y. 2015. Symbolic model-checking using ITS-tools. *21st Conference (International) on Tools and Algorithms for the Construction and Analysis of Systems Proceedings*. London: Springer. 231–237.
7. Amparore, E. G., M. Beccuti, and S. Donatelli. 2014. (Stochastic) model checking in GreatSPN. *Application and theory of Petri nets and concurrency*. Eds. G. Ciardo and E. Kindler. Lecture notes in computer science ser. 8489:354–363. doi: 10.1007/978-3-319-07734-5_19.
8. Berthomieu, B., S. Dal Zilio, and L. Fronc. 2014. Model-checking real-time properties of an aircraft landing gear system using fiacre. *Comm. Com. Inf. Sc.* 433:110–125. doi: 10.1007/978-3-319-07512-9_8.
9. Wolf, K. 2016. Running LoLA 2.0 in a model checking competition. *Transactions on Petri nets and other models of concurrency XI*. Eds. M. Koutny, J. Desel, and J. Kleijn. Lecture notes in computer science ser. Berlin–Heidelberg: Springer-Verlag. 9930:274–285. doi: 10.1007/978-3-662-53401-4_13.
10. Kharitonov, D. I., E. A. Golenkov, G. V. Tarasov, and D. V. Leontyev. 2015. Metod generatsii primerov modeley programm v terminakh setey Petri [A method of sample models of program construction in terms of Petri nets]. *Modelirovanie i analiz informatsionnykh sistem* [Modeling and Analysis of Information Systems] 22(4):563–577. doi: 10.18255/1818-1015-2015-4-563-577.
11. Cormen, T. H., C. E. Leiserson, R. L. Rivest, and C. Stein. 2001. *Introduction to algorithms*. 2nd ed. Cambridge, MA: MIT Press; Boston: McGraw-Hill. 1184 p.
12. Peterson, J. L. 1981. *Petri net theory and the modeling of systems*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall. 241 p.

Received October 10, 2017

Contributors

Kharitonov Dmitriy I. (b. 1973) — Candidate of Science (PhD) in technology, senior scientist, Institute of Automation and Control Processes, Far-Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, 5 Radio Str., Vladivostok 690041, Russian Federation; demiurg@dvo.ru

Tarasov Georgiy V. (b. 1977) — scientist, Institute of Automation and Control Processes, Far-Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, 5 Radio Str., Vladivostok 690041, Russian Federation; george@dvo.ru

Leontyev Denis V. (b. 1992) — PhD student, Institute of Automation and Control Processes, Far-Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, 5 Radio Str., Vladivostok 690041, Russian Federation; devozh@dvo.ru

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ КИНЕТИКИ ФОРМИРОВАНИЯ КЛАСТЕРОВ УГЛЕРОДА В ПЛАЗМЕ

Г. В. Абрамов¹, А. Н. Гаврилов²

Аннотация: Рассмотрены методы моделирования процессов движения и взаимодействия заряженных частиц в многокомпонентной плазме на основе системы уравнений Больцмана–Максвелла на примере электродугового синтеза углеродных наноструктур (УНС). Представлен вывод конечных уравнений для интегралов столкновений в предлагаемой модели. Предложен алгоритм и технология численного решения модели с применением технологий распараллеливания вычислений nVidia CUDA (Compute Unified Device Architecture). Выполнен сравнительный анализ, подтверждающий адекватность модели физическому процессу. Исследованы условия и области, удовлетворяющие пространственным и энергетическим условиям вероятностного формирования линейных кластерных групп $C=C-C$ (C_3), составляющих основу УНС. Получены количественные характеристики парных столкновений ионов углерода в плазме с образованием кластеров C_3 для различных параметров синтеза. Исследовано влияние напряжения и плотности тока на число взаимодействий и образовавшихся при этом кластеров C_3 в плазме межэлектродного пространства.

Ключевые слова: углеродные наноструктуры; плазма; моделирование; уравнение Больцмана; метод крупных частиц; кластеры углерода; GPGPU

DOI: 10.14357/08696527180209

1 Введение

Применение УНС (фуллеренов, нанотрубок, нановолокон) в качестве наполнителя матрицы полимерных смол позволяет получать композиты, обладающие новым или улучшенным комплексом свойств [1]. Однако развитие промышленного производства данных материалов сдерживают высокая затратность и низкая эффективность существующих технологий синтеза УНС. Это обусловлено недостаточной изученностью особенностей процесса образования УНС. Понимание механизма образования УНС даст возможность исследователям целенаправленно создавать и варьировать способы и условия получения различных типов наноструктур и их производных, что позволит повысить производительность и качество синтезируемого продукта и снизить его себестоимость.

¹Факультет прикладной математики, информатики и механики Воронежского государственного университета, agwl@yandex.ru

²Факультет управления и информатики в технологических системах Воронежского государственного университета инженерных технологий, ganinvrn@yandex.ru

Наиболее известные технологии синтеза, позволяющие получать УНС в значительных объемах, базируются на термическом разрушении структуры исходного материала с последующим образованием и ростом многоатомных кластеров углерода, формирующих объемные наноструктуры. К таким технологиям относят и методы синтеза УНС на основе термической возгонки графита плазмой с последующим осаждением на охлаждаемой поверхности. Одной из разновидностей данных технологий синтеза является электродуговой метод получения УНС в среде инертного газа [2]. Метод отличается высокой скоростью протекания, возможностью получения при разных режимах разнородного качественного продукта (фуллеренов ряда C_{60} – C_{70} , однослойных, многослойных нанотрубок, нановолокон), а также позволяет вовлекать в производственный процесс значительные объемы сырья.

Исследование различных режимов и поиск оптимальных параметров синтеза УНС плазмой экспериментальными методами крайне затруднительно и малоэффективно, поэтому в статье предлагается использовать методы математического моделирования. Для моделирования динамики плазмы применительно к электродуговому синтезу с учетом степени детализации задачи, достаточной для инженерных расчетов и современного уровня вычислительных ресурсов, наиболее подходит кинетическое описание. Использование функций распределения заряженных частиц по координатам и скоростям позволяет с высокой степенью вероятности прогнозировать разнообразие происходящих процессов в многокомпонентной плазме и снизить вычислительную сложность моделирования.

Целью данной работы является разработка методики моделирования процессов при формировании УНС термическим испарением графита плазмой на примере электродугового синтеза УНС и разработка эффективных методик и алгоритмов расчета рассматриваемой ресурсоемкой задачи. Для этого необходимо учитывать движение и взаимодействие частиц в многокомпонентной плазме с учетом упругих и неупругих парных столкновений, образование и рост кластерных групп углерода с различными типами связей, формирующих объемные УНС на основе пространственно-энергетических условий взаимодействия. При этом должны учитываться все технологические факторы, влияющие на число взаимодействий и процесс образования устойчивых связей между ионами углерода в плазме.

Наличие большого числа разнообразных частиц и их взаимодействий, присутствующих одновременно в плазме межэлектродного пространства, делает расчеты очень ресурсоемкими. Поэтому для получения физически оправданных результатов численного моделирования предлагается использовать алгоритм численного решения с применением технологии параллельных вычислений GPGPU (General-purpose graphics processing units), позволяющей производить обработку больших объемов данных графическими процессорами видеокарты персонального компьютера (ПК) без использования суперкомпьютеров или облачных вычислений, что значительно упрощает организацию алгоритма вычислений и повышает экономическую эффективность расчетов.

2 Математическое моделирование формирования углеродных наноструктур в плазме электродугового разряда

В основу предлагаемой математической модели, описывающей движение частиц в многокомпонентной плазме с учетом взаимодействий между ними, положена система уравнений Больцмана [3] для каждого вида частиц плазмы, дополненная условием парных столкновений между частицами (e — электрон, c — ион углерода, h — ион буферного газа (He)):

$$\frac{\partial f_\alpha}{\partial t} + \vec{v} \frac{\partial f_\alpha}{\partial \vec{r}} - \frac{q_\alpha}{m_\alpha} \left(\vec{E} + \frac{1}{c} [\vec{v}, \vec{B}] \right) \frac{\partial f_\alpha}{\partial \vec{v}} = \frac{\partial f_\alpha}{\partial t} \Big|_{\text{СТ}}, \quad \alpha = e, c, h. \quad (1)$$

Допуская, что столкновения в плазме дугового разряда происходят между электронами, ионами буферного газа и частицами углерода, интегралы парных столкновений можно записать в виде:

$$\frac{\partial f_\alpha}{\partial t} \Big|_{\text{СТ}} = \sum_{k=e,c,h} \iint_V (f'_\alpha f'_k - f_\alpha f_k) |\vec{v} - \vec{v}'| d\sigma d\vec{v}', \quad (2)$$

где f_α и f'_α — функции распределения компонент плазмы до и после столкновения; $\vec{v}$ и $\vec{v}'$ — скорости частиц до и после столкновения; $\vec{r}$ — координаты частицы; q_α и m_α — заряд и масса частицы; $\vec{E}$ — напряженность электрического поля; $\vec{B}$ — магнитная индукция; $d\sigma = 4R_1 R_2 \cos \theta d\Omega$ — дифференциальное эффективное сечение рассеяния частиц R_1 и R_2 в телесный угол $d\Omega$, θ — угол между скоростью сталкивающихся частиц и линией движения.

Система уравнений (1) с целью нахождения параметров электромагнитного поля дополняется системой уравнений Максвелла, описывающих самосогласованное поле [4]. Начальные и граничные условия также представлены в работе [4]. В качестве функции, описывающей распределение частиц по скоростям в плазме, задается распределение Максвелла.

Использование в уравнениях Больцмана (1) интеграла столкновений (2) вызывает значительные сложности при решении данной задачи в явном виде. Поэтому, используя подход, принятый в работе [5], интеграл столкновений следует представить в виде уравнения Фоккера–Планка для произвольной функции распределения α . Опуская промежуточные преобразования и пренебрегая упругими столкновениями электрон–электрон, получаем конечные уравнения для интегралов столкновений в безразмерном виде:

$$\left(\frac{\partial \hat{f}_\alpha}{\partial \hat{t}} \right)_{\text{СТ}} = K_\alpha \left\{ \frac{1}{2} G_\alpha \frac{\partial^2 \hat{f}_\alpha}{\partial \hat{v}_r^2} + C_\alpha \frac{\partial \hat{f}_\alpha}{\partial \hat{v}_r} + R_\alpha \right\}, \quad \alpha = e, c, h,$$

где K_α , G_α , C_α и R_α — матрицы безразмерных коэффициентов размерностью (3×1) .

Итоговая система уравнений (1) описывает кинетику движения заряженных частиц в трехкомпонентной плазме дугового разряда в безразмерном виде:

$$\frac{\hat{f}_\alpha}{\partial \hat{t}} = \tilde{Q}_1 f_\alpha + \tilde{Q}_2 f_\alpha; \quad (3)$$

$$\tilde{Q}_1 \hat{f}_\alpha = -\sqrt{\delta_\alpha} \left\{ \hat{v}_r \frac{\partial \hat{f}_\alpha}{\partial \hat{r}} + \frac{Z_\alpha}{2\varepsilon_\alpha} \hat{E}_r \frac{\partial \hat{f}_\alpha}{\partial \hat{v}_r} \right\}; \quad (4)$$

$$\tilde{Q}_2 \hat{f}_\alpha = K_\alpha \left\{ \frac{1}{2} G_\alpha \frac{\partial^2 \hat{f}_\alpha}{\partial \hat{v}_r^2} + C_\alpha \frac{\partial \hat{f}_\alpha}{\partial \hat{v}_r} + R_\alpha \right\}. \quad (5)$$

Для решения системы уравнений (3) используется метод расщепления, согласно которому исходная задача разбивается на две вспомогательные: одна определяет перенос частиц, вторая — столкновение заряженных частиц. В результате образуются две задачи, которые решаются последовательно.

Первая задача (4) представляет собой систему безразмерных уравнений Власова–Пуассона, решение которой осуществляется в три этапа: эйлеров, лагранжевый и заключительный. На первом этапе рассматриваемая среда заменяется системой частиц, совпадающих в данный момент времени с ячейками эйлеровой сетки, пренебрегается всеми эффектами, связанными с перемещением частиц через границы ячеек и производится расчет величин, относящихся к ячейке в целом. Для заданного распределения концентраций решается уравнение Пуассона с целью получения значений потенциала и напряженности самосогласованного электрического поля. Решение граничной задачи для уравнения Пуассона находится путем перехода к конечно-разностной системе уравнений с использованием метода прогонки. На лагранжевом этапе моделируется движение частиц через границы ячеек. Для этого решается система уравнений движения, записанная для центров частиц, с использованием метода численного интегрирования. На заключительном третьем этапе производятся вычисления перераспределения массы, энергии и заряда по пространству.

Решением первой вспомогательной задачи является функция, дающая начальное условие для второй задачи (5). Решение второй задачи, учитывающей столкновения частиц, позволяет найти коэффициенты в интеграле столкновений и получить функции распределения частиц для рассматриваемых моментов времени. Для этого используется метод сеток.

Для расчета температурного поля и начальных скоростей ионов углерода при испарении с анода и эмиссии электронов с катода была построена дополнительно математическая модель процесса теплопереноса с подвижными границами [6].

Наличие большого числа частиц, участвующих в расчете, вызывает необходимость использования для численного решения системы уравнений Больц-

мана–Максвелла метода «крупных частиц» (МНК) [7], позволяющего снизить объем вычислений и требования к компьютерным ресурсам за счет уменьшения числа однотипных частиц в расчете путем их группировки в макрочастицы до обоснованного уровня, не влияющего на точность расчетов.

В конечном итоге при численном расчете модели процесса формирования УНС в плазме электродугового разряда на каждом временном шаге решаются последовательно следующие основные задачи:

- (1) расчет температурного поля и начальных скоростей частиц углерода;
- (2) формирование начального распределения крупных частиц в ячейках расчетной сетки;
- (3) расчет потенциалов в узлах сетки;
- (4) расчет параметров электромагнитного поля методом установления;
- (5) расчет траектории движения крупной частицы;
- (6) вычисление столкновений частиц и образование кластеров в плазме;
- (7) вычисление новых параметров частиц.

Проведенный анализ решаемых задач позволил сделать вывод о том, что для решения задач 2, 4–6 возможна организация параллельных вычислений, позволяющая снизить общее время расчета. С целью снижения стоимости расчетов по построенной модели все вычисления были выполнены с использованием технологии параллельных вычислений GPGPU на аппаратно-программном комплексе CUDA с применением технологии nVidia CUDA [8]. Данная технология позволяет использовать графические процессоры для вычислений общего назначения на одном ПК, что значительно повышает эффективность обработки больших объемов данных без использования суперЭВМ или вычислительных кластеров.

Одной из особенностей технологии GPGPU является то, что не все одинаковые потоки, запущенные в один момент времени, закончат выполнение одновременно, поэтому в ходе численного расчета модели решалась также задача синхронизации параллельных участков вычислений.

Для решения задачи поиска столкновений частиц был разработан специальный алгоритм, заключающийся в проверке факта пересечения траекторий объектов в пространстве.

В процессе моделирования определялись зоны и состояния, удовлетворяющие пространственным и энергетическим условиям вероятного формирования кластерных групп углерода со связями типа C–C, C=C (C₂) и C=C–C (C₃) [9], нарастание которых образует линейные углеродные цепочки, замыкающиеся в моноциклические кольца (пентагоны и гексагоны), формирующие выпуклые структуры углерода (фуллерены, нанотрубки) как в плазме, так и на катоде.

3 Результаты исследований

Для проведения исследований по модели были выбраны два режима синтеза УНС: режим образования катодного депозита с максимальным содержанием нанотрубок (режим «Нанотрубки», сила тока дуги — 150 Å) и режим с максимальным выходом фуллеренов, осаждающихся на стенки камеры в виде сажи (режим «Фуллерены», сила тока — 350 Å). Остальные параметры расчета: межэлектродное расстояние — 1 мм; диаметр электродов — 12 мм; напряжение между электродами — 25 В; давление буферного газа (He) в камере синтеза — 400 Торр.

Для подтверждения адекватности модели была выполнена аналогичная серия экспериментов на лабораторной установке синтеза УНС с автоматизированной информационной системой управления [10]. Результаты экспериментальных исследований и численных расчетов по разработанной модели доли осаждения углерода на катод с образованием катодного депозита и оседания (выбивание + отражение) на стенки камеры в виде сажи от количества испаренного углерода с анода показаны на рис. 1.

Результаты расчета количественных характеристик взаимодействия ионов углерода с образованием устойчивых кластеров со связями $\text{C}=\text{C}-\text{C}$ в плазме межэлектродного пространства представлены на рис. 2. Здесь время расчета — 360 нс, временной шаг $\Delta t = 10 \text{ нс}$.

Анализ выполненных численных расчетов показывает, что формирование кластеров углерода со связями типа C_3 , составляющих основу синтезируемых УНС в процессе электродугового синтеза, в рассматриваемых режимах происходит во всем межэлектродном пространстве, но с разной интенсивностью.

Разница в числе образующихся кластеров C_3 в рассматриваемых режимах синтеза объясняется разными параметрами электромагнитных полей, ускоряющих частицы, разной температурой плазмы и разными начальными скоростями частиц. Наибольшее число взаимодействий частиц углерода (и, соответственно, образование устойчивых связей) происходит в первой и последней четверти межэлектродного пространства. В первой четверти большое число взаимодействий обусловлено высокой концентрацией атомов углерода в области анода, что объясняется непрерывной возгонкой графита. Начальное направление движения частиц и их скорость на основе распределения Максвелла генерируется в модели случайным образом с учетом профиля выгорания анода. Далее траектория и скорость частиц начинают меняться с ускорением под действием электромагнитного поля, что ведет к увеличению расстояния между предыдущим и последующим слоями частиц и, в конечном счете, к снижению их концентрации. Концентрация также снижается за счет того, что траектория движения некоторых частиц с учетом всех столкновений выводит их за пределы межэлектродного пространства. В этом случае такие частицы исключаются из дальнейшего расчета и рассматриваются как осажденные в виде сажи на стенках камеры. Возрастание числа взаимодействий частиц в последний четверти межэлектродного

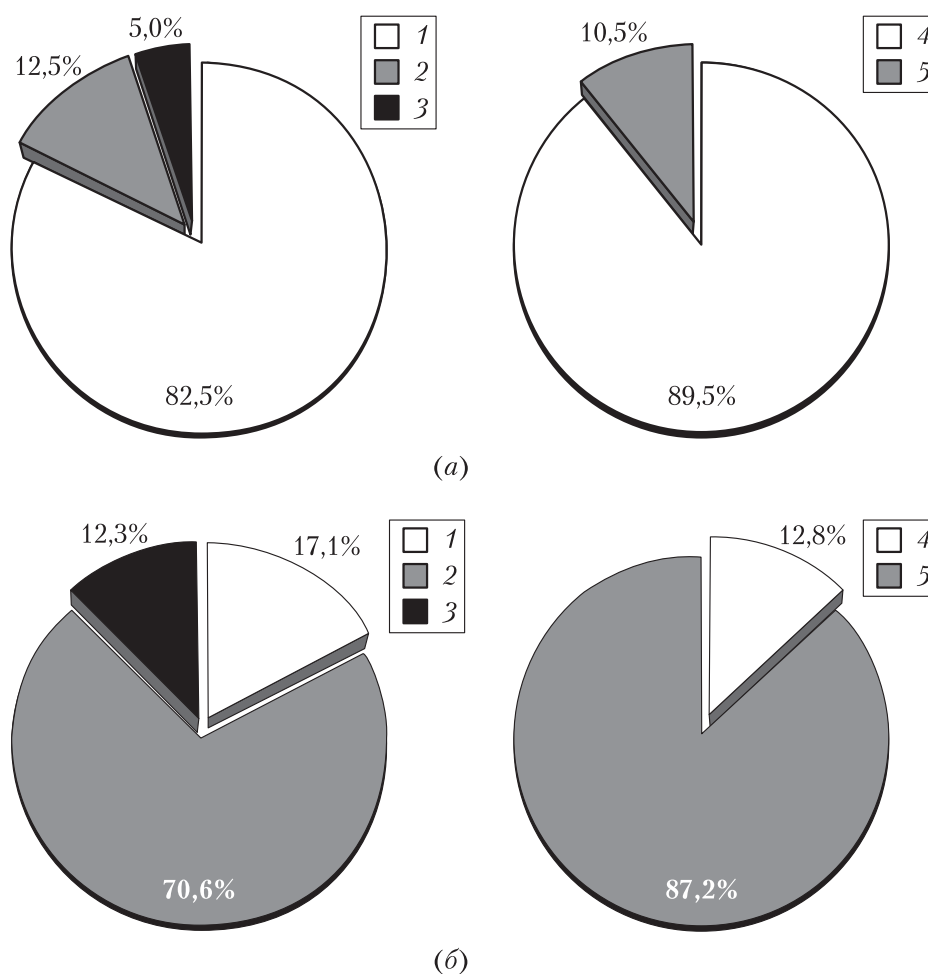


Рис. 1 Расчетные (левая колонка) (1 — осаждение; 2 — выбивание; 3 — отражение) и экспериментальные (правая колонка) (4 — депозит; 5 — сажа) значения доли осажденного углерода на катод от количества испаренного в режиме «Нанотрубки» (а) и «Фуллерены» (б)

пространства можно объяснить укрупнением макрочастиц за счет объединения частиц, образовавших устойчивые связи, повышением их энергии за счет разгона электромагнитным полем и, соответственно, увеличением их концентрации в прикатодной области.

Промежуточные пики числа столкновений, полученные в режиме «Фуллерены», объясняются дискретностью представления испарения графита с анода

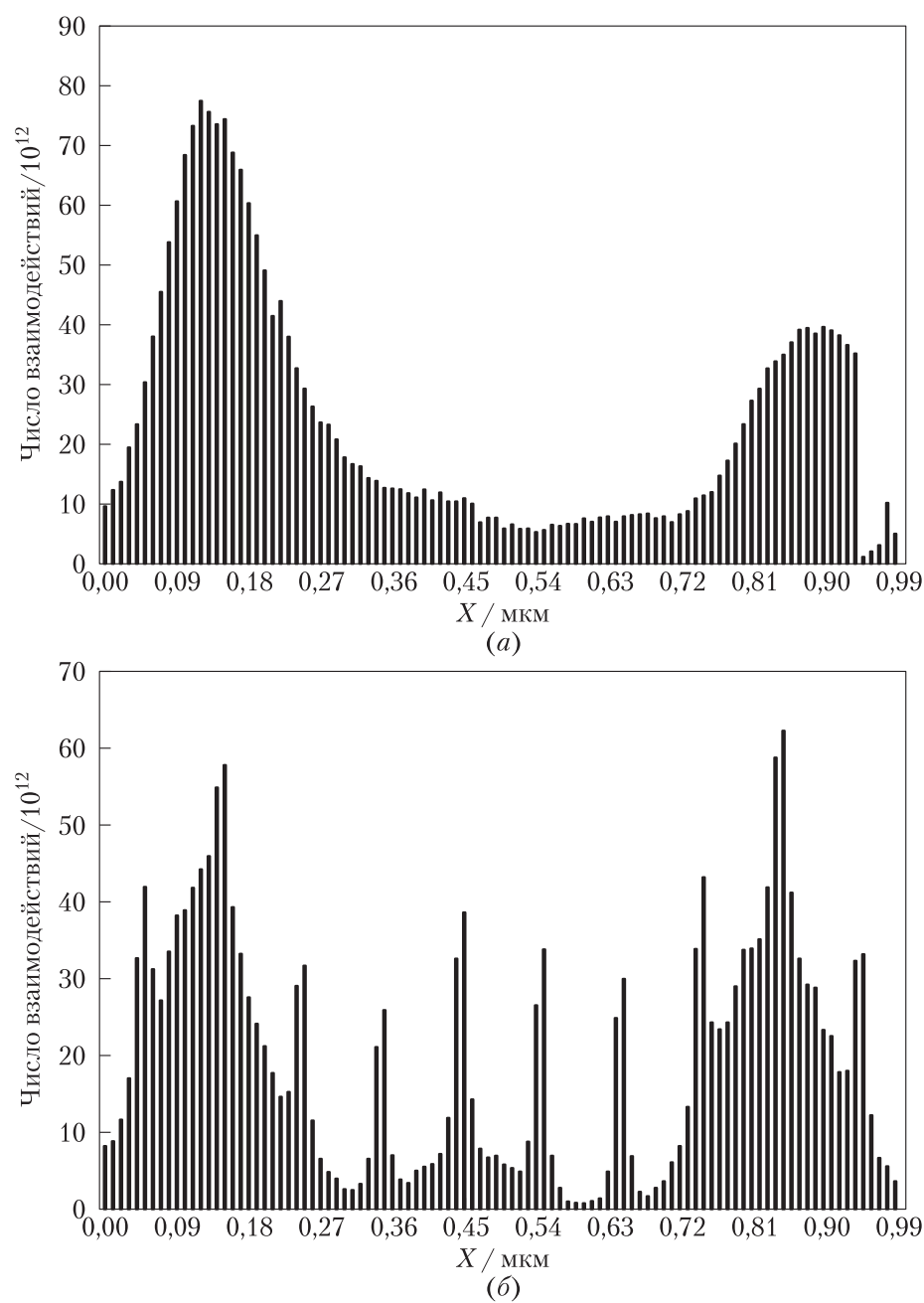


Рис. 2 Образование связей $\text{C}=\text{C}-\text{C}$ в режимах синтеза «Нанотрубки» (а) и «Фуллерены» (б)

при численных расчетах. Образование связей между атомами углерода в данном режиме идет интенсивно по всей длине межэлектродного пространства, что приводит к формированию фуллеренов в плазме без осаждения на катод.

На число взаимодействий и образовавшихся при этом кластеров C_3 в плазме непосредственное влияние оказывают напряжение на электродах и плотность

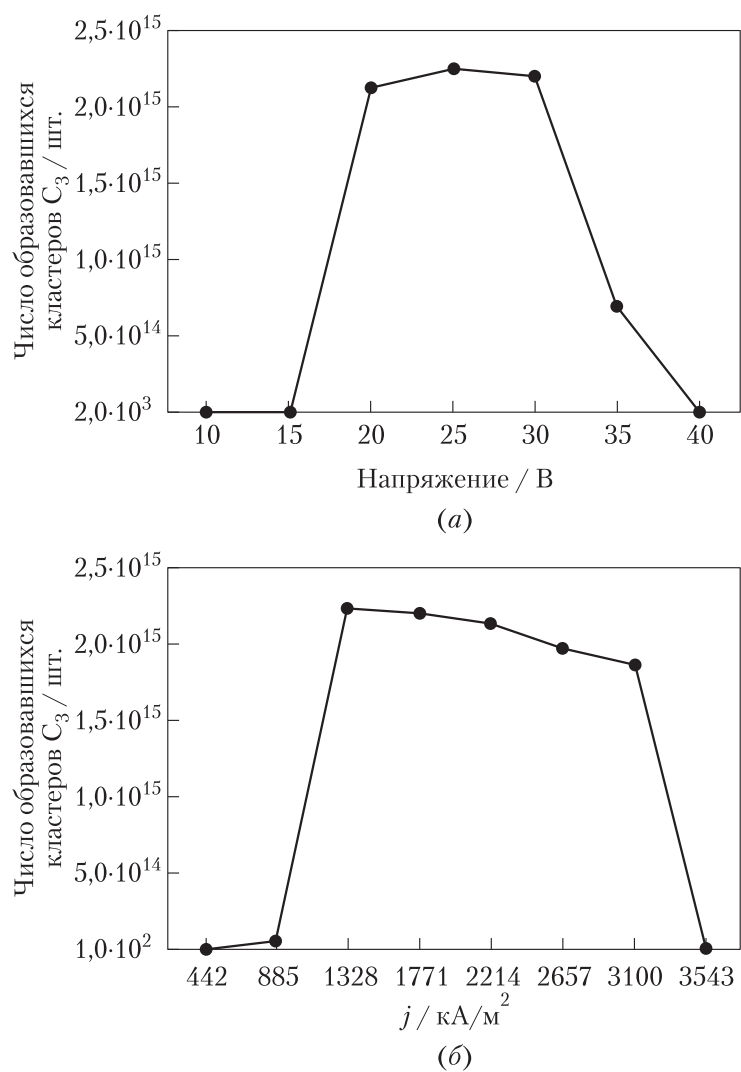


Рис. 3 Зависимость числа образовавшихся в плазме кластеров C_3 от напряжения (а) и плотности тока (б)

тока, которые определяют параметры электромагнитного и температурного полей, действующих на частицы. Анализ влияния основных технологических параметров на процесс синтеза УНС представлен на рис. 3.

Согласно расчетам, наибольшее число кластеров C_3 образуется при напряжении на электродах 20–30 В и плотности тока 1330–3170 кА/м².

Таким образом, разработанная модель позволяет моделировать кинетику формирования углеродных наноструктур в плазме электродугового разряда с учетом особенностей их синтеза.

4 Заключение

Предложенная методика моделирования движения и взаимодействия заряженных частиц в многокомпонентной плазме электродугового разряда на основе системы уравнений Больцмана–Максвелла с учетом парных упругих и неупругих взаимодействий между частицами позволяет учитывать процессы, протекающие в плазме, и рассчитывать параметры образующихся межатомных связей. Предложены алгоритм и методика численного расчета полученной модели с учетом большого числа взаимодействующих частиц с применением технологии распараллеливания вычислений nVidia CUDA. Выполнены исследования на основе полученной модели числа парных столкновений ионов углерода в плазме с образованием кластеров со связями типа $C=C-C$ для различных параметров синтеза. Это позволило сделать вывод о том, что образование кластеров в плазме происходит во всем межэлектродном пространстве, но с разной интенсивностью и зависит от параметров процесса. Разработанная методика может быть использована при расчете параметров технологического процесса синтеза углеродных наноструктур, а также для управления процессом.

Литература

1. Мэттьюз Ф., Ролингс Р. Композитные материалы. Механика и технология / Пер. с англ. — М.: Техносфера, 2004. 408 с. (*Matthews F. L., Rawlings R. D. Composite materials: Engineering and science. — Woodhead publishing ser. in composites science and engineering. — Woodhead Publishing Ltd., 1999. 480 p.*)
2. Гаврилов А. Н., Положно Е. А., Рязанов А. Н. Анализ методов синтеза и промышленное производство углеродных нанотрубок // ФЭС: Финансы. Экономика. Стратегия, 2010. № 6. С. 14а–19.
3. Черчиньяни К. Теория и приложения уравнения Больцмана / Пер. с англ. — М.: Мир, 1978. 495 с. (*Cercignani C. Theory and application of the Boltzmann equation. — New York, NY, USA: Elsevier, 1976. 415 p.*)
4. Абрамов Г. В., Гаврилов А. Н., Татаркин Е. С. Моделирование процесса формирования кластеров углерода в плазме термического распыления графита // Вестник ВГУ. Серия: Физика. Математика, 2011. № 2. С. 5–8.
5. Rosenbluth M. N., MacDonald W., Judd D. Fokker–Planck equation for an inverse-square force // Phys. Rev., 1957. Vol. 107. P. 1–6.

6. *Абрамов Г. В., Толстова И. С., Гаврилов А. Н.* Формирование начального распределения компонентов плазмы на фазовой плоскости в методе крупных частиц при электродуговом синтезе УНС // Вестник ВГУИТ, 2014. № 3(61). С. 67–71.
7. *Белоцерковский О. М., Давыдов Ю. М.* Метод крупных частиц в газовой динамике. Вычислительный эксперимент. — М.: Наука, Физматгиз, 1982. 392 с.
8. *Farber R.* CUDA application design and development. — Waltham, MA, USA: Morgan Kaufmann, 2011. 336 p.
9. *Abramov G. V., Gavrilov A. N., Tolstova I. S., Ivashin A. L.* Formation of clusters of carbon structures in plasma under thermal destruction of graphite // Nanotechnologies in Russia, 2017. Vol. 12. Iss. 3. P. 139–146.
10. *Абрамов Г. В., Гаврилов А. Н.* Автоматизированная система управления синтезом углеродных наноструктур в плазме дугового разряда // Автоматизация. Современные технологии, 2016. № 3. С. 10–14.

Поступила в редакцию 13.12.17

MATHEMATICAL METHODS FOR STUDYING THE KINETICS OF FORMATION OF CARBON CLUSTERS IN PLASMA

G. Abramov¹ and A. Gavrilov²

¹Voronezh State University, 1 University Sq., Voronezh 394018, Russian Federation

²Voronezh State University of Engineering Technologies, 19 Revolution Av., Voronezh 394036, Russian Federation

Abstract: The paper considers the methods of modeling movement and interaction of charged particles in multicomponent plasma on the basis of the Boltzmann–Maxwell system of equations by the example of electric arc synthesis of carbon nanostructures (CNS). The paper presents the derivation of the final equations for the collision integrals in the proposed model. The authors suggest the algorithm and technology of numerical solution of the model with the use of the technology of parallelization of computations using nVidia CUDA (Compute Unified Device Architecture). The comparative analysis confirming the adequacy of the model to the physical process was performed. The authors investigated the conditions and regions satisfying the spatial and energy terms of probabilistic formation of linear cluster groups C=C–C (C₃) that form the basis of CNS. The authors obtained quantitative characteristics of binary collisions of carbon ions in plasma with formation of clusters C₃ for different parameters of synthesis. The authors investigated the influence of voltage and current density on the number of interactions and clusters C₃ in plasma of the interelectrode space.

Keywords: carbon nanostructures; plasma; simulation; Boltzmann equation; method of large particles; clusters of carbon; GPGPU

DOI: 10.14357/08696527180209

References

1. Matthews, F. L., and R. D. Rawlings. 1999. *Composite materials: Engineering and science*. Woodhead publishing ser. in composites science and engineering. Woodhead Publishing Ltd. 480 p.
2. Gavrilov, A. N., E. A. Pologno, and A. N. Ryazanov. 2010. Analiz metodov sinteza i promyshlennoe proizvodstvo uglerodnykh nanotrubok [Analysis of methods of synthesis and industrial production of carbon nanotubes]. *FES: Finansy. Ekonomika. Strategiya* [FES] 6:14a–19.
3. Cercignani, C. 1976. *Theory and application of the Boltzmann equation*. New York, NY: Elsevier. 415 p.
4. Abramov, G. V., A. N. Gavrilov, and E. S. Tatarkin. 2011. Modelirovanie protsessa formirovaniya klasterov ugleroda v plazme termicheskogo raspyleniya grafita [Simulation of carbon clusters formation in the plasma by graphite thermal spraying]. *Proceedings of the Voronezh State University. Ser. Physics. Mathematics* 2:5–8.
5. Rosenbluth, M. N., W. MacDonald, and D. Judd. 1957. Fokker–Planck equation for an inverse-square force. *Phys. Rev.* 107:1–6.
6. Abramov, G. V., I. S. Tolstova, and A. N. Gavrilov. 2014. Formirovanie nachal'nogo raspredeleniya komponentov plazmy na fazovoy ploskosti v metode krupnykh chastits pri elektrodugovom sinteze CNS [Formation of the initial distribution of plasma components on the phase plane of large particles method in electric arc synthesis CNS]. *Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies* 3(61):67–71.
7. Belotserkovskiy, O. M., and Yu. M. Davydov. 1982. *Metod krupnykh chastits v gazovoy dinamike. Vychislitel'nyy eksperiment* [The method of large particles in gas dynamics. The computational experiment]. Moscow: Nauka, Fizmatgiz, 392 p.
8. Farber, R. 2011. *CUDA application design and development*. Waltham, MA: Morgan Kaufmann. 336 p.
9. Abramov, G. V., A. N. Gavrilov, I. S. Tolstova, and A. L. Ivashin. 2017. Formation of clusters of carbon structures in plasma under thermal destruction of graphite. *Nanotechnologies in Russia* 12(3):139–146.
10. Abramov, G. V., and A. N. Gavrilov. 2016. Avtomatizirovannaya sistema upravleniya sintezom uglerodnykh nanostruktur v plazme dugovogo razryada [Automatic control system of the carbon nanostructures synthesis in the arc discharge plasma]. *Avtomatizatsiya. Sovremennye tekhnologii* [Automation. Modern Technology] 3:10–14.

Received December 13, 2017

Contributors

Abramov Gennady V. (b. 1960) — Doctor of Science in technology, professor, Voronezh State University, 1 University Sq., Voronezh 394018, Russian Federation; agwl@yandex.ru

Gavrilov Alexander N. (b. 1965) — Candidate of Science (PhD) in technology, associate professor, Voronezh State University of Engineering Technologies, 19 Revolution Av., Voronezh 394036, Russian Federation; ganivrn@yandex.ru

МЕТОДОЛОГИЯ ОБРАТИМОЙ ГЕНЕРАЛИЗАЦИИ В КОНТЕКСТЕ КЛАССИФИКАЦИИ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТРАНСФОРМАЦИЙ*

*И. М. Зацман*¹

Аннотация: Предлагается подход к постановке проблемы создания методологии обратимой генерализации информационных объектов (ОГИО) как процессов их конкретно-абстрактных трансформаций. С теоретической точки зрения описание процессов генерализации информационных объектов (ИО) позволяет обогатить классификацию информационных трансформаций в предметной области информатики за счет включения в нее класса конкретно-абстрактных трансформаций. При этом важно подчеркнуть, что в статье информатика трактуется согласно научной парадигме Пола Розенблюма как комплекс научных дисциплин, изучающих информационные трансформации в технических, живых и социальных системах, а не только в компьютерах и сетях. С прикладной точки зрения описание процессов генерализации в парадигме Розенблюма обогащает основы разработки информационных и управляющих систем, реализующих конкретно-абстрактные трансформации. Описание постановки проблемы создания методологии ОГИО иллюстрируется процессами генерализации двуязычных аннотаций в надкорпусных базах данных (НБД). Обратимость процессов их генерализации является основой многоаспектного и верифицируемого статистического анализа массивов аннотаций, формируемых в НБД.

Ключевые слова: надкорпусная база данных; генерализация информационных объектов; информационные трансформации; класс конкретно-абстрактных трансформаций; генерализация аннотаций

DOI: 10.14357/08696527180210

1 Введение

Термин «генерализация» трактуется здесь как обозначение многоуровневых переходов в базах данных, информационных и управляющих системах от конкретных или частных ИО к более общим (абстрактным) ИО согласно явно сформулированным целям использования этих систем. В статье процессы генерализации будут иллюстрироваться примерами обобщения нескольких тысяч

* Исследование выполнено в ФИЦ ИУ РАН за счет гранта Российского научного фонда (проект 16-18-10004).

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

Таблица 1 Две русско-французские аннотации

Исходный текст	Рубрики, присвоенные исходному тексту	Перевод текста	Рубрики, присвоенные переводу
1	2	3	4
Когда бываю в таком состоянии, то становлюсь нахальным и наглым до крайности. (Чехов. Дядя Ваня)	когда то { временные } { CNT } { CNT p CNT q } { дистант }	Quand je suis dans cet état, je deviens insolent et cynique à l'extrême.	quand { временные } { с предикацией } { начальная } { CNT q p } { CNT }
Туфли на нем были длинные, мягкие и широкие; когда он, не глядя, опускал ноги с постели на пол, то непременно попадал в них сразу. (Гончаров. Обломов)	когда то { временные } { CNT } { CNT p CNT q } { дистант }	Ses pantoufles étaient longues, moelleuses et larges; lorsqu' il sortait de son lit, ses pieds, sans même qu'il les regardât, s'y glissaient tout seuls...	lorsque { временные } { с предикацией } { начальная } { CNT q p } { CNT }

двухязычных аннотаций, сформированных в НБД (см. две аннотации в табл. 1). Многоуровневые переходы от тысяч аннотаций к моделям перевода как более общим ИО будут рассмотрены в следующем разделе. Поля двухязычных аннотаций как конкретных ИО были описаны в работе [1].

Одна из целей генерализации аннотаций в НБД заключается в обеспечении целенаправленной генерации лингвистических знаний о частотности разных вариантов перевода языковых единиц для широкого спектра их категорий (глаголы, коннекторы, дискурсивные слова и т. д.) [2–8]. В начале этой статьи была предложена трактовка термина «генерализация», анализ которой будет приведен ниже. Здесь отметим, что аналогичные переходы от конкретного или частного объекта к более общему присутствуют не только в системах и средствах информатики и изучаются не только в информационно-компьютерных науках.

Согласно О. Ю. Иньковой, «понятия, выражаемые словами *генерализация, обобщение, обобщать, вообще* и подобными, являются фундаментальными для рационального мышления, да и мышления в целом. Они лежат в основе любого знания {...}, так как генерализация, или обобщение, — один из методов познания, позволяющий человеку формулировать закономерности в развитии мира и общества и моделировать свое поведение. Это область, где взаимодействуют конкретное и абстрактное, т. е. частный случай и пример, с одной стороны, и принципы или закономерности, которые распространяются на большое количество частных случаев. {...} Термин «генерализация» используется в лингвистике для определения трех разных понятий, более или менее связанных между собой:

- (1) генерализация как логико-семантическое отношение между высказываниями в тексте;
- (2) абсолютная генерализация (для наименования свойства некоторых высказываний распространяться на класс предметов или явлений);
- (3) генерализация как способ представления действительности (говорящий при помощи данного высказывания представляет ситуацию, абстрагируясь от деталей)» [9].

Для данной статьи, описывающей процессы генерализации и постановку проблемы создания методологии ОГИО, наиболее близко первое из трех перечисленных понятий, когда «речь может идти о логической операции, посредством которой в общей динамике текста и в определенных семантических условиях осуществляется переход от более частного к более общему, а также о логико-семантическом отношении, основанном на этой операции. {...} Но под генерализацией можно понимать также и результат этой операции: высказывание, содержащее обобщение» [9]¹.

В следующем разделе статьи это определение термина «генерализация» в лингвистике сравнивается с предложенным в начале статьи и на основе сопоставления формулируются основные положения предлагаемого подхода к постановке проблемы создания методологии ОГИО, описывающей свойства конкретно-абстрактных трансформаций ИО. Третий раздел посвящен позиционированию создаваемой методологии ОГИО по отношению к классификации информационных трансформаций в информатике в контексте ее становления как фундаментальной науки о компьютеринге. Затем следует заключение.

2 Предлагаемый подход к постановке проблемы

Если сравнить определение первого понятия «генерализация» из работы [9] с предлагаемым определением этого термина в начале данной статьи, то можно отметить три отличия. Во-первых, явно говорится о *многоуровневых* переходах в базах данных, информационных и управляющих системах. Во-вторых, говорится о переходах от конкретных ИО к более *общим* ИО. Здесь под множественным числом слова «*общим*» подразумевается, что на основе одного и того же множества конкретных ИО может быть получен не один, а несколько разных вариантов более общих ИО, полученных на разных основаниях генерализации. И, наконец, в-третьих, говорится о явно сформулированных целях использования информационных и управляющих систем. Для автора статьи остается

¹В статье приведен следующий пример: «Когда прогулки были днем, там сидела высокая блондинка. Она нам казалась красавицей. Впрочем, все женщины тогда нам казались красавицами — машинистка или секретарша. [Ю. О. Домбровский. Факультет ненужных вещей (1978)]. Здесь переход от p_1 (Она нам казалась красавицей) к p_2 (все женщины тогда нам казались красавицами) отражает логическую операцию генерализации, на которой основано отношение генерализации между p_1 и p_2 ; наконец, само p_2 есть генерализация, т. е. результат логической операции» [9].

Таблица 2 Модели перевода **когда||то** и их частотности

Слова в оригинальном тексте на русском языке	Перевод на французский язык	Число профессио- нальных переводов	Число машинных переводов	Всего профессио- нальных и машинных переводов	Доля профессио- нальных и машинных переводов (от 154 анно- таций), %
1	2	3	4	5	6
когда то	quand	28	70	98	63,64
	quand alors	2	17	19	12,34
	lorsque	12	4	16	10,39
	другие 16 вариантов перевода	18	3	21	13,63
	19 вариантов перевода	60	94	154	100

открытым вопрос о том, насколько перечисленные три отличия важны для лингвистических исследований. Важность каждого из них для информатики рассмотрим на примерах.

Многоуровневые переходы в базах данных, информационных и управляющих системах от конкретных ИО к более общим ИО проиллюстрируем, используя примеры процессов генерализации двуязычных аннотаций, сформированных в НБД, из работы [1], а также табл. 1. На первом уровне генерализации аннотаций, построенных в НБД для двух слов **когда||то** (между словами *когда* и *то* есть текст, что обозначено как «||») и их перевода французским словом **quand**, результатом генерализации является модель перевода, которую обозначим как $\langle \mathbf{R}\text{-когда||то}; \mathbf{F}\text{-quand} \rangle$, где **R** обозначает русский язык, а **F** — французский (примеры аннотаций как конкретных ИО см. в табл. 1).

По состоянию на 1 марта 2018 г. в НБД было сформировано 154 двуязычных аннотации с **когда||то** и любыми переводами, а не только французским словом **quand** (60 для профессиональных и 94 для машинных переводов). Всего на этот момент времени модель перевода $\langle \mathbf{R}\text{-когда||то}; \mathbf{F}\text{-quand} \rangle$ встречалась в НБД 98 раз, включая 28 раз в профессиональных переводах. Первые три наиболее частотные модели перевода **когда||то** на французский язык приведены в табл. 2¹.

Если результатом перевода является **lorsque**, то результатом генерализации аннотаций с **когда||то** является модель перевода $\langle \mathbf{R}\text{-когда||то}; \mathbf{F}\text{-lorsque} \rangle$,

¹Если сравнить табл. 2 с аналогичной табл. 4 из работы [1], составленной годом раньше, то видно, что в течение этого года были сформированы новые аннотации только для машинных переводов.

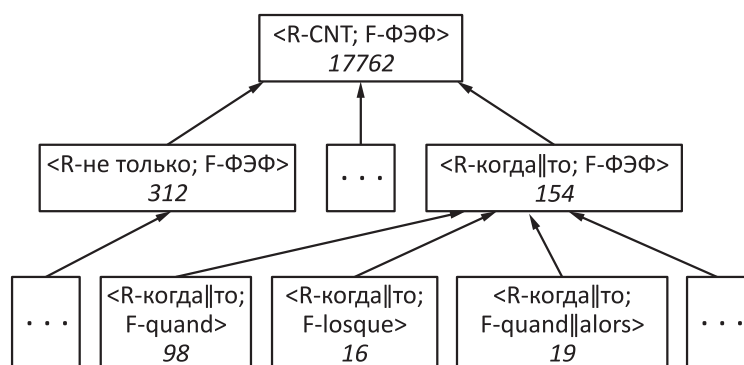
а для **quand||alors** — модель перевода $\langle \mathbf{R-когда||то}; \mathbf{F-quand||alors} \rangle$. Кроме трех рассмотренных (**quand**, **lorsque** и **quand||alors**) в НБД зарегистрированы еще 4 низкочастотных и 12 единичных переводов **когда||то**. Всего для **когда||то** зарегистрировано 19 моделей перевода. На модели с низкочастотными и единичными переводами приходится чуть более 13,6% аннотаций (см. табл. 2), включая случай, когда перевод отсутствует.

Таким образом, результатом первого этапа для этого примера генерализации является множество моделей перевода с конкретной языковой единицей в левой части аннотации и разными переводами в правой части. В НБД эти модели являются обобщенным (генерализованным) представлением знаний о вариантах перевода некоторой языковой единицы, т. е. вне зависимости от контекста, в котором эта языковая единица употребляется.

Рассмотренные модели перевода относятся к *первому уровню генерализации* аннотаций. Отметим, что в НБД генерализация аннотаций является обратной: так, все числа в третьем, четвертом и пятом столбцах табл. 2 в НБД являются гиперссылками на соответствующие списки аннотаций. Использование подобных ссылок обеспечивает возможность обратного перехода от моделей перевода к соответствующим им аннотациям. Число 28, приведенное в табл. 2, в НБД является гиперссылкой к списку из 28 аннотаций для модели перевода $\langle \mathbf{R-когда||то}; \mathbf{F-quand} \rangle$. Две из них приведены в табл. 3. Таким образом, на примере НБД коннекторов можно наглядно проследить первый этап *обратной генерализации* (т. е. перехода сначала от уникальных аннотаций к моделям перевода и потом обратно от них к аннотациям).

Таблица 3 Две аннотации для модели $\langle \mathbf{R-когда||то}; \mathbf{F-quand} \rangle$

Исходный текст	Рубрики, присвоенные исходному тексту	Перевод текста	Рубрики, присвоенные переводу
1	2	3	4
<i>Зато, когда он случайно его находил, то бывало по целым часам не выпускал уж из своих рук. (Пушкин. Капитанская дочка)</i>	когда то $\langle$ временные $\rangle$ $\langle$ CNT p CNT q $\rangle$ $\langle$ SubCNT $\rangle$ $\langle$ дистант $\rangle$	<i>En revanche, quand il lui arrivait de le trouver, il ne le lâchait plus durant des heures entières.</i>	quand $\langle$ временные $\rangle$ $\langle$ с предикацией $\rangle$ $\langle$ начальная $\rangle$ $\langle$ CNT q p $\rangle$ $\langle$ SubCNT $\rangle$
<i>Когда судьба тебя не полюбила, то не спасешься. (Алексиевич. Время секунд хэнд)</i>	когда то $\langle$ условные $\rangle$ $\langle$ CNT p CNT q $\rangle$ $\langle$ CNT $\rangle$ $\langle$ дистант $\rangle$	<i>Quand le destin a une dent contre toi, y a rien à faire.</i>	quand $\langle$ условные $\rangle$ $\langle$ с предикацией $\rangle$ $\langle$ начальная $\rangle$ $\langle$ CNT q p $\rangle$ $\langle$ CNT $\rangle$



Первые три уровня обратимой генерализации аннотаций в НБД

Рассмотрим кратко второй уровень *обратимой генерализации*, используемой в НБД. Результат второго этапа генерализации, т. е. обобщения 19 моделей перевода с **когда||то**, обозначим как более абстрактную модель перевода в виде кортежа **<R-когда||то; F-ФЭФ>**, где F-ФЭФ — это любой функционально эквивалентный фрагмент перевода на французский язык **когда||то**. Как отмечалось выше, на 1 марта 2018 г. было 154 двуязычных аннотации с любыми переводами. Это число в НБД также является ссылкой на список всех 154 аннотаций с **когда||то** и любым переводом.

Аналогично можно описать третий уровень генерализации, вводя обозначение модели перевода в виде кортежа **<R-CNT; F-ФЭФ>**, где R-CNT — любые коннекторы русского языка (*а именно, вот только что||и вот, добро бы||а то, если бы||тогда, когда||то, не только* и т. д.), описанные в НБД, а F-ФЭФ — любые их переводы на французский язык, для которых в НБД сформированы аннотации. В работе [10] описаны 29 моделей перевода еще одного коннектора — **не только**. Их описания получены в результате анализа 312 русско-французских аннотаций, сформированных в НБД. На 1 марта 2018 г. было сформировано 17 762 двуязычных аннотации для коннекторов и соответствующих им моделей перевода **<R-CNT; F-ФЭФ>**. Это число в НБД также является гиперссылкой на список, включающий все 17 762 аннотации. Рисунок иллюстрирует схематически три рассмотренных уровня генерализации.

Еще два уровня генерализации аннотаций рассмотрены в работе [1]. Однако для иллюстрации значения экспликации многоуровневых переходов в базах данных, других системах и средствах информатики от конкретных ИО к более общим ИО вполне достаточно первых трех рассмотренных уровней генерализации.

Кроме свойства многоуровневости генерализации приведенные примеры иллюстрируют и еще одно важное свойство, описание которого предлагается включить в создаваемую методологию ОГИО, — это обратимость генерализации. В примерах рассмотрен наиболее простой случай, который будем называть

аддитивной генерализацией, когда происходит суммирование чисел, говорящих о количестве конкретных ИО. В создаваемой методологии планируется описать и неаддитивные случаи генерализации, в которых количественные отношения между конкретными и абстрактными ИО являются *неаддитивными*.

Кратко остановимся на двух других отличиях определения термина «генерализация», приведенного в начале статьи:

- множественное число слова *общим*, т. е. подразумевается, что на основе одного и того же множества конкретных ИО может быть получен не один, а несколько разных абстрактных ИО;
- явно сформулированные цели использования информационных и управляющих систем, в которых реализованы процессы генерализации.

Возможность формирования нескольких абстрактных ИО была рассмотрена в работе [1] на следующем примере. Рубрики, перечисленные во втором и четвертом столбцах аннотаций (см. табл. 1 и 3), также могут использоваться в процессе генерализации. При этом у пользователя НБД есть возможность выбирать разные рубрики при генерализации в зависимости от цели его исследования. От выбора цели и связанных с ней рубрик зависит результат создания того или иного абстрактного ИО в процессе генерализации.

Отметим, что возможность получения разных абстрактных ИО в процессе генерализации была описана еще в 1979 г. основателем теории реляционных баз данных Эдгаром Коддом [11]. Проиллюстрируем эту возможность, реализованную в НБД, на примерах рубрик аннотаций. Сначала рассмотрим случай, когда целью пользователя НБД является исследование видов логико-семантических отношений в тексте (временные, условные, причинно-следственные и др.). В первом примере коннектор **когда||то** выражает временные отношения (обозначим рубрику «временные» из табл. 3 кратко как *temp*), а во втором — условные (обозначим рубрику «условные» как *cond*). Отметим, что рубрики *temp* и *cond* относятся к одному фасету описания отношений, выражаемых коннекторами, который в НБД обозначен словом «Отношения». Описание разных классификационных схем логико-семантических отношений и соответствующих им рубрик можно найти в [12–16].

Введем обозначение модели перевода в виде кортежа $\langle \mathbf{R}\text{-когда}||\mathbf{то} / \text{temp}; \mathbf{F}\text{-ФЭФ} \rangle$ как частный случай более общего кортежа $\langle \mathbf{R}\text{-когда}||\mathbf{то}; \mathbf{F}\text{-ФЭФ} \rangle$. Частный случай $\langle \mathbf{R}\text{-когда}||\mathbf{то} / \text{temp}; \mathbf{F}\text{-ФЭФ} \rangle$ соответствует только тем моделям перевода, в которых коннектор **когда||то** выражает временные отношения. Эта модель встречается в 47 аннотациях (см. табл. 6 в [1]), сформированных для профессиональных переводов (на рис. 1 в [1] они пронумерованы А1–А47). Аналогично введем $\langle \mathbf{R}\text{-когда}||\mathbf{то} / \text{cond}; \mathbf{F}\text{-ФЭФ} \rangle$ для условных отношений (встречается в 11 аннотациях, они пронумерованы на рис. 1 в [1] как А48–А58) и $\langle \mathbf{R}\text{-когда}||\mathbf{то} / \text{cause}; \mathbf{F}\text{-ФЭФ} \rangle$ для причинно-следственных отношений (2 аннотации А59 и А60 на рис. 1 в [1]). Тогда результатом первого уровня генерализации будут три абстрактных ИО.

Рассмотрим другой вариант генерализации, когда целью пользователя НБД является исследование не видов логико-семантических отношений в тексте, а свойство встроенности коннекторов. Для этого исследования используются рубрики другого фасета, который в НБД обозначен словом «Статус». В табл. 3 используются две рубрики этого фасета: $\langle \text{SubCNT} \rangle$ для встроенных коннекторов (**когда**||**то** попадает в сферу действия коннектора **зато**) и $\langle \text{CNT} \rangle$ для невстроенных коннекторов¹. Эти рубрики далее в кортежах будем обозначать без угловых скобок.

Введем обозначение $\langle \mathbf{R-когда}||\mathbf{то} / \text{SubCNT}; \mathbf{F-ФЭФ} \rangle$ как частный случай более общего кортежа $\langle \mathbf{R-когда}||\mathbf{то}; \mathbf{F-ФЭФ} \rangle$. Этот кортеж соответствует только тем случаям, в которых коннектор **когда**||**то** является встроенным. Эти частные случаи встречаются в 36 аннотациях, сформированных для профессиональных переводов (на рис. 2 в [1] они пронумерованы А1–А36). Аналогично введем обозначение $\langle \mathbf{R-когда}||\mathbf{то} / \text{CNT}; \mathbf{F-ФЭФ} \rangle$ для невстроенных коннекторов (встречается в 24 аннотациях, они пронумерованы как А37–А60 на рис. 2 в [1]). Тогда результатом первого уровня генерализации будут два абстрактных ИО.

В НБД все варианты генерализации аннотаций являются обратимыми. Каждое из пяти чисел (47, 11 и 2 для фасета «Отношения» и 36 и 24 для фасета «Статус»), полученных в результате поиска аннотаций с коннектором **когда**||**то** и одной из пяти рубрик (temp, cond, cause, SubCNT и CNT), является ссылкой на соответствующий список аннотаций. Таким образом, результаты такого поиска обеспечивают возможность обратных переходов от рассмотренных пяти моделей перевода $\langle \mathbf{R-когда}||\mathbf{то} / \text{temp}; \mathbf{F-ФЭФ} \rangle$, $\langle \mathbf{R-когда}||\mathbf{то} / \text{cond}; \mathbf{F-ФЭФ} \rangle$, $\langle \mathbf{R-когда}||\mathbf{то} / \text{cause}; \mathbf{F-ФЭФ} \rangle$, $\langle \mathbf{R-когда}||\mathbf{то} / \text{SubCNT}; \mathbf{F-ФЭФ} \rangle$ и $\langle \mathbf{R-когда}||\mathbf{то} / \text{CNT}; \mathbf{F-ФЭФ} \rangle$ к спискам аннотаций с **когда**||**то** и рубриками temp (47 аннотаций), cond (11), cause (2), SubCNT (36) и CNT (24) соответственно.

Используя рассмотренные примеры, можно предложить следующий подход к постановке обозначенной в начале статьи проблемы: создание методологии описания процессов переходов в базах данных, информационных и управляющих системах от конкретных ИО к более общим ИО, обладающей следующими пятью свойствами:

- (1) многоуровневость переходов;
- (2) отношения между конкретными и абстрактными ИО могут быть как аддитивными, так и неаддитивными;
- (3) обратимость переходов;
- (4) вариантность результата генерализации на любом уровне обобщения, обусловленная разными ее основаниями;
- (5) явно сформулированные цели генерализации ИО в информационных и управляющих системах, в которых наблюдается генерализация.

¹ В работе [1] невстроенные коннекторы были обозначены как [-]SubCNT.

Два последних свойства в общем случае не являются независимыми, так как изменение цели генерализации может стать причиной генерации новых вариантов абстрактных ИО.

3 Об одном классе информационных трансформаций

Прежде чем описать предлагаемое позиционирование методологии ОГИО в информатике, необходимо сказать несколько слов о той ее парадигме, в рамках которой предлагается рассмотреть этот вопрос. Известны как минимум четыре ее парадигмы и четыре англоязычных термина, которыми переводится слово «информатика» и которые соответствуют этим парадигмам: *computer science*, *information science*, *computational science* и *computing*. В статье слово «информатика» используется в четвертом значении (*computing*), что соответствует научной парадигме, предложенной Полом Розенблумом [17, 18] (далее — R-парадигма). Этот выбор мотивирован тем, что R-парадигма имеет наиболее широкую предметную область из четырех перечисленных.

Согласно Розенблуму, трактовка информатики как обширной научной отрасли, охватывающей целый спектр научных дисциплин, их переплетения и мультидисциплинарность, дает возможность увидеть более полно предметную область исследований в информатике как компьютеринге. Представление об информатике только как об аппаратном и программном обеспечении, математике, инструментальных средствах и технологиях устарело. Информатика охватывает все те дисциплины, которые способствуют пониманию и разработке процессов информационных трансформаций, включая компьютерную науку и проектирование систем информатики, информационную науку и информационно-коммуникационные технологии, отраслевые информатики (*био-, гео-, социальная и другие информатики* — *добавлено мной. ИЗ*) и вычислительную науку, а также математику¹.

Приведенное изложение трактовки информатики как обширной научной отрасли дает первое представление о ее предметной области. Отметим, что границы ее предметной области будут во многом определяться смысловым содержанием используемого термина «информационные трансформации». Согласно Розенблуму, общий мотив, проходящий через большинство работ на эту тему [19–23], неявно или явно заключается в том, что объектом исследований в информатике как компьютеринге являются информационные трансформации. Это может быть названо, например, обработкой информации или просто информацией

¹With computing raised to the status of a great scientific domain and the resulting embrace of both intertwining and multidisciplinary, the full scope of the computing sciences can finally be appreciated. Thinking of it as only hardware, software, mathematics, tools, engineering, or whatever could not be further off the mark. It spans all of the fields that contribute to the understanding and shaping of information transformation, including computer science and engineering, information science and technology, informatics and computational science, and mathematics [17, p. 254].

и вычислением, где подразумеваются процессы информационных трансформаций. Отличия в перечисленных работах касаются разных акцентов, которые ставятся либо на самом процессе трансформации, либо на ее абстрактной спецификации (т. е. на алгоритмах), либо на конкретном аппаратном и программном обеспечении трансформаций, либо на сохранении информации, либо на ее денотационных аспектах. Но независимо от того, как информационные трансформации акцентируются, именно они лежат в основе всей информатики как компьютеринга и, таким образом, должны являться объектом исследований в информатике¹.

Положение о том, что именно информационные трансформации должны являться объектом исследований в информатике, является ключевой идеей R-парадигмы. При этом важно отметить, что в настоящее время сформулировано несколько ее ключевых идей, но описание R-парадигмы в целом еще весьма далеко от завершенности.

Отметим, что, согласно А. Соломонику, научная парадигма «зрелой» науки состоит из следующих четырех составляющих, которые могут разрабатываться отдельно, но объединяются в единую и цельную конструкцию [24, с. 23 и 24]:

- (1) философские основания;
- (2) аксиоматика;
- (3) классификация исследуемых объектов, процессов и явлений;
- (4) система терминов.

Сам термин «научная парадигма» трактуется Соломоником в соответствии с теорией Т. Куна [25]. При этом он отмечает, что в книге Куна мы не находим ответа на вопрос: «Из чего должна состоять парадигма любой «зрелой» науки?» [24, с. 23].

С точки зрения подхода Соломоника к описанию научных парадигм, методология ОГИО помогает заполнить одно из белых пятен в третьей составляющей R-парадигмы, а именно: она описывает класс процессов конкретно-абстрактных трансформаций ИО. Другими словами, в будущую классификацию информационных трансформаций как основного объекта исследований в предметной области информатики методология ОГИО вносит свой вклад в части концептуального описания свойств класса конкретно-абстрактных трансформаций ИО.

¹The common motif running through most of these and the earlier definitions, either implicitly or explicitly, is that computing involves the transformation of information. This can be expressed alternatively as information processing or simply referred to as information and computation, where computation is understood to be the process of transforming information. The particular focus in any individual definition may be on the fact that transformation is occurring, or on the abstract specification of transformations (i. e., algorithms) or on the concrete hardware and software that enable the transformations to occur in the physical world, or on the maintenance of information, or on its denotational aspects. But, no matter how this motif is modulated, it sits at the core of all of computing and thus should serve us well as a definition of the subject matter of computing [17, p. 8].

4 Заключение

Актуальность создаваемой методологии ОГИО имеет две стороны: теоретическую и прикладную. С теоретической точки зрения ее описание может внести существенный вклад в развитие R-парадигмы информатики за счет включения в классификацию информационных трансформаций всего класса процессов конкретно-абстрактных трансформаций ИО и описания их свойств. При этом важно подчеркнуть, что согласно R-парадигме информатика изучает информационные трансформации в технических, живых и социальных системах, а не только в компьютерах и сетях, на основе концептуально единого подхода [17, 18, 26–29].

С прикладной точки зрения методология ОГИО обогащает основы разработки информационных и управляющих систем в части единого подхода к описанию всего класса конкретно-абстрактных информационных трансформаций. Этот подход интегрирует и существенно расширяет спектр уже существующих практических приемов и методов программирования, широко используемых при разработке средств, систем и технологий генерализации ИО.

Современное состояние методологии ОГИО можно охарактеризовать как этап постановки проблемы ее создания и формирования подхода к решению этой проблемы. Потребность в ней обусловлена необходимостью и актуальностью приведения в соответствие теоретических основ разработки информационных и управляющих систем в части создания единого подхода к описанию конкретно-абстрактных информационных трансформаций, с одной стороны, современной R-парадигме описания предметной области информатики как компьютеринга, с другой стороны, растущим потребностям онлайн-верификации автоматически сгенерированных этими системами статистических данных, например при решении задач извлечения новых знаний [2–4, 30–32]. В заключение отметим, что R-парадигма по своему подходу существенно развивает идеи Горна и Шрейдера [33–35] о необходимости концептуально единого описания всего спектра информационных и компьютерных наук.

Литература

1. Зацман И. М., Мамонова О. С., Щурова А. Ю. Обратимость и альтернативность генерализации моделей перевода коннекторов в параллельных текстах // Системы и средства информатики, 2017. Т. 27. № 2. С. 125–142.
2. Zatsman I., Buntman N., Kruzikov M., Nuriev V., Zalizniak Anna A. Conceptual framework for development of computer technology supporting cross-linguistic knowledge discovery // 15th European Conference on Knowledge Management Proceedings. — Reading: Academic Publishing International Ltd., 2014. Vol. 3. P. 1063–1071.
3. Zatsman I., Buntman N. Outlining goals for discovering new knowledge and computerised tracing of emerging meanings discovery // 16th European Conference on Knowledge Management Proceedings. — Reading: Academic Publishing International Ltd., 2015. P. 851–860.

4. *Zatsman I., Buntman N., Coldefy-Faucard A., Nuriev V.* WEB knowledge base for asynchronous brainstorming // 17th European Conference on Knowledge Management Proceedings. — Reading: Academic Publishing International Ltd., 2016. P. 976–983.
5. *Инькова О. Ю., Манзотти Э.* Tra l'altro, между прочим, entre autres: сходства и различия // Съпоставително езикознание, 2017. Т. 42. № 4. С. 35–47.
6. *Кобозева И. М.* Коннекторы контактного предшествования в русском и французском языках в зеркале надкорпусной базы данных // Съпоставително езикознание, 2017. Т. 42. № 4. С. 48–62.
7. *Нуриев В. А.* Коннектор раз ... то и модели его перевода на французский язык: между условием, причиной и следствием // Съпоставително езикознание, 2017. Т. 42. № 4. С. 63–76.
8. *Buntman N.* Le mot “tut”: Une étude contrastive // Съпоставително езикознание, 2017. Т. 42. № 4. С. 118–131.
9. *Инькова О. Ю.* Генерализация: определение, текстовые функции, показатели (на материале русского, французского и итальянского языков) // Вопросы языкознания, 2017. № 3. С. 53–82.
10. *Зацман И. М., Кружков М. Г., Лоцилова Е. Ю.* Методы анализа частотности моделей перевода коннекторов и обратимость генерализации статистических данных // Системы и средства информатики, 2017. Т. 27. № 4. С. 164–176.
11. *Codd E. F.* Extending the database relational model to capture more meaning // ACM T. Database Syst., 1979. Vol. 4. No. 4. P. 397–434.
12. *Prasad R., Dinesh N., Lee A., Miltsakaki E., Robaldo L., Joshi A., Webber B.* The Penn Discourse TreeBank 2.0 // 6th Conference (International) on language Resources and Evaluation Proceedings. — Paris: European Language Resources Association (ELRA), 2008. P. 2961–2968.
13. *Zufferey S., Degand L.* Annotating the meaning of discourse connectives in multilingual corpora // Corpus Linguist. Ling. Vol. 13. Iss. 2. P. 399–422. <https://www.degruyter.com/downloadpdf/j/cllt.2017.13.issue-2/cllt-2013-0022/cllt-2013-0022.pdf>.
14. *Prasad R., Bunt H.* Semantic relations in discourse: The current state of ISO 24617-8 // 11th Joint ACL-ISO Workshop on Interoperable Semantic Annotation Proceedings. — Tilburg: Tilburg University, 2015. P. 80–92.
15. *Bunt H., Prasad R.* ISO-DR-Core (ISO 24617-8): Core concepts for the annotation of discourse relations // 12th Joint ACL-ISO Workshop on Interoperable Semantic Annotation Proceedings, 2016. P. 45–54. <http://www.lrec-conf.org/proceedings/lrec2016/LREC2016.Proceedings.zip>.
16. *Зацман И. М., Инькова О. Ю., Нуриев В. А.* Построение классификационных схем: методы и технологии экспертного формирования // Научно-техническая информация. Сер. 2, 2017. № 1. С. 8–22.
17. *Rosenbloom P.* On computing: The fourth great scientific domain. — Cambridge, MA, USA: MIT Press, 2013. 307 p.
18. *Rosenbloom P.* The computing sciences and STEM education // The Science in Computer Science: Proceedings of Ubiquity Symposium, 2014. <http://ubiquity.acm.org/article.cfm?id=2590530>.
19. *Denning P. J.* Opening statement // Ubiquity Symposium «What is computation?» Proceedings, 2010. <https://ubiquity.acm.org/article.cfm?id=1880067>.

20. *Conery J. S.* Computation is symbol manipulation // Ubiquity Symposium “What is computation?” Proceedings, 2010. <https://ubiquity.acm.org/article.cfm?id=1889839>.
21. *Frailey D. J.* Computation is process // Ubiquity Symposium “What is computation?” Proceedings, 2010. <https://ubiquity.acm.org/article.cfm?id=1891341>.
22. *Rosenbloom P. S.* Computing and computation // Ubiquity Symposium “What is computation?” Proceedings, 2010. <https://ubiquity.acm.org/article.cfm?id=1897729>.
23. *Bajcsy R.* Computation and information // Ubiquity Symposium “What is computation?” Proceedings, 2010. <https://ubiquity.acm.org/article.cfm?id=1899473>.
24. *Соломоник А.* Парадигма семиотики. — Минск: МЕТ, 2006. 335 с.
25. *Кун Т.* Структура научных революций. — М.: Прогресс, 1977. 302 с.
26. *Denning P. J.* Computing is a natural science // Commun. ACM, 2007. Vol. 50. No. 7. P. 13–18.
27. *Denning P., Rosenbloom P.* Computing: The fourth great domain of science // Commun. ACM, 2009. Vol. 52. No. 9. P. 27–29.
28. *Denning P., Freeman P.* Computing’s paradigm // Commun. ACM, 2009. Vol. 52. No. 12. P. 28–30.
29. *Denning P. J.* The science in computer science // Commun. ACM, 2013. Vol. 56. No. 5. P. 35–38.
30. *Zatsman I.* Tracing emerging meanings by computer: Semiotic framework // 13th European Conference on Knowledge Management Proceedings. — Reading: Academic Publishing International Ltd., 2012. Vol. 2. P. 1298–1307.
31. *Зацман И. М.* Процессы целенаправленной генерации и развития кроссязыковых экспертных знаний: семиотические основания моделирования // Информатика и её применения, 2015. Т. 9. Вып. 3. С. 106–123.
32. *Inkova O., Popkova N.* Statistical data as information source for linguistic analysis of Russian connectors // Информатика и её применения, 2017. Т. 11. Вып. 3. С. 123–131.
33. *Gorn S.* The computer and information sciences: A new basic discipline // SIAM Rev., 1963. Vol. 5. No. 2. P. 150–155.
34. *Gorn S.* Informatics (computer and information science): Its ideology, methodology, and sociology // The studies of information: Interdisciplinary messages / Eds. F. Machlup, U. Mansfield. — New York, NY, USA: Wiley, 1983. P. 121–140.
35. *Шрейдер Ю. А.* Информация и знание // Системная концепция информационных процессов. — М.: ВНИИСИ, 1988. С. 47–52.

Поступила в редакцию 11.03.18

METHODOLOGY OF REVERSIBLE GENERALIZATION IN CONTEXT OF CLASSIFICATION OF INFORMATION TRANSFORMATIONS

I. M. Zatsman

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

Abstract: An approach to the problem of creating a methodology for the reversible generalization of information objects (RGIO) as the processes of their concrete-abstract transformations is proposed. From the theoretical point of view, the description of the processes of generalization of information objects makes it possible to enrich the classification of information transformations in the domain of informatics by including a class of concrete-abstract transformations into it. It is important to emphasize that in the paper, informatics is treated according to the scientific paradigm of Paul Rosenbloom as a complex of scientific disciplines that studies information transformations in technical, living, and social systems, and not just in computers and networks. From the applied point of view, the description of generalization processes in the Rosenbloom paradigm enriches the foundations of developing information systems that implement concrete-abstract transformations. The description of the problem of creating the RGIO-methodology is illustrated by the processes of generalization of bilingual annotations in a supracorpora database (SCDB). The reversibility of the processes of annotation generalization is the basis for a multifaceted and verifiable statistical analysis of arrays of annotations formed in the SCDB.

Keywords: supracorpora database; generalization of information objects; information transformations; class of concrete-abstract transformations; annotation generalization

DOI: 10.14357/08696527180210

Acknowledgments

The study was performed at the FRC CSC RAS and supported by the Russian Science Foundation (project 16-18-10004).

References

1. Zatsman, I. M., O. S. Mamonova, and A. Yu. Shchurova. 2017. Obratimost' i al'ternativnost' generalizatsii modeley perevoda konnektorov v parallel'nykh tekstakh [Reversibility and alternativeness of generalization of connective translation models in parallel texts]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 27(2):125–142.

2. Zatsman, I., N. Buntman, M. Kruzhkov, V. Nuriev, and Anna A. Zaliziak. 2014. Conceptual framework for development of computer technology supporting cross-linguistic knowledge discovery. *15th European Conference on Knowledge Management Proceedings*. Reading: Academic Publishing International Ltd. 3:1063–1071.
3. Zatsman, I., and N. Buntman. 2015. Outlining goals for discovering new knowledge and computerised tracing of emerging meanings discovery. *16th European Conference on Knowledge Management Proceedings*. Reading: Academic Publishing International Ltd. 851–860.
4. Zatsman, I., N. Buntman, A. Coldefy-Faucard, and V. Nuriev. 2016. WEB knowledge base for asynchronous brainstorming. *17th European Conference on Knowledge Management Proceedings*. Reading: Academic Publishing International Ltd. 976–983.
5. Inkova, O. Yu., and E. Manzotti. 2017. Tra l'altro, mezhdu prochim, entre autres: skhodstva i razlichiya [Tra l'altro, mezhdu prochim [by the way], entre autres: Similarities and differences]. *Contrastive Linguistics* 42(4):35–47.
6. Kobozeva, I. M. 2017. Konnektory kontaktnogo predshestvovaniya v russkom i frantsuzskom yazykakh v zerkale nadkorpornoy bazy dannykh [Connectives of contact precedence in Russian and French in the mirror of supracorpora database]. *Contrastive Linguistics* 42(4):48–62.
7. Nuriev, V. A. 2017. Konnektor raz ... to i modeli ego perevoda na frantsuzskiy yazyk: mezhdu uslovium, prichinoy i sledstviem [Connector raz ... to and models of its translation into French: Between the condition, cause, and effect]. *Contrastive Linguistics* 42(4):63–76.
8. Buntman, N. 2017. Le mot “tut”: Une étude contrastive. *Contrastive Linguistics* 42(4):118–131.
9. Inkova, O. Yu. 2017. Generalizatsiya: opredelenie, tekstovye funktsii, pokazateli (na materiale russkogo, frantsuzskogo i ital'yanskogo yazykov) [Generalization: Definition, text functions, indicators (on the material of Russian, French, and Italian languages)]. *Voprosy yazykoznaniya* [Topics in the Study of Language] 3:53–82.
10. Zatsman, I. M., M. G. Kruzhkov, and E. Ju. Loshchilova. 2017. Metody analiza chastotnosti modeley perevoda konnektorov i obratimost' generalizatsii statisticheskikh dannykh [Methods of frequency analysis of connective translations and reversibility of statistical data generalization]. *Sistemy i Sredstva Informatiki — Systems and Means of Informatics* 27(4):164–176.
11. Codd, E. F. 1979. Extending the database relational model to capture more meaning. *ACM T. Database Syst.* 4(4):397–434.
12. Prasad, R., N. Dinesh, A. Lee, E. Miltsakaki, L. Robaldo, A. Joshi, and B. Webber. 2008. The Penn Discourse TreeBank 2.0. *6th Conference (International) on Language Resources and Evaluation Proceedings*. Paris: European Language Resources Association (ELRA). 2961–2968.
13. Zufferey, S., and L. Degand. 2014. Annotating the meaning of discourse connectives in multilingual corpora. *Corpus Linguist. Ling.* 13(2):399–422. Available at: <https://www.degruyter.com/downloadpdf/j/cllt.2017.13.issue-2/cllt-2013-0022/cllt-2013-0022.pdf> (accessed May 15, 2018).
14. Prasad, R., and H. Bunt. 2015. Semantic relations in discourse: The current state of ISO 24617-8. *11th Joint ACL-ISO Workshop on Interoperable Semantic Annotation Proceedings*. Tilburg: Tilburg University. 80–92.

15. Bunt, H., and R. Prasad. 2016. ISO-DR-Core (ISO 24617-8): Core concepts for the annotation of discourse relations. *12th Joint ACL-ISO Workshop on Interoperable Semantic Annotation Proceedings*. 45–54. Available at: http://www.lrec-conf.org/proceedings/lrec2016/LREC2016_Proceedings.zip (accessed March 9, 2018).
16. Zatsman, I., O. Inkova, and V. Nuriev. 2017. Postroenie klassifikatsionnykh skhem: metody i tekhnologii ekspertnogo formirovaniya [Construction of classification schemes: Methods and technologies of experts' formation]. *Nauchnaya i tekhnicheskaya informatsiya. Ser. 2* [Scientific and Technical Information. Ser. 2] 1:8–22.
17. Rosenbloom, P. S. 2013. *On computing: The fourth great scientific domain*. Cambridge, MA: MIT Press. 307 p.
18. Rosenbloom, P. S. 2014. The computing sciences and STEM education. *Ubiquity Symposium "The Science in Computer Science" Proceedings*. Available at: <http://ubiquity.acm.org/article.cfm?id=2590530> (accessed March 4, 2018).
19. Denning, P. J. 2010. Opening statement. *Ubiquity Symposium "The Science in Computer Science" Proceedings*. Available at: <https://ubiquity.acm.org/article.cfm?id=1880067> (accessed March 10, 2018).
20. Conery, J. S. 2010. Computation is symbol manipulation. *Ubiquity Symposium "The Science in Computer Science" Proceedings*. Available at: <https://ubiquity.acm.org/article.cfm?id=1889839> (accessed March 10, 2018).
21. Frailey, D. J. 2010. Computation is process. *Ubiquity Symposium "The Science in Computer Science" Proceedings*. Available at: <https://ubiquity.acm.org/article.cfm?id=1891341> (accessed March 9, 2018).
22. Rosenbloom, P. S. 2010. Computing and computation. *Ubiquity Symposium "The Science in Computer Science" Proceedings*. Available at: <https://ubiquity.acm.org/article.cfm?id=1897729> (accessed March 10, 2018).
23. Bajcsy, R. 2010. Computation and information. *Ubiquity Symposium "The Science in Computer Science" Proceedings*. Available at: <https://ubiquity.acm.org/article.cfm?id=1899473> (accessed March 10, 2018).
24. Solomonik, A. 2006. *Paradigma semiotiki* [The paradigm of semiotics]. Minsk: MET Pubs. 335 p.
25. Kuhn, T. 1977. *Struktura nauchnykh revolyutsiy* [The structure of scientific revolution]. Moscow: Progress. 302 p.
26. Denning, P. J. 2007. Computing is a natural science. *Commun. ACM* 50(7):13–18.
27. Denning, P., and P. Rosenbloom. 2009. Computing: The fourth great domain of science. *Commun. ACM* 52(9):27–29.
28. Denning, P., and P. Freeman. 2009. Computing's paradigm. *Commun. ACM* 52(12):28–30.
29. Denning, P. 2013. The science in computer science. *Commun. ACM* 56(5):35–38.
30. Zatsman, I. 2012. Tracing emerging meanings by computer: Semiotic framework. *13th European Conference on Knowledge Management Proceedings*. Reading: Academic Publishing International Ltd. 2:1298–1307.
31. Zatsman, I. 2015. Protsessy tselenapravlennoy generatsii i razvitiya krossyazykovykh ekspertnykh znaniy: semioticheskie osnovaniya modelirovaniya [Goal-oriented processes of cross-lingual expert knowledge creation: Semiotic foundations for modeling]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 9(3):106–123.

32. Inkova, O. Yu., and N. A. Popkova. 2017. Statistical data as information source for linguistic analysis of Russian connectors. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 11(3):123–131.
33. Gorn, S. 1963. The computer and information sciences: A new basic discipline. *SIAM Rev.* 5(2):150–155.
34. Gorn, S. 1983. Informatics (computer and information science): Its ideology, methodology, and sociology. *The studies of information: Interdisciplinary messages*. Eds. F. Machlup and U. Mansfield. New York, NY: Wiley. 121–140.
35. Shreyder, Yu. A. Informatsiya i znanie [Information and knowledge]. *Sistemnaya kontseptsiya informatsionnykh protsessov* [System concept of information processes]. Moscow: VNIISI Publs. 47–52.

Received March 11, 2018

Contributor

Zatsman Igor M. (b. 1952) — Doctor of Science in technology, Head of Department, Institute of Informatics Problems, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 44-2 Vavilov Str., Moscow 119333, Russian Federation; izatsman@yandex.ru

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДАННЫХ НА БАЗЕ STANFORD CoreNLP ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЧАСТЕЙ РЕЧИ В РУССКОМ ЯЗЫКЕ

*О. В. Андреева¹, М. Б. Багиров², А. А. Данькина³, Т. О. Федорова⁴,
М. М. Шевелёва⁵*

Аннотация: Рассматриваются основные принципы функционирования библиотеки Stanford CoreNLP для обработки текстовых фрагментов, а также ее реализации на различных естественных языках, таких как английский, испанский и французский. Особенностью модели является взаимодействие отдельных блоков каждого языка благодаря организации взаимосвязанной структуры специализированных пакетов. Более подробно рассмотрены пакеты, которые непосредственно учитывают синтаксические и грамматические особенности внедренных языков. Также были разработаны способы взаимодействия Stanford CoreNLP с текстовыми данными на русском языке. Создана модель, позволяющая определять части речи у текстов на русском языке, повышена эффективность работы модели с текстами технической литературы на русском языке. В качестве результатов приведены тесты, позволяющие судить об эффективности внедренных изменений.

Ключевые слова: обработка информации; интеллектуальный анализ данных; Stanford CoreNLP; анализ естественного языка; POS tagger; определение частей речи; морфологический анализ русского языка

DOI: 10.14357/08696527180211

1 Введение

Stanford CoreNLP предоставляет набор инструментов анализа естественного языка. Основной целью Stanford CoreNLP является легкое применение множества инструментов лингвистического анализа к фрагменту текста. В [1] подробно

¹Нижегородский государственный технический университет им. П. Е. Алексеева, andreevaov@gmail.com

²Нижегородский государственный технический университет им. П. Е. Алексеева, bagirov_mirabbas@mail.ru

³Нижегородский государственный технический университет им. П. Е. Алексеева, dankina.anastasi@mail.ru

⁴Нижегородский государственный технический университет им. П. Е. Алексеева, fedorovatatiana@yandex.ru

⁵Нижегородский государственный технический университет им. П. Е. Алексеева, shevelevamariia@gmail.com

рассматривается описание оригинального дизайна системы, ее сильные стороны, набор представленных аннотаторов и методы осуществления их контроля, а также способы добавления дополнительных аннотаторов. Данная библиотека имеет реализацию на нескольких языках, в число которых русский язык не входит. Главной проблемой является реализация модели, по которой определяются части речи в русском языке, учитывая его синтаксические и морфологические особенности для конкретной области. В [2, 3] исследуется синтаксический анализ и лексикализация в испанском и французском языках.

В данном исследовании проводится оптимизация работы Stanford CoreNLP путем осуществления обучения отдельного компонента Stanford CoreNLP, а именно POS (part-of-speech) tagger, русскому языку и повышения эффективности при работе с узкоспециализированной технической литературой.

Статья структурирована следующим образом. Раздел 2 посвящен анализу структуры Stanford CoreNLP, а также рассмотрению реализации Stanford CoreNLP для испанского и французского языков. В разд. 3 обеспечивается разработка возможности определения частей речи для русского языка и текстов узкоспециализированной технической литературы. В разд. 4 приведены результаты тестирования Stanford CoreNLP POS tagging на узкоспециализированной технической литературе. Заключение содержит выводы и некоторые обобщения.

Исследований в области взаимодействия Stanford CoreNLP с русским языком ранее проводилось мало. Таким образом, актуальной является задача адаптации существующей реализации к обработке текста на русском языке.

2 Концептуальная модель

2.1 Общая структура

Stanford CoreNLP состоит из нескольких блоков, каждый из которых отвечает за свою значимую функцию: токенизацию, разделение последовательности токенов на предложения, определение частей речи, морфологический анализ, распознавание имен и числовых единиц, синтаксический анализ, устранение кореференции, добавление гендерной информации, анализ настроений. В библиотеке уже реализована поддержка арабского, китайского, французского, немецкого и испанского языков. Взаимодействие с каждым из них возможно благодаря организации взаимосвязанной структуры специализированных пакетов [1].

Наиболее важными для реализации данной работы являются пакеты, которые непосредственно учитывают синтаксические и грамматические особенности внедренных языков. Такие пакеты были выявлены в ходе анализа Stanford CoreNLP.

Определение частей речи в Stanford CoreNLP происходит согласно принципу максимума энтропии. Теггер изучает логически условную вероятностную модель из помеченного текста, используя данный принцип.

Идея принципа максимума энтропии состоит в том, чтобы выбрать распределение вероятности, имеющее наибольшую энтропию из тех распределений, которые удовлетворяют определенному набору ограничений. Ограничения лимитируют модель поведения в соответствии с набором статистических данных, собранных из данных обучения. Статистика выражается в виде ожидаемых значений соответствующих функций, определенных в контекстах и тегах. В частности, ограничения требуют, чтобы ожидания характеристик модели соответствовали эмпирическим ожиданиям функций над данными обучения.

Примерами используемых статистических данных в Stanford CoreNLP могут служить данные о том, как часто определенное слово было помечено определенным образом, как часто два тега появлялись в последовательности, как часто три тега появлялись в последовательности.

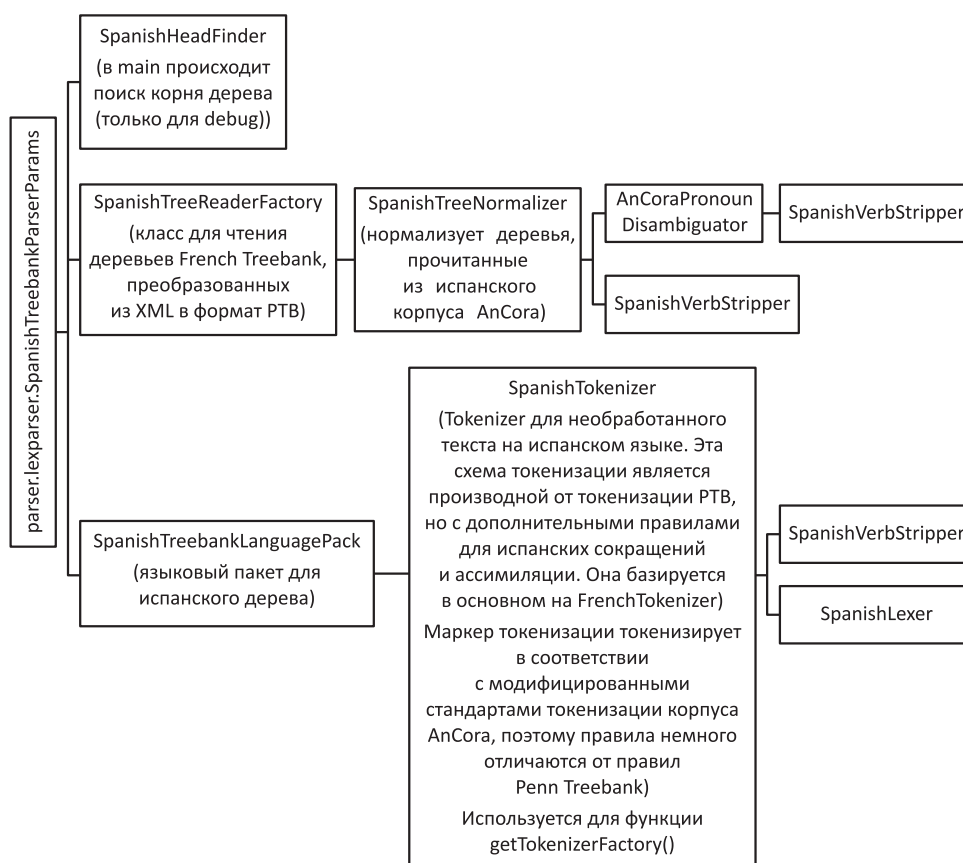


Рис. 1 Взаимодействие классов в реализации испанского языка

2.2 Структура взаимодействия классов в реализации испанского и французского языков

Для исследования интеграции реализованной платформы Stanford CoreNLP на других языках были рассмотрены реализации для конкретных языков: французского и испанского.

Для начала были выявлены основные классы для работы с этими языками. Далее были составлены схемы взаимодействия классов французского и испанского языка (рис. 1 и 2).

В результате анализа и сравнения этих двух языков было выявлено, что их реализации схожи. Существенным и важным различием является то, что анализ данных языков осуществляется на базе определенных корпусов.

В реализации для испанского языка используется корпус AnCorra, который содержит испанский корпус и каталонский, каждый из них состоит из 500 000 слов. Данный корпус состоит в основном из журналистских текстов [2].

Во французской реализации используется French FTB, который содержит 1 000 000 слов и состоит из текстов журнала Le Monde [3].

Stanford CoreNLP можно обучить работе с другими языками. Необходимыми условиями для этого являются внесение необходимых изменений в файл .props, который содержит параметры для использования тегов, и наличие аннотированного файла для тренировки.

3 Разработка взаимодействия Stanford CoreNLP с русским языком

Для обеспечения эффективного определения частей речи в русском языке для текстов узкой тематики необходимо было выбрать корпус, на котором будет базироваться естественный анализ русского языка. В связи с этим для реализации на русском языке использован корпус UD-Russian. Он содержит 1 357 119 морфологически и синтаксически аннотированных предложений [4].

Для запуска тренировки необходимо следовать действиям, указанным в блок-схеме (рис. 3).

В результате выполнения тренировки в каталоге CoreNLP-master создана бинарная модель, при помощи которой возможно определение частей речи.

Следующим шагом стало тестирование созданной модели.

Результаты тестирования выявили, что есть много неточностей в определении частей речи. Дальнейший анализ ситуации показал, что ошибки совершаются из-за неверной обработки пунктуации. Для устранения этой неточности был создан файл Russian.properties. Его содержимое описано ниже:

```
annotators = tokenize, ssplit, pos
pos.model = russian-pos-tagger-model
```

Принцип данных изменений состоит в том, что бинарная модель отправляется сначала в Tokenizer, который определяет, является этот объект словом или

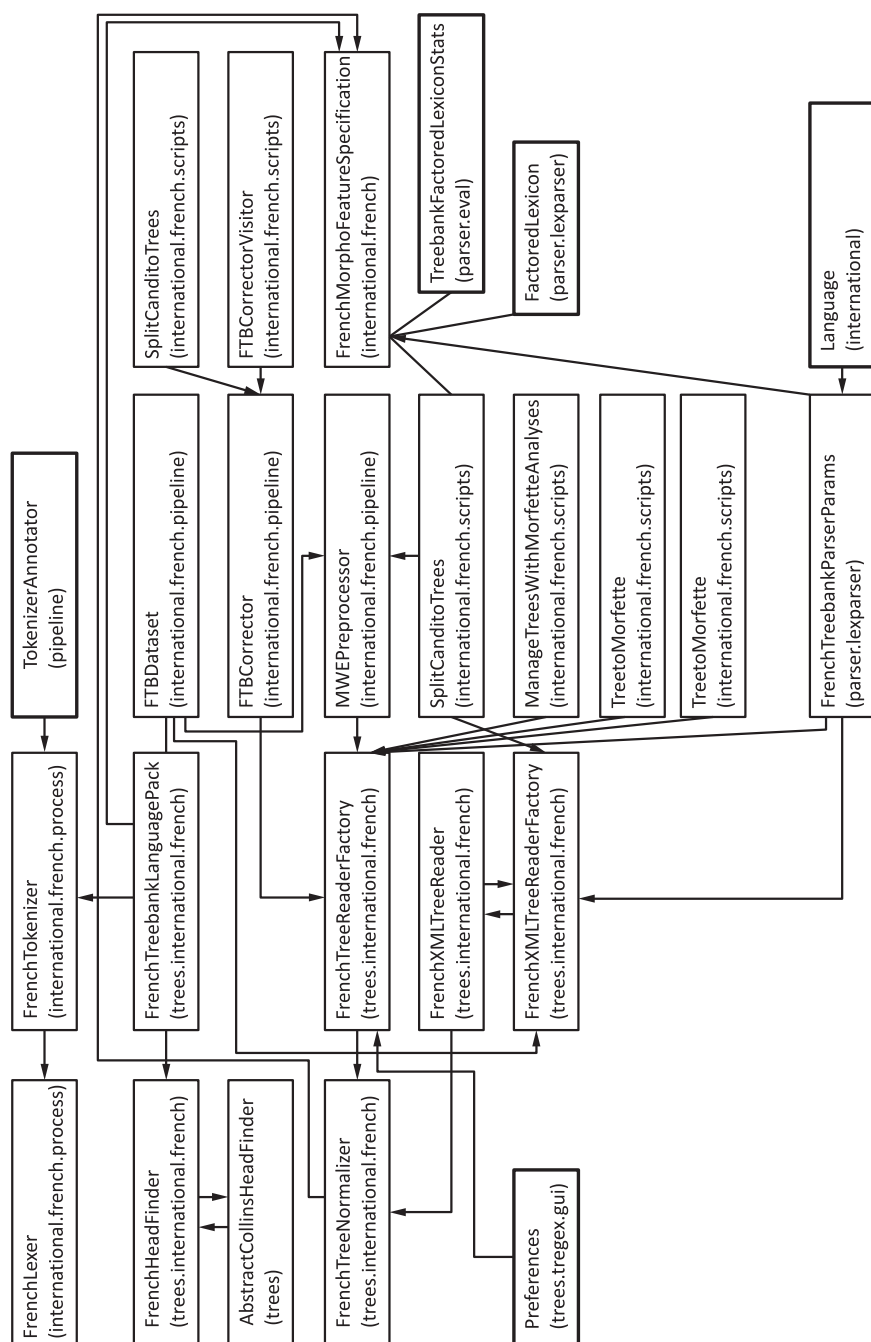


Рис. 2 Взаимодействие классов в реализации французского языка

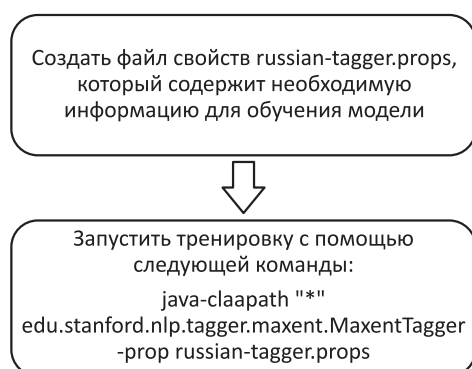


Рис. 3 Блок-схема процесса тренировки

ошибки, так как аналогов данных понятий не было в наборе уже разработанного словаря. Термины из выбранных статей были добавлены в treebank и таким образом был расширен существующий словарь CoReNLP. Это позволило уменьшить число ошибок при определении частей речи в текстах, содержащих терминологию нейронных сетей.

4 Оценка работоспособности и эффективности данного метода

Для оценки эффективности расширенного корпуса было проведено множество тестов. Также проведено сравнение с другими системами морфологического анализа.

В качестве анализируемых текстов были взяты статьи «Логика с исключением на алгебре фурье-дуальных операций: нейросетевой механизм редуцирования когнитивного диссонанса» А. В. Павлова (содержит терминологию, связанную с нейронными сетями) и «Модели представления знаний» Е. Г. Бочкова (содержит терминологию, связанную с моделями представления знаний).

Сначала в качестве тестируемого объекта была взята модель, базирующаяся на UD-Russian Treebank. В первой статье было выявлено 17 предложений (527 слов), в которых POS tagger допустил ошибки. Число допущенных ошибок — 30 (5,7%). Во второй статье количество ошибок составило 2,3%. Основная их масса была связана с неверным определением тегов терминологии.

Далее, после создания дополнительных аннотированных данных для модели, в которых отражены наиболее значимые особенности конкретной узкоспециализированной технической литературы, было проведено тестирование на новой модели, в результате которого в первой статье была найдена лишь одна ошибка (0,2%), во второй статье число ошибок составило 0,4%.

Для сравнительного анализа были выбраны такие системы анализа естественного языка, как LINGVO-MASTER и Среда из РГТУ.

знаком препинания. Для испанской и французской версий используются свои специальные Tokenizer, для русской версии подходит общий (разработанный для английского языка).

Чтобы улучшить определение частей речи для текстов узкоспециализированной технической литературы, для анализа были взяты тексты о нейронных сетях. Данная предметная область была выбрана по той причине, что содержит большое число узкоспециализированных понятий. При определении частей речи этих понятий система допускала

Система LINGVO-MASTER была разработана специалистами ИПИ РАН. При морфологическом анализе все слова приводятся к начальной форме [5]. Недостатком данной системы является то, что она требует четкого определения возможных слов (терминов) и возможной структуры предложений (для конкретной предметной области), без определения которых система не может работать.

Среда из РГТУ помимо стандартных модулей анализа текста использует дополнительный модуль поверхностно-синтаксического, или сегментационного, анализа. Этап сегментационного анализа предшествует этапу синтаксического анализа и заключается в разделении частей предложений на так называемые сегменты. Данные сегменты бывают двух типов: α -сегменты, отвечающие за мелкие части предложений, вроде причастных и деепричастных оборотов, и β -сегменты, отвечающие за части сложноподчиненных и сложносочиненных предложений. Вложенность сегментов, в принципе, не ограничена. К каждому из сегментов применяется внутрисегментный синтаксический анализ, в результате которого строится синтаксический граф сегмента [5]. Недостатком данной системы является то, что при неверном выделении границ сегментов можно получить совершенно непредсказуемые результаты анализа.

Таким образом, удалось повысить эффективность анализа POS tagger текстов узкоспециализированной технической литературы на русском языке. Доля ошибок в анализируемых статьях сократилась с 5,7% до 0,2% в одной и с 2,3% до 0,4% в другой.

5 Заключение

Основной отличительной чертой данной работы является то, что созданная модель сможет анализировать не просто тексты на русском языке, а тексты узкоспециализированной литературы благодаря расширению существующих аннотированных данных.

Резюмируя все вышесказанное, можно отметить следующие результаты проведенных исследований:

- (1) работа Stanford CoreNLP с различными языками базируется на пакетах, которые непосредственно учитывают их синтаксические и грамматические особенности (parser.lexparser, simple, tagger, trees, international, pipeline, process);
- (2) для внедрения русского языка должен использоваться специализированный корпус;
- (3) создана модель, позволяющая проводить анализ текстов на русском языке;
- (4) модель усовершенствована путем добавления в корпус аннотированных текстов, отражающих наиболее значимые особенности конкретной узкоспециализированной технической литературы;

- (5) тестирование показало, что обновленный корпус работает с текстами узко-специализированной тематики эффективнее. Удалось снизить вероятность появления ошибок с 5,7% до 0,2% в одной статье и с 2,3% до 0,4% в другой.

Исследования в данной области можно продолжать далее и использовать разработанную модель в качестве базиса для более глубокого анализа текстов на русском языке.

Литература

1. Manning Ch. D., Surdeanu M., Bauer J., Finkel J., Bethard S. J., McClosky D. The Stanford CoreNLP natural language processing toolkit. <https://nlp.stanford.edu/pubs/StanfordCoreNlp2014.pdf>.
2. Martí M. A., Taulé M., Bertran M., Màrquez L. AnCora: Multilingual and multilevel annotated corpora. <http://clitc.ub.edu/corpus/webfm.send/13>.
3. Arun A., Keller F. Lexicalization in crosslinguistic probabilistic parsing: The case of French // 43rd Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics. — Ann Arbor, MI, USA, 2005. P. 306–313. <http://homepages.inf.ed.ac.uk/keller/papers/acl05.pdf>.
4. Nivre J., Marneffe M.-C., Ginter F., Goldberg Yo., Hajic J. Universal dependencies v1: A multilingual treebank collection. <https://nlp.stanford.edu/pubs/nivre2016ud.pdf>.
5. Артемов М. А., Владимиров А. Н., Селезнев К. Е. Обзор систем анализа естественного текста на русском языке // Вестник ВГУ. Сер. Системный анализ и информационные технологии, 2013. № 2. С. 189–194.

Поступила в редакцию 23.10.17

INTELLECTUAL ANALYSIS OF DATA ON THE BASIS OF STANFORD CoreNLP FOR POS TAGGING OF TEXTS IN THE RUSSIAN LANGUAGE

O. V. Andreeva, M. B. Bagirov, A. A. Dankina, T. O. Fedorova, and M. M. Sheveleva

R. E. Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University; 24-1 Minin Str., Nizhny Novgorod 603000, Russian Federation

Abstract: The basic principles of Stanford CoreNLP and the implementation of this library in various natural languages are discussed. Different ways of Stanford CoreNLP interaction with texts in Russian have been developed. A model that makes it possible to determine the parts of speech in the texts in Russian has been created, the quality of the model's performance on the texts of technical literature in Russian has been increased. The tests that show the effectiveness of the implemented changes are presented.

Keywords: data processing; intellectual data analysis; Stanford CoreNLP; natural language analysis; POS tagger; definition of parts of speech; morphological analysis of texts in the Russian language

DOI: 10.14357/08696527180211

References

1. Manning, Ch. D., M. Surdeanu, J. Bauer, J. Finkel, S. J. Bethard, and D. McClosky. The Stanford CoreNLP natural language processing toolkit. Available at: <https://nlp.stanford.edu/pubs/StanfordCoreNlp2014.pdf> (accessed March 16, 2018).
2. Martí, M. A., M. Taulé, M. Bertran, and L. Màrquez. AnCora: Multilingual and multilevel annotated corpora. Available at: http://cllc.ub.edu/corpus/webfm_send/13 (accessed March 16, 2018).
3. Arun, A., and F. Keller. 2005. Lexicalization in crosslinguistic probabilistic parsing: The case of French. *43rd Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics*. Ann Arbor, MI. 306–313. Available at: <http://homepages.inf.ed.ac.uk/keller/papers/acl05.pdf> (accessed March 16, 2018).
4. Nivre, J., M.-C. Marneffe, F. Ginter, Yo. Goldberg, and J. Hajic. Universal dependencies v1: A multilingual treebank collection. Available at: <https://nlp.stanford.edu/pubs/nivre2016ud.pdf> (accessed March 16, 2018).
5. Artemov, M. A., A. N. Vladimirov, and K. E. Seleznyov. 2013. Obzor sistem analiza estestvennogo teksta na russkom yazyke [Survey of natural text analysis systems in Russian]. *Vestnik VSU. Ser. Sistemnyy analiz i informatsionnye tekhnologii* [Proceedings of VSU. Ser. Systems Analysis and Information Technologies] 2:189–194.

Received October 23, 2017

Contributors

Andreeva Olga V. (b. 1989) — Candidate of Science (PhD), assistant professor, R. E. Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University, 24-1 Minin Str., Nizhny Novgorod 603000, Russian Federation; andreevaov@gmail.com

Bagirov Mirabbas B. (b. 1995) — graduate student, R. E. Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University, 24-1 Minin Str., Nizhny Novgorod 603000, Russian Federation; bagirov_mirabbas@mail.ru

Dankina Anastasia A. (b. 1996) — student, R. E. Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University, 24-1 Minin Str., Nizhny Novgorod 603000, Russian Federation; dankina.anastasi@mail.ru

Fedorova Tatiana O. (b. 1997) — student, R. E. Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University, 24-1 Minin Str., Nizhny Novgorod 603000, Russian Federation; fedorovatatiana@yandex.ru

Sheveleva Maria M. (b. 1996) — student, R. E. Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University, 24-1 Minin Str., Nizhny Novgorod 603000, Russian Federation; shevelevamariia@gmail.com

ИНФОРМАЦИОННАЯ ПОДДЕРЖКА ФОРМИРОВАНИЯ СТРАТЕГИЙ ИННОВАЦИОННОГО РАЗВИТИЯ РЕГИОНОВ НА ОСНОВЕ АДАПТИВНОЙ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ*

М. М. Низамутдинов¹, В. В. Орешников²

Аннотация: Рассматриваются проблемы разработки стратегии регионального инновационного развития на основе инструментов имитационного моделирования. Концепция разработки адаптивной имитационной модели (АИМ) региона основана на иерархической взаимосвязке триады моделей в едином вычислительном комплексе, что позволяет реализовать итеративный механизм взаимoadaptации интересов и стратегий экономических агентов (ЭА). Разработан подход к формированию индикативного плана и параметров управления в рамках обоснования среднесрочных стратегий регионального развития. На основе использования методов нечеткой логики предложены критерии оценки макроэкономической ситуации, функции принадлежности и база нечетких правил с механизмом логического вывода решений, сформирован комплекс правил корректировки управляющих параметров для достижения заданного индикативного плана. Предложена схема реализации информационной поддержки принятия решений в рамках обоснования параметров инновационной стратегии развития региона с использованием предложенной АИМ. Охарактеризована логика взаимосвязи и структура функциональных блоков информационной системы, позволяющая организовать поддержку принятия управленческих решений.

Ключевые слова: поддержка принятия решений; инновационное развитие; имитационное моделирование; региональное управление

DOI: 10.14357/08696527180212

1 Введение

Стратегическая для регионов России задача перехода на инновационную модель развития требует сегодня масштабного внедрения передовых технологий и новаций, обеспечивающих выход на новый технологический уклад производства товаров и услуг с высокой добавленной стоимостью. Не менее важная задача — формирование непосредственно инновационно-ориентированной системы стратегического планирования, которая могла бы обеспечить встраивание потенциальных инновационных центров в существующую крайне инерционную

*Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 16-29-12883_офи).

¹Институт социально-экономических исследований Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук, marsel_n@mail.ru

²Институт социально-экономических исследований Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук, VOresh@mail.ru

модель воспроизводственного процесса, просчитывать влияние инновационных факторов на развитие экономической системы в целом, взаимно адаптировать и синхронизировать эти процессы в рамках принятого горизонта стратегического планирования.

В связи с этим актуализируются вопросы выработки подходов к прогнозированию и планированию развития регионов, учитывающих данные особенности. На сегодняшний день решение этой проблемы сопряжено с рядом сложностей практического характера, обусловленных, в частности, несогласованностью целей (по уровням, горизонтам и субъектам управления), недостаточной системностью реализуемой экономической политики, отсутствием четкой системы анализа и эффективного использования управленческой информации, а также недостаточной методической разработанностью вопросов стратегического планирования на региональном уровне. Как результат этого наблюдается низкое качество формируемых прогнозных оценок по основным параметрам развития регионов, в том числе в рамках программ и стратегий инновационного развития [1], что обуславливает необходимость их постоянного пересмотра уже в ходе реализации стратегий.

В этих условиях дальнейшее развитие методов стратегического планирования на региональном уровне объективно требует их качественного переосмысления, обусловленного в первую очередь необходимостью учета постоянных изменений параметров и условий внутри глобальной конкурентной рыночной среды, их влияния на инновационное развитие. В таких условиях формирование инновационных программ даже на среднесрочную перспективу требует внедрения механизмов взаимного учета интересов и адаптации стратегий поведения ЭА разного уровня, наличия процедур предварительного согласования, а затем — совместной реализации, мониторинга и итеративной корректировки стратегических параметров инновационного развития территорий. В данном контексте эффективным инструментарием совершенствования методов стратегического планирования могут стать современные технологии поддержки принятия решений на основе адаптивных методов управления и имитационного моделирования, позволяющие обеспечить качественную информационную поддержку при разработке и реализации программ инновационного развития на региональном уровне.

2 Концептуальная схема моделирования регионального развития

Стратегия социально-экономического развития региональной системы (элементом которой является стратегия инновационного развития) включает комплекс индикаторов (индикативный план), описывающих желаемое состояние системы в будущем, а также управляющих параметров, реализация которых направлена на достижение индикативного плана [2]. Одним из основных вопросов формирования стратегии является определение баланса интересов ключевых ЭА. В качестве инструментария, позволяющего решать подобные задачи, представляется целесообразным использование моделей и механизмов управления, обеспечивающих

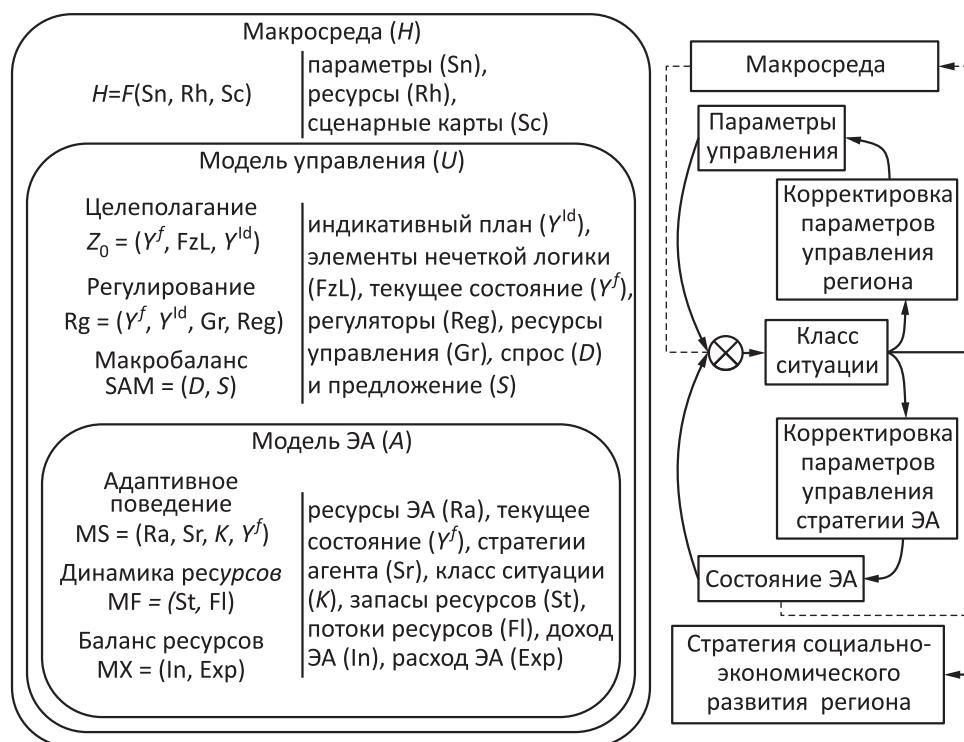


Рис. 1 Концептуальная схема АИМ РСЭС

возможность прогнозирования эволюционных процессов региональной экономической системы в условиях изменяющейся внутренней и внешней макросреды, т. е. основанных на применении адаптивных подходов.

Предлагаемая концепция адаптивного имитационного моделирования основывается на идее последовательной адаптации как непосредственно стратегий поведения агентов, так и управляющего воздействия к изменению экономической ситуации и включает три ключевых уровня: ЭА, региональное управление и макросреда (рис. 1) [3]. Применительно к решению задачи разработки программ инновационного развития региона субъекты инновационной деятельности региона являются одним из множества ЭА, отличных от других агентов модели совокупностью присущих им характеристик и целей. Соответственно, реализация функций по управлению инновационным развитием региона заключается в создании определенных условий для их деятельности и реализуется органами государственной и муниципальной власти региона.

Комплекс моделей ЭА описывается кортежем

$$A = \langle MS, MF, MX \rangle,$$

где MS — блок адаптивного поведения ЭА; MF — блок использования ресурсов ЭА; MX — блок обеспечения баланса денежных доходов и расходов ЭА.

В частности, блок адаптивного поведения $MS = \langle Ra, Sr, K, Y^f \rangle$ характеризует действия ЭА по использованию имеющегося в его распоряжении ресурса $Ra = \{Ra_t^1, Ra_t^2, \dots, Ra_t^n\}$ с целью достижения результата $Y^f = \{Y_t^{f1}, Y_t^{f2}, \dots, Y_t^{fn}\}$ в соответствии с некоторой стратегией поведения $Sr = \{Sr_t^1, Sr_t^2, \dots, Sr_t^n\}$ исходя из сложившегося в момент времени t класса ситуации $K = \{K_t^1, K_t^2, \dots, K_t^n\}$. Множество показателей, характеризующих действия ЭА региональной социально-экономической системы (РСЭС), включает среди прочего параметры инновационного развития данного региона. Отличительной особенностью рассматриваемого блока является возможность адаптации поведения агента к изменению условий функционирования путем выбора иной стратегии поведения, которая представляет собой набор правил, реализуемых в данных условиях.

Блок использования ресурсов MF описывает изменение запасов, имеющихся в распоряжении ЭА, $St = \{St_t^1, St_t^2, \dots, St_t^n\}$ и их потоков $Fl = \{Fl_t^1, Fl_t^2, \dots, Fl_t^n\}$ в некоторый момент времени t . В связи с этим наиболее целесообразным при формировании модели представляется использование в качестве основного инструмента моделей и методов системной динамики. Блок анализа сбалансированности MX обеспечивает поддержание расходов $Out = \{Out_t^1, Out_t^2, \dots, Out_t^n\}$ на уровне, обусловленном доходами $In = \{In_t^1, In_t^2, \dots, In_t^n\}$ и ресурсами ЭА.

Как показано на рис. 1, управляющая подсистема представлена вторым уровнем иерархии и образует модель регионального управления U , включающую два взаимосвязанных блока — целеполагания (определение индикативного плана развития РСЭС) и регулирования (формирование управляющих параметров, обеспечивающих достижение индикативного плана), которые представлены на рис. 2.

Выбор решения базируется на анализе уровня достижения плановых значений индикаторов социально-экономического развития региона и наличия незадействованных ресурсов системы (табл. 1). Номера решений в табл. 1 соответствуют номерам решений на рис. 2.

В рамках данной модели предполагается, в частности, решение вопросов инновационного развития на региональном уровне.

Особенность практики регионального управления состоит в описании данных процедур при помощи таких нечетких формулировок, как «немного», «существенно» и т. д. Ряд исследователей отмечают, что часть сценарных условий может базироваться на экспертных оценках [4]. Для реализации данного подхода в рамках разрабатываемого инструментария предлагается использовать алгоритмы нечеткой логики FzL, что является отличительной особенностью блока целеполагания Z_0 , обеспечивающего определение и корректировку индикативно-

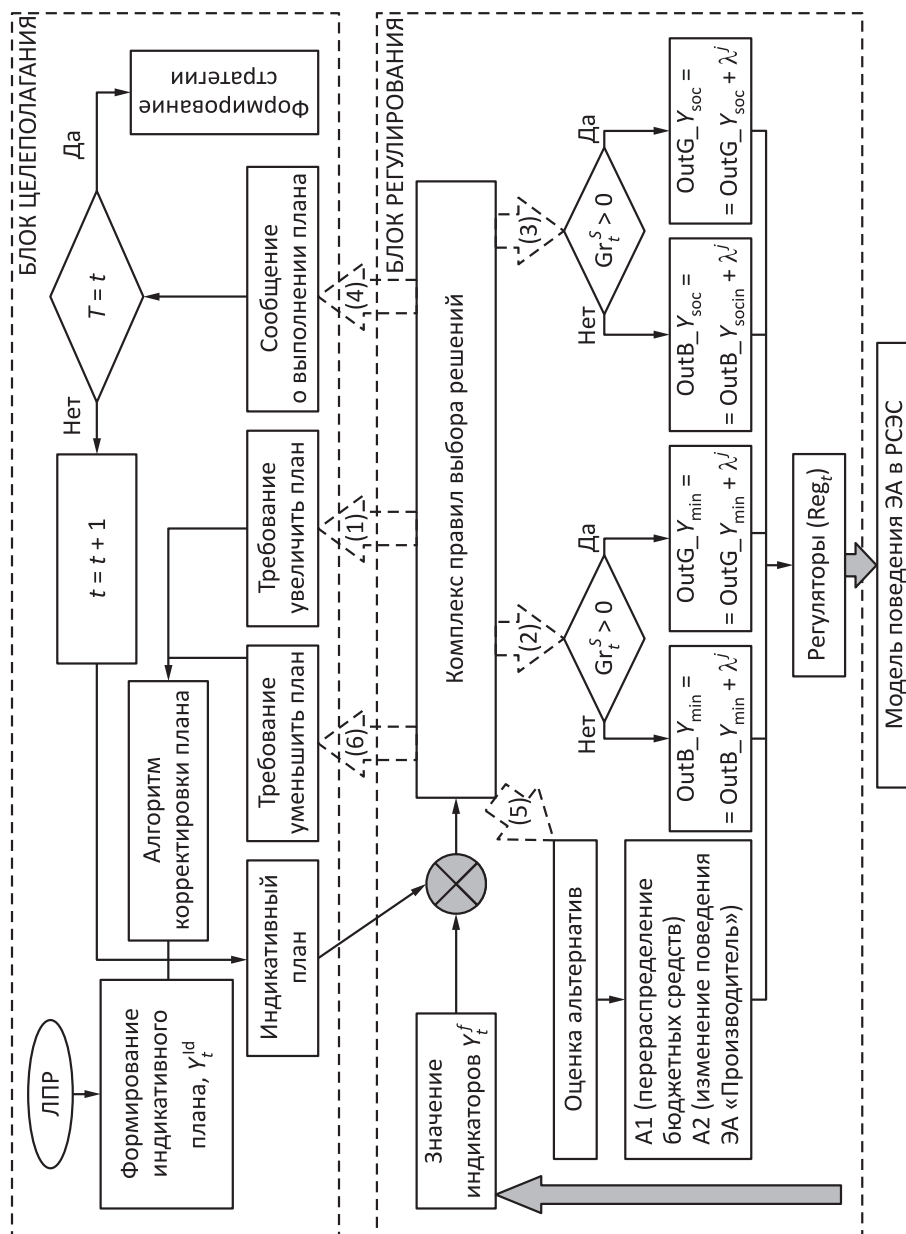


Рис. 2 Алгоритм формирования целевых индикаторов и параметров управления развитием РСЭС

Таблица 1 Комплекс правил выбора решений

Ресурс	Индикаторы достигнуты		Индикаторы не достигнуты
	В равной степени	Не в равной степени	В равной степени
Имеется	Увеличение индикативного плана (1)	Увеличение расхода по отстающему направлению (2)	Увеличение расхода по любому из направлений (3)
Отсутствует	Завершение алгоритма (4)	Перераспределение ресурсов по направлениям (5)	Уменьшение индикативного плана (6)

го плана $Y^{\text{Id}} = \{Y_t^{\text{Id}1}, \dots, Y_t^{\text{Id}n}\}$ во времени t ($t = 1, \dots, T$, где T — горизонт моделирования):

$$Z_0 = \langle Y^f, FzL, Y^{\text{Id}} \rangle.$$

Первоначальный вариант индикативного плана Y_t^{Id} формируется ЛПР (лицом, принимающим решения) с учетом текущего состояния, тенденций развития как внутренней, так и внешней среды, а также целей развития РСЭС. В рамках блока регулирования Rg происходит настройка регуляторов управляющей системы $\text{Reg} = \{\text{Reg}_t^1, \dots, \text{Reg}_t^n\}$, исходя из поставленных целей развития и имеющихся ресурсов при одновременном мониторинге ключевых макропоказателей Y_t^f в момент времени t :

$$\text{Rg} = \langle Y^f, Y^{\text{Id}}, \text{Ru}, \text{Reg} \rangle.$$

Таким образом, управление РСЭС включает определение значений индикативного плана, который представляет собой количественное выражение целей регионального развития и путей их достижения. Блок макробаланса SAM описывается кортежем элементов $\text{SAM} = \langle D, S \rangle$, где D и S представляют собой соответственно спрос и предложение ресурсов на рынках.

Модель макросреды $H = \langle \text{Sn}, \text{Rh}, \text{Sc} \rangle$ определяется через параметры $\text{Sn} = \{\text{Sn}_t^1, \text{Sn}_t^2, \dots, \text{Sn}_t^n\}$ и ресурсы $\text{Rh} = \{\text{Rh}_t^1, \text{Rh}_t^2, \dots, \text{Rh}_t^n\}$ внешней среды, задаваемые посредством сценарных карт Sc для каждого момента времени t .

Непосредственно процесс моделирования базируется на вложенности вычислений. Данная процедура включает последовательный расчет i -го ($\forall i, i = \overline{1; i_k}$, где i_k — число параметров в индикативном плане) элемента $Y_t^{\text{Id}i}$, в рамках которого реализуется вложенная процедура расчета ij -й комбинации reg_t^{ij} ($\forall j, j = \overline{1; j_k}$, где j_k — число управляемых параметров), моделирующей адаптивное поведение ЭА (A). Исходя из степени достижения целевого индикатора $Y_t^{\text{Id}i}$, принимается решение об изменении значений параметров $\text{reg}_t^{ij}, Y_t^{\text{Id}i}$ или о переходе к следующему модельному периоду ($t + 1$).

Таким образом, предлагаемая концепция разработки АИМ региона основана на иерархической взаимоувязке триады моделей в едином вычислительном комплексе, что позволяет реализовать итеративный механизм взаимoadaptации интересов и стратегий ЭА как во взаимодействии друг с другом, так и при взаимодействии с системой управления в процессе разработки и реализации программ инновационного развития региона.

3 Формализация механизма корректировки индикативного плана с применением методов нечеткой логики

Разработанный подход к моделированию процедуры корректировки индикативного плана развития РСЭС базируется на использовании аппарата нечеткой логики, что и определяет последовательность этапов, представленных ниже. Индикативный план в данном случае должен включать основные показатели социально-экономического развития региона, такие как валовой региональный продукт, объем инвестиций в основной капитал, величина доходов на душу населения, величина бюджетной обеспеченности и т. д.

На этапе фаззификации используемые условия выражаются в форме лингвистических термов. Сами решения формируются с использованием следующих критериев.

Критерий 1. Степень достижения индикативного плана $PD_t^i = \{PD_t^1, \dots, PD_t^n\}$. Лингвистическая переменная PD_t^i может принимать следующие значения: $PD_t^i = \{\text{перевыполнен (pd); достигнут (d); не достигнут (nd)}\}$.

Критерий 2. Изменение темпа роста элемента i индикативного плана $TRP_t^i = \{TRP_t^i = \{TRP_t^1, \dots, TRP_t^n\}$, характеризующее его динамику. Возможные значения лингвистической переменной: $TRP_t^i = \{\text{значительно повысился (mv); повысился (v); сохранился (s); снизился (n); значительно снизился (mn)}\}$.

Критерий 3. Соотношение темпа роста элемента i индикативного плана с темпами роста других показателей $RPd_t^i = \{RPd_t^1, \dots, RPd_t^n\}$. Лингвистическая переменная RPd_t^i может принимать следующие значения: $RPd_t^i = \{\text{существенно выше (mv); выше (v); сопоставимый (s); ниже (n), существенно ниже (mn)}\}$.

Критерий 4. Наличие других показателей с лучшими темпами роста.

Для фаззификации полученных четких значений были разработаны функции принадлежности. Необходимо отметить, что вид данных функций для различных региональных систем может отличаться. Для описания крайнего левого терма в рамках проведенного исследования была использована функция принадлежности класса $L(x; a, b)$, средних термов — функция принадлежности класса $t(x; a, b, c)$, крайнего правого терма — функция принадлежности класса

$\gamma(x; a, b)$. Данные функции относятся к стандартным функциям принадлежности, которые легко применимы к решению большинства задач. Их выбор также обусловлен анализом предметной области с учетом экспертной оценки. Значения коэффициентов a , b и c определяются индивидуально для каждого исследуемого элемента.

Таким образом, для описания крайнего левого термина используется выражение:

$$\mu(x, a, b) = \begin{cases} 1, & \text{если } x \leq a; \\ \frac{b-x}{b-a}, & \text{если } a < x < b; \\ 0, & \text{если } x \geq b. \end{cases}$$

Для описания средних термов используется выражение:

$$\mu(x, a, b, c) = \begin{cases} 0, & \text{если } x \leq a; \\ \frac{x-a}{c-a}, & \text{если } a < x \leq c; \\ \frac{b-x}{b-c}, & \text{если } c < x < b; \\ 0, & \text{если } x \geq b. \end{cases}$$

Для описания крайнего правого термина используется выражение:

$$\mu(x, a, b) = \begin{cases} 0, & \text{если } x \leq a; \\ \frac{x-a}{b-a}, & \text{если } a < x < b; \\ 1, & \text{если } x \geq b. \end{cases}$$

Рассчитанные значения критериев определяют нечеткое решение $\text{Resh}_t^i = \{\text{Resh}_t^1, \dots, \text{Resh}_t^n\}$, описывающее изменение i -го элемента индикативного плана. Соответственно, лингвистическая переменная Resh_t^i по каждому из показателей индикативного плана может принимать следующие значения: $\text{Resh}_t^i = \{\text{существенно снизить (mn); снизить (n); оставить текущее значение (s); повысить (v); существенно повысить (mv)}\}$.

Следующим этапом является формирование нечеткой базы знаний. Система нечетких высказываний запишется в форме:

$$\overline{L} = \left\{ \begin{array}{ll} \overline{L_1} & : \langle \text{если } \overline{A_1}, \text{ то } \overline{B_1} \rangle; \\ \overline{L_m} & : \langle \text{если } \overline{A_m}, \text{ то } \overline{B_m} \rangle. \end{array} \right.$$

Нечеткие высказывания соответствуют общей форме:

$$\overline{A_j} : \langle \beta_w \text{ есть } \alpha_{wj} \rangle; \quad \overline{B_j} : \langle \beta_v \text{ есть } \alpha_{vj} \rangle,$$

где α_{wj} и α_{vj} — значения термов входной и выходной лингвистической переменной; β_w и β_v — термы входной и выходной лингвистической переменной.

Таблица 2 База знаний нечетких правил алгоритма формирования целевых индикаторов развития РСЭС

Изменение темпа роста показателя (TRP _t ⁱ)	Соотношение темпа роста (RPd _t ⁱ)	Степень достижения (PD _t ⁱ)					
		Не достигнут (nd)		Достигнут (d)		Перевыполнен (pd)	
		Наличие других показателей с лучшими темпами роста					
		Да	Нет	Да	Нет	Да	Нет
Значительно повысился (mv)	Существенно выше	n	mn	s	s	s	v
	Выше	n	mn	s	s	s	v
	Сопоставимый	n	n	v	s	s	v
	Ниже	s	n	v	s	s	v
	Существенно ниже	s	n	v	s	s	v
Повысился (v)	Существенно выше	n	n	s	s	s	v
	Выше	n	n	s	s	s	v
	Сопоставимый	n	n	s	s	s	v
	Ниже	s	n	s	s	s	v
	Существенно ниже	s	n	s	s	s	v
Сохранился (s)	Существенно выше	s	n	s	s	v	v
	Выше	s	n	s	s	v	v
	Сопоставимый	s	n	s	s	v	v
	Ниже	n	n	s	s	s	v
	Существенно ниже	n	n	s	s	s	v
Снизился (n)	Существенно выше	s	n	v	s	s	v
	Выше	s	n	v	s	s	v
	Сопоставимый	s	n	s	s	v	v
	Ниже	s	n	s	s	v	v
	Существенно ниже	s	n	s	s	v	v
Значительно снизился (mn)	Существенно выше	s	n	s	s	s	v
	Выше	s	n	s	s	s	v
	Сопоставимый	s	n	v	s	v	v
	Ниже	s	n	v	s	mv	v
	Существенно ниже	s	n	v	s	mv	v

Исходя из выделенных критериев и анализа предметной области, сформирована база знаний (табл. 2), на основе которой осуществляется выбор нечеткого решения $Resh_t^i$ относительно изменения индикативного плана.

Заключительным этапом является процедура дефаззификации, необходимая для определения конкретного числового значения выходного параметра. Для этого могут быть применены различные методы: «центр тяжести», «первый максимум», «средний максимум» и др. [5]. В рамках исследования был использован метод «первый максимум», отличающийся простотой реализации. Однако данный подход имеет ряд недостатков, наиболее существенным из которых является низкая чувствительность с точки зрения нечеткой модели. Одним из направлений

дальнейшего развития исследования, по мнению авторов, может стать обоснование применения метода центра тяжести для решения поставленной задачи с учетом имеющихся особенностей функции принадлежности выходного параметра. Далее вычисляется значение истинности каждого правила и формируется управленческое решение.

Достижение индикативного плана Y_t^{Id} осуществляется посредством изменения значений управляемых параметров reg_t^{ij} в соответствии с выделенными правилами Ru_t^s , представляющими собой запись вида: «если $\text{Ru}_t^s = \text{true}$, то $\text{reg}_t^j = \text{reg}_t^j \pm \lambda^j$ ». Ключевым принципом формирования управляющих параметров является выравнивание и максимизация степени достижения индикаторов ($\min(Y_t^{fi}/Y_t^{\text{Idi}}) \rightarrow \max$). На каждом шаге моделирования возможна одна из ситуаций, определяющих правила Ru_t^s :

- (1) $(Y_t^{fi} \geq Y_t^{\text{Idi}}) \wedge \left(\frac{Y_t^{fi}}{Y_t^{\text{Idi}}} = \frac{Y_t^{fi+1}}{Y_t^{\text{Idi}+1}} \right) \wedge (\text{Gr}_t^s > 0) \rightarrow Y_t^{\text{Idi}} = Y_t^{\text{Idi}} + \lambda^j$;
- (2) $\left(\frac{Y_t^{fi}}{Y_t^{\text{Idi}}} \neq \frac{Y_t^{fi+1}}{Y_t^{\text{Idi}+1}} \right) \wedge (\text{Gr}_t^s > 0) \rightarrow$

$$\rightarrow \begin{cases} \text{Reg}_t^{ij} = \text{Reg}_t^{ij} + \lambda^j, & \frac{Y_t^{fi}}{Y_t^{\text{Idi}}} = \min \left(\frac{Y_t^{fi}}{Y_t^{\text{Idi}}} \right); \\ \text{Reg}_t^{ij} = \text{Reg}_t^{ij}, & \frac{Y_t^{fi}}{Y_t^{\text{Idi}}} \neq \min \left(\frac{Y_t^{fi}}{Y_t^{\text{Idi}}} \right); \end{cases}$$
- (3) $(Y_t^{fi} < Y_t^{\text{Idi}}) \wedge \left(\frac{Y_t^{fi}}{Y_t^{\text{Idi}}} = \frac{Y_t^{fi+1}}{Y_t^{\text{Idi}+1}} \right) \wedge (\text{Gr}_t^s > 0) \rightarrow \text{Reg}_t^{ij} = \text{Reg}_t^{ij} + \lambda^j$;
- (4) $(Y_t^{fi} \geq Y_t^{\text{Idi}}) \wedge \left(\frac{Y_t^{fi}}{Y_t^{\text{Idi}}} = \frac{Y_t^{fi+1}}{Y_t^{\text{Idi}+1}} \right) \wedge (\text{Gr}_t^s = 0) \rightarrow$

$$\rightarrow \begin{cases} t + t + 1, & t < T; \\ \text{завершение адгоритма}, & t = T; \end{cases}$$
- (5) $\left(\frac{Y_t^{fi}}{Y_t^{\text{Idi}}} \neq \frac{Y_t^{fi+1}}{Y_t^{\text{Idi}+1}} \right) \wedge (\text{Gr}_t^s = 0) \rightarrow$

$$\rightarrow \begin{cases} \text{Reg}_t^{ij} = \text{Reg}_t^{ij} - \lambda^j, & \frac{Y_t^{fi}}{Y_t^{\text{Idi}}} = \max \frac{Y_t^{fi}}{Y_t^{\text{Idi}}}; \\ \text{Reg}_t^{ij} = \text{Reg}_t^{ij} + \lambda^j, & \frac{Y_t^{fi}}{Y_t^{\text{Idi}}} = \min \frac{Y_t^{fi}}{Y_t^{\text{Idi}}}; \end{cases}$$
- (6) $(Y_t^{fi} < Y_t^{\text{Idi}}) \wedge \left(\frac{Y_t^{fi}}{Y_t^{\text{Idi}}} = \frac{Y_t^{fi+1}}{Y_t^{\text{Idi}+1}} \right) \wedge (\text{Gr}_t^s = 0) \rightarrow Y_t^{\text{Idi}} = Y_t^{\text{Idi}} - \lambda^j$.

Величина λ^j для корректировки значений регуляторов определяется ЛПР, а для корректировки параметров индикативного плана находится с применением описанного выше нечеткого алгоритма.

Таким образом, блок регулирования обеспечивает перевод РСЭС из текущего состояния в заданное в соответствии со сформированным индикативным планом. По итогам выполнения шага q итерационного алгоритма происходит либо перераспределение ресурса и подача нового управляющего воздействия, либо возврат на уровень целеполагания — варианты 1 и 6.

Разработка АИМ региона на основе предложенной концепции моделирования может быть использована в качестве ядра различных информационных систем, применение которых направлено на решение задачи обеспечения качественной информационной поддержки при реализации программ инновационного развития на региональном уровне. Наиболее перспективной и отвечающей поставленным целям является разработка системы поддержки принятия решений (СППР).

4 Схема реализации информационной поддержки на базе адаптивной имитационной модели

В общем виде СППР в области управления региональным развитием, по мнению авторов, должна решать следующие базовые задачи:

- сбор и накопление фактографической информации, структурированной информации в виде правил принятия решений, а также слабоструктурированной информации в виде онтологий и базы прецедентов;
- анализ ситуации с использованием проблемно-ориентированной базы знаний с механизмом логического вывода [6];
- формирование прогноза развития ситуации в различных макроэкономических условиях на базе адаптивной имитационной модели;
- выработка комплекса рекомендаций по формированию и корректировке параметров управления инновационным развитием региона.

Однако сама по себе предложенная адаптивная имитационная модель не позволяет решить задачи информационно-аналитической поддержки и требует дополнения комплексом функциональных блоков (рис. 3).

Первым этапом является формирование комплекса исходных параметров. Блок ввода данных обеспечивает наполнение базы данных различной информацией о состоянии объекта управления и внешней среды. В связи с тем, что она периодически должна обновляться, необходимым условием функционирования СППР является организация мониторинга. Это позволяет не только иметь представление о текущем и ретроспективном состоянии объекта управления, но и отслеживать последствия принимаемых управленческих решений, а соответственно, расширять и совершенствовать имеющиеся базы правил и базы прецедентов. Обработка огромных массивов информации требует применения

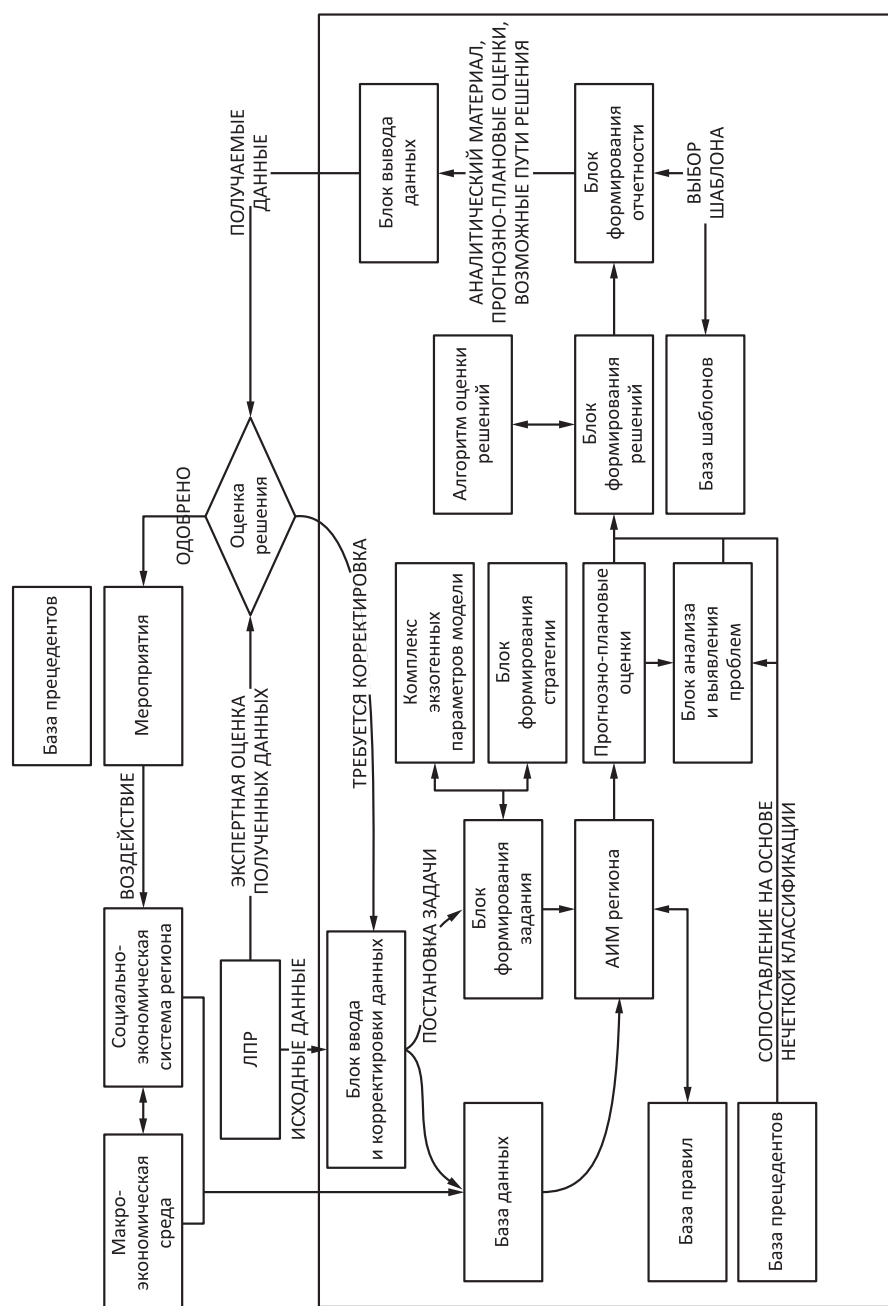


Рис. 3 Схема организации СППР на базе адаптивной имитационной модели

современных информационных технологий обработки данных и интеллектуального анализа. В связи с этим хранение данных предлагается организовать на базе концепции OLAP (on-line analytical processing), в том числе за счет свойств многомерной базы, и Data Mining. Как отмечают эксперты в данной области, при помощи Data Mining можно выявить скрытые закономерности в больших объемах информации [7]. Кроме того, блок ввода служит для постановки задачи пользователем системы — ЛПР [8]. На рис. 3 данный этап представлен блоком формирования задания. Его необходимость обусловлена разнообразием практических задач и направлений применения СППР и необходимостью ввода не только отчетных данных, но и экзогенных параметров модели, а также выбором стратегии развития. Блок формирования стратегии должен позволять вырабатывать общую стратегию развития региональной системы и определять ряд параметров модели еще до проведения модельного эксперимента с целью выбора направления развития.

Полученные прогнозно-плановые оценки поступают в блок анализа и выявления проблем. На данном этапе осуществляются структурный анализ, анализ динамики и иные процедуры, позволяющие выявить как непосредственно проблемы, так и предпосылки для их возникновения. Для этого используется база прецедентов, содержащая информацию о возможности применения накопленного опыта решения проблем в процессе выработки решения новых задач. На основе прогнозно-плановых оценок, выявленных в ходе анализа проблем развития, СППР формирует комплекс альтернативных решений. Реализацию данной процедуры предполагается осуществлять в рамках блока формирования решений, позволяющего осуществлять классификацию ситуаций и сопоставление с имеющейся базой прецедентов для выбора возможных путей решения на основе алгоритма, представленного на рис. 2. При этом целесообразно отслеживать методы теории нечеткой логики. Такой подход дает возможность отслеживать плавные изменения свойств объекта управления, а также задействовать его качественные характеристики [9].

В целом предлагаемая СППР может стать универсальным средством, обеспечивающим ЛПР необходимой для принятия решений информацией о ретроспективном, текущем и будущем состоянии РСЭС, позволяющим проводить анализ и выявлять возможные пути разрешения сложившихся проблем.

5 Заключение

Таким образом, в рамках проведенного исследования предложена концептуальная схема реализации СППР в области управления инновационным развитием региона, определено место адаптивной имитационной модели в структуре системы, показаны возможности ее использования при формировании прогнозно-плановых оценок развития региона, а также при оценке эффективности применения альтернативных управляющих воздействий. Описана процедура формирования решения и раскрыто назначение функциональных блоков, которые обеспечивают

возможность работы с модельным комплексом для конечного пользователя, не являющегося специалистом в области экономико-математического моделирования. С теоретической точки зрения предложенный инструментарий позволит расширить возможности совместного применения как методов теории управления и поддержки принятия решения, интеллектуальных информационных технологий, так и экономико-математических методов, современных технологий компьютерного имитационного моделирования для задач стратегического планирования развития социально-экономических систем макро- и мезоуровня. Сам программный инструментарий имеет важную практическую направленность. Предложенная конструкция СППР может быть использована органами государственного управления в рамках определения параметров среднесрочного развития субъектов Российской Федерации, а также иных РСЭС при разработке социальной, экономической и бюджетной политики.

Литература

1. Антамошкин А. Н., Антамошкина О. И., Ходос Д. В. Моделирование основных этапов формирования программы инновационного развития // Вестник СибГАУ, 2010. № 4(30). С. 204–206.
2. Строев П. В. Анализ факторов, оказывающих влияние на инновационную активность в экономике России // Вестник Финансового университета, 2012. № 2(68). С. 143–148.
3. Низамутдинов М. М., Орешиников В. В. Инструментарий прогнозирования изменения параметров регионального развития на основе адаптивно-имитационного подхода // Информационные технологии и интеллектуальная поддержка принятия решений: Тр. 3-й Междунар. конф. — Уфа: УГАТУ, 2015. С. 211–215.
4. Захарова А. А. Интегральная оценка инновационного развития региона на основе нечетких множеств // Научное обозрение. Технические науки, 2014. № 1. С. 161–168.
5. Палюх Б. В., Какатунова Т. В. Нечеткая когнитивная карта как инструмент моделирования инновационной деятельности на региональном уровне // Программные продукты и системы, 2012. № 4. С. 128–131.
6. Тюшняков В. Н., Жертовская Е. В., Якименко М. В. Информационно-аналитическое обеспечение ситуационного центра как основа разработки стратегий инновационного развития региона // Фундаментальные исследования, 2015. № 11(6). С. 1253–1257.
7. Черняховская Л. Р., Федорова Н. И., Низамутдинова Р. И. Интеллектуальная поддержка принятия решений в оперативном управлении деловыми процессами предприятия // Вестник УГАТУ, 2011. Т. 15. № 2(42). С. 172–176.
8. Ахметов Т. Р. Инновационный цикл и эволюция национальных экономических систем // Фундаментальные исследования, 2015. № 11(7). С. 1382–1386.
9. Фаттахов Р. В., Иванова Е. И., Сметанина О. Н. О роли информационных ресурсов при поддержке принятия управленческих решений на региональном уровне // Вестник УГАТУ, 2007. Т. 9. № 2. С. 82–87.

Поступила в редакцию 22.12.17

CONCEPTION OF A DECISION SUPPORT SYSTEM FOR REGIONS INNOVATIVE DEVELOPMENT MANAGEMENT BASED ON THE ADAPTIVE SIMULATION MODEL

M. M. Nizamutdinov and V. V. Oreshnikov

Institute of Social and Economic Research, Ufa Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, 71 Prosp. Oktyabrya, Ufa 450054, Russian Federation

Abstract: The article discusses the development of a decision support system (DSS) for innovative development management of regional socio-economic systems. The concept of an adaptive simulation model (ASM) development in a region is based on hierarchical interconnection of the triad of models in a single computable complex, which makes it possible to implement an iterative mechanism of mutual adherence of interests and strategies of economic agents. The meaningful analysis of the known approaches and decision support tools is made. Basic requirements for decision support organization are formulated. The DSS conception is proposed to justify the innovation strategy parameters for region development based on the ASM. The logic and structure of DSS functional blocks that allow to organize the information support are characterized.

Keywords: decision support; innovative development; simulation model; regional management

DOI: 10.14357/08696527180212

Acknowledgments

The paper was supported by the Russian Foundation for Basic Research (project 16-29-12883_ofi).

References

1. Antamoshkin, A.N., O.I. Antamoshkina, and D.V. Hodos. 2010. Modelirovanie osnovnykh etapov formirovaniya programmy innovatsionnogo razvitiya [Basic steps of innovative development program formation modeling]. *Vestnik SibGAU* [Bull. of the Siberian State Aerospace University named after Academician M. F. Reshetnev] 4 (30):204–206.
2. StroeV, P.V. 2012. Analiz faktorov, okazyvayushchikh vliyanie na innovatsionnuyu aktivnost' v ekonomike Rossii [Analysis of the factors influencing the innovation activity in Russian economy]. *Vestnik Finansovogo universiteta* [Bull. of the Financial University] 2(68):143–148.
3. Nizamutdinov, M.M., and V.V. Oreshnikov. 2015. Instrumentariy prognozirovaniya izmeneniya parametrov regional'nogo razvitiya na osnove adaptivno-imitatsionnogo podkhoda [Toolkit for forecasting changes in the parameters of regional development based

- on the adaptive-imitational approach]. *3rd Conference (International) "Information Technologies and Intellectual Decision Support" Proceedings*. Ufa: UGATU. 211–215.
4. Zakharova, A. A. 2014. Integral'naya otsenka innovatsionnogo razvitiya regiona na osnove nechetkikh mnozhestv [Integral assessment of innovative development of the region on the basis of fuzzy sets]. *Nauchnoe obozrenie. Tekhnicheskie nauki* [Scientific Review. Technical Sciences] 1:161–168.
 5. Palyukh, B. V., and T. V. Kakatunova. 2012. Nechetkaya kognitivnaya karta kak instrument modelirovaniya innovatsionnoy deyatel'nosti na regional'nom urovne [A fuzzy cognitive map as a tool to model innovation at the regional level]. *Programmnye produkty i systemy* [Software & Systems] 4:128–131.
 6. Tyushnyakov, V. N., E. V. Zhertovskaya, and M. V. Yakimenko. 2015. Informatsionno-analiticheskoe obespechenie situatsionnogo tsentra kak osnova razrabotki strategiy innovatsionnogo razvitiya regiona [Information and analytical support of situational centers as the basis for the strategy choice of region innovative development]. *Fundamental'nye issledovaniya* [Fundamental Research] 11(6):1253–1257.
 7. Chernyakhovskaya, L. R., N. I. Fedorova, and R. I. Nizamutdinova. 2011. Intellektual'naya podderzhka prinyatiya resheniy v operativnom upravlenii delovymi protsessami predpriyatiya [Intellectual decision support in the operational management of business processes of the enterprise]. *Vestnik UGATU* [Bull. of the Ufa State Aviation Technical University] 2(42):172–176.
 8. Akhmetov, T. R. 2015. Innovatsionnyy tsikl i evolyutsiya natsional'nykh ekonomicheskikh sistem [Innovative cycle and the evolution of national economic systems]. *Fundamental'nye issledovaniya* [Fundamental Research] 11(7):1382–1386.
 9. Fattakhov, R. V., E. I. Ivanova, and O. N. Smetanina. 2007. O roli informatsionnykh resursov pri podderzhke prinyatiya upravlencheskikh resheniy na regional'nom urovne [On the role of information resources with the support of decision-making at the regional level]. *Vestnik UGATU* [Bull. of the Ufa State Aviation Technical University] 2:82–87.

Received December 22, 2017

Contributors

Nizamutdinov Marsel M. (b. 1976) — Candidate of Science (PhD) in technology, associate professor, Head of Laboratory, Institute of Social and Economic Research, Ufa Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, 71 Prosp. Oktyabrya, Ufa 450054, Russian Federation; marsel_n@mail.ru

Oreshnikov Vladimir V. (b. 1986) — Candidate of Science (PhD) in economics, senior scientist, Institute of Social and Economic Research, Ufa Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, 71 Prosp. Oktyabrya, Ufa 450054, Russian Federation; VOresh@mail.ru

МОДЕЛЬ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТОКОВ В ОДНОПРОДУКТОВОЙ СЕТЕВОЙ СИСТЕМЕ

А. В. Ильин¹, В. Д. Ильин²

Аннотация: Предложена линейная модель распределения потоков в однопродуктовой сетевой системе (ОСС). Модель представлена в виде системы обязательных и ориентирующих правил, включающих совокупность линейных функций, которые описывают распределение потоков продукта, перемещаемого по дугам сети, в зависимости от количества продукта, отправляемого из производящих узлов и доставляемого в узлы потребления. Система правил отражает физические и технологические характеристики объекта (баланс в узлах сети, ограничения пропускной способности дуг и др.). Для поиска параметров модели применен метод целевого перемещения решения. Измерения величин, используемые при решении задачи, синхронно выполняются в точках примыкания дуг к узлам сети.

Ключевые слова: однопродуктовая сетевая система; линейная модель распределения потоков; учет физических и технологических характеристик объекта; система обязательных и ориентирующих правил; метод целевого перемещения решения

DOI: 10.14357/08696527180213

1 Введение

Однопродуктовые сетевые системы относятся к системам массового применения в электроэнергетике, водоснабжении и других областях жизнедеятельности, информатизация которых предусмотрена Программой цифровой экономики России [1]. Для решения задач планирования поставок в таких ОСС необходимо знать зависимость количества продукта, поставляемого по дугам сети, от количества продукта, производимого и потребляемого в узлах. Рассматриваемый в данной статье подход к моделированию потокораспределения является обобщающим развитием подхода, предложенного в середине 1970-х гг. В. Д. Ильиным применительно к электроэнергетическим системам [2]. В [2] задача моделирования потокораспределения в электрической сети энергосистемы поставлена как минимаксная задача без ограничений, для решения которой применен метод, предложенный в [3].

¹Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем, ilyin@res-plan.com

²Вычислительный центр им. А. А. Дородницына Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук, vdilyin@yandex.ru

1.1 Совершенствование человеко-машинной среды решения задач

С тех пор существенно усовершенствовано информационное обеспечение процессов планирования и управления в ОСС. Измерения контролируемых переменных, как правило, осуществляются с помощью цифровых приборов, а результаты измерений передаются по сетям.

Увеличиваются темпы применения технологий M2M (Machine-to-Machine) [4–6], IoT (Internet of Things) [7, 8] и IoS (Internet of Services) [9–11], которые становятся эффективным средством цифровизации экономики. Концепция IoT является развитием концепции M2M и специализацией более общей концепции IoS. При этом IoT-технологии — это по сути технологии облачной телеметрии и телеуправления [10].

Темпы распространения технологий M2M, IoT и IoS во многом определяются снижением стоимости вычислительных устройств и передачи данных, ростом доступности гибких систем хранения и анализа данных (благодаря развитию «облачных» технологий и технологий «больших данных»).

Увеличивается число M2M-, IoT- и IoS-применений в энергетике, сельском хозяйстве, промышленности, жилищно-коммунальном хозяйстве, транспорте, здравоохранении и других областях жизнедеятельности.

Внедряются технологии, позволяющие повысить эффективность управления энергопотреблением и транспортными потоками. Реализуются программы внедрения «умных счетчиков» для удаленного контроля энергопотребления.

Ожидается, что в ближайшие годы на смену нынешней системе «производство–передача–сбыт» придет система, элементы которой, взаимодействуя в режиме реального времени, «видят» друг друга, «понимают» возможности и потребности друг друга. Такая система позволяет выйти на принципиально новые уровни надежности и эффективности [8].

1.2 Запись формул и выделение фрагментов текста

Для записи формул, выделения определений и замечаний используются средства языка TSM-комплекса (TSM: Textual Symbolic Modeling) для описания текстовых моделей [12].

В данной статье используются следующие средства выделения фрагментов текста:

□ ⟨фрагмент описания⟩ □ ≈ утверждение (определение, аксиома и др.) Здесь и далее символ ≈ заменяет слово «означает»;

◇ ⟨фрагмент описания⟩ ◇ ≈ замечание.

Курсивом выделены первые вхождения названий понятий и фрагменты описания, к которым автор хочет привлечь внимание.

2 Постановка задачи

Пусть ОСС включает G производящих и S потребляющих узлов, соединенных L дугами. Полагая, что при фиксированной схеме сети и составе производящего оборудования потоки

$$y_i = \sum_g a_{ig}x_g + \sum_s b_{is}z_s \quad (i = 1, \dots, L)$$

по дугам линейно зависят от количества x_g производимого ($c_g \leq x_g \leq C_g$, $g = 1, \dots, G$, c_g и C_g — наименьшее и наибольшее допустимые значения для состава производящего оборудования, работающего в узле g) и количества z_s потребляемого продукта ($d_s \leq z_s \leq D_s$, $s = 1, \dots, S$, d_s и D_s — наименьшее и наибольшее значения для количества продукта, потребляемого в узле s), представим искомую модель в виде совокупности *обязательных* и *ориентирующих* правил [13], отражающих физико-технологические характеристики ОСС.

Правило, отражающее условие баланса в g -м производящем узле, к которому примыкает m_g дуг с номерами $r = 1, \dots, m_g$, имеет вид:

$$\left\{ \begin{aligned} & -\delta_g \leq x_g - \sum_r \left(\sum_g a_{rg}x_g + \sum_s b_{rs}z_s + s \right) \leq \delta_g[p_g]; \\ & c_g \leq x_g \leq C_g, \quad g = 1, \dots, G; \quad d_s \leq z_s \leq D_s, \quad s = 1, \dots, S; \quad 0 < p_g \leq \infty \end{aligned} \right\},$$

где δ_g — допустимая (по технологическим соображениям) величина ошибки баланса в узле g ; p_g — приоритет правила для g -го производящего узла (квадратные скобки указывают на необязательность применения).

Аналогичное правило для s -го потребляющего узла ($s = 1, \dots, S$), к которому примыкает m_s дуг с номерами $p = 1, \dots, m_s$:

$$\left\{ \begin{aligned} & -\delta_s \leq \sum_p \left(\sum_g a_{pg}x_g + \sum_s b_{ps}z_s \right) - z_s \leq \delta_s[p_s]; \\ & c_g \leq x_g \leq C_g, \quad g = 1, \dots, G; \quad d_s \leq z_s \leq D_s, \quad s = 1, \dots, S; \quad 0 < p_s \leq \infty \end{aligned} \right\},$$

где δ_s — допустимая (по технологическим соображениям) величина ошибки баланса в узле s ; p_s — приоритет правила для s -го потребляющего узла.

Правило, отражающее ограничение на пропускную способность дуги, имеет вид:

$$\left\{ \begin{aligned} 0 \leq \sum_g a_{ig} x_g + \sum_s b_{is} z_s \leq Y_i[p_i]; \quad i = 1, \dots, L; \\ c_g \leq x_g \leq C_g, \quad g = 1, \dots, G; \quad d_s \leq z_s \leq D_s, \quad s = 1, \dots, S; \quad 0 < p_i \leq \infty \end{aligned} \right\},$$

где Y_i — наибольшее допустимое значение потока продукта по i -й дуге; p_i — приоритет правила.

□ Правило считается *обязательным* (для выполнения при поиске параметров модели), если заданное для него значение приоритета равно ∞ . При иных значениях правило считается *ориентирующим* [13, 14]. □

Совокупность рассмотренных правил образует систему двусторонних линейных неравенств.

3 Метод решения и требования к его реализации

Для поиска параметров a_{ig} и b_{is} целесообразно применить *метод целевого перемещения решения*, разработанный и программно реализованный А. В. Ильиным [14].

Для удобства читателя кратко воспроизведем здесь этот метод (дальнейшие обозначения не связаны с обозначениями в разд. 2). Вектор искомым параметров обозначим через x .

Начальная точка (первый вариант решения) может быть выбрана экспертом произвольно. По умолчанию предлагается компромиссное решение (чебышёвская точка). Затем эксперт, проанализировав значения функций и оценив степень эффективности и реализуемости решения, может наложить на любые функции требования к их изменению. Величины изменений задают направление и дискрет перемещения в следующую точку. Кроме изменения можно задать и требование фиксации некоторой функции (когда значение функции устраивает эксперта и он хочет оставить его неизменным при дальнейшем перемещении). Таким образом эксперт пошагово приближается к решению, по его мнению, сочетающему эффективность и реализуемость. Любое решение (т. е. всякая точка траектории движения) может быть занесено в базу возможных планов для последующего анализа.

Шаг целевого перемещения решения выполняется следующим способом. Пусть $x' = (x'_1 \cdots x'_n)$ ($x'_j \geq 0$, $j = 1, \dots, n$) — решение, полученное на предыдущем шаге, и сформированы правила перемещения из x' в целевую точку $x = (x_1 \cdots x_n)$ ($x_j \geq 0$, $j = 1, \dots, n$): $\{F_i(x) = F_i(x') + h_i[p_i]\}$, где $F_i(x) = a_{i1}x_1 + \cdots + a_{in}x_n$, $i = 1, \dots, l$; $0 < p_i \leq \infty$ для $h_i \neq 0$, $p_i = \infty$ для $h_i = 0$.

Формально система правил может быть несовместной, поэтому правила с $h_i \neq 0$ рассматриваются как *ориентирующие*, а h_i — как *задающий шаг* (нередко

отличается от реального шага, который может быть получен для данного набора правил). Если реальные и задающие шаги имеют один и тот же знак для всех правил, новая точка в любом случае повышает эффективность решения.

Точка x отыскивается следующим образом. Сначала вычисляется проекция точки на гиперплоскость $a_{i1}x_1 + \dots + a_{in}x_n = F_i(x') + h_i \forall h_i \neq 0$. Направляющий вектор нормали к этой гиперплоскости равен $(a_{i1} \dots a_{in})$. Чтобы найти проекцию, необходимо дать переменным приращения $ha_{i1} \dots ha_{in}$ (где h — неизвестное число).

Перемещение по нормали дает приращение функции $h(a_{i1}^2 + \dots + a_{in}^2)$, которое должно быть равно h , так что $h = h_i/(a_{i1}^2 + \dots + a_{in}^2)$ (естественно, $a_{i1}^2 + \dots + a_{in}^2 \neq 0$). Таким образом получается проекция $(x'_1 + a_{i1}h_1/(a_{i1}^2 + \dots + a_{in}^2)) \dots (x'_n + a_{in}h_n/(a_{i1}^2 + \dots + a_{in}^2))$.

Когда проекции найдены $\forall h_i \neq 0$, ищутся требуемые приращения по всем переменным: $\Delta x_{ji} = a_{ij}h_i/(a_{i1}^2 + \dots + a_{in}^2)$ ($j = 1, \dots, n$; индексы функций пробегают значения от 1 до s , $1 \leq s \leq l$).

Далее вычисляется конец среднедействующей векторов-нормалей по формулам: $x_j = x'_j + (p_1\Delta x_{j1} + \dots + p_s\Delta x_{js})/(p_1 + \dots + p_s)$ ($j = 1, \dots, n$).

Такая точка «ближе» к тем гиперплоскостям, которые соответствуют правилам с более высокими приоритетами. Если приоритеты не были установлены, они полагаются равными 1, и получаются следующие формулы:

$$x_j = x'_j + \frac{\Delta x_{j1} + \dots + \Delta x_{js}}{s} \quad (j = 1, \dots, n).$$

Если $\exists k : h_k = 0$ ($1 \leq k \leq l$), конец среднедействующей проектируется на гиперплоскость $a_{k1}x_1 + \dots + a_{kn}x_n = F_k(x')$; в противном случае на роль искомой точки x претендует конец среднедействующей.

Затем контролируется неотрицательность переменных ($x_j \geq 0$, $j = 1, \dots, n$): отрицательные обнуляются.

И, наконец, проверяется совпадение знаков реальных и задающих шагов. Если они совпадают для всех правил, вычисленная точка считается целевой точкой x . Если не совпадают, эксперту предлагается скорректировать систему правил.

◇ Применение этого метода для вычисления параметров модели потокораспределения в ОСС предполагает, что синхронные замеры количества продукта в началах и концах дуг выполняются комплексом измерительных приборов, работающих по М2М-технологии. Временной дискрет замеров определяется с учетом специфики применяемых измерительных приборов (например, счетчиков электроэнергии) и потокораспределения в конкретной ОСС. Адекватность модели оценивается путем сравнения измеренных и вычисленных значений потоков по дугам ОСС. Частота оценки адекватности и необходимость построения обновленного варианта модели определяются экспертом. ◇

4 Заключение

1. Предложена линейная модель распределения потоков в ОСС, где доставка продукта осуществляется по дугам, связывающим производящие и потребляющие узлы. Модель рассчитана на реализацию в составе онлайн-сервиса планирования поставок в ОСС, где для построения модели применяются синхронные замеры количества продукта в началах и концах дуг, которые выполняются комплексом измерительных приборов, работающих по М2М-технологии.
2. Модель представлена системой обязательных и ориентирующих правил, отражающих физические и технологические характеристики ОСС (баланс в узлах сети, ограничения пропускной способности дуг и др.).
3. Для поиска параметров модели применен метод целевого перемещения решения, предназначенный для решения линейных задач ситуационного планирования и управления.

Литература

1. Цифровая экономика Российской Федерации: Программа, утвержденная Распоряжением Правительства Российской Федерации от 28 июля 2017 г. № 1632-р. 87 с. <http://d-russia.ru/wp-content/uploads/2017/07/programma-tsifrov-econ.pdf>.
2. Ильин В. Д., Куров Б. Н. Идентификация установившихся режимов электрической сети при управлении в условиях неполной информации // Электричество, 1976. № 1. С. 18–22.
3. Box M. J. A new method of constrained optimisation and comparison with other methods // Comput. J., 1965. Vol. 8. No. 1. P. 42–52.
4. Machine to machine (M2M) communications. IEEE, 2010. Technical Report 802.16p-10/0005.
5. Kim R. Y. Efficient wireless communications schemes for machine to machine communications // Comm. Com. Inf. Sc., 2011. Vol. 181. No. 3. P. 313–323.
6. Lien S. Y., Liao T. H., Kao C. Y., Chen K. C. Cooperative access class barring for machine-to-machine communications // IEEE T. Wirel. Commun., 2012. Vol. 11. No. 1. P. 27–32.
7. Perera C., Liu C. H., Jayawardena S. The emerging Internet of Things marketplace from an industrial perspective: A survey // IEEE T. Emerging Topics Computing, 2015. Vol. 3. No. 4. P. 585–598.
8. «Интернет вещей» (IoT) в России. Технология будущего, доступная уже сейчас. — PWC, 2017. https://www.pwc.ru/ru/publications/iot/IoT-inRussia-research_rus.pdf.
9. Герасимов А. От М2М к Интернету Сервисов, 2015. <http://www.iksmedia.ru/articles/5220957-Ot-M2M-k-internetu-servisov.html>.
10. Ильин А. В. Интернет-сервисы планирования ресурсов, 2016. <https://www.resplan.com>.
11. Internet Services. 2018. http://www.tutorialspoint.com/internet_technologies/internet_services.htm.

12. Ильин В. Д. Символьное моделирование // Большая российская энциклопедия, 2018. http://dev.bigenc.ru/technology_and_technique/text/4010980.
 13. Ильин А. В., Ильин В. Д. Интерактивный преобразователь ресурсов с изменяемыми правилами поведения // Информационные технологии и вычислительные системы, 2004. № 2. С. 67–77.
 14. Ильин А. В. Экспертное планирование ресурсов. — М.: ИПИ РАН, 2013. 58 с.
Поступила в редакцию 15.03.18
-
-

THE MODEL OF FLOWS DISTRIBUTION IN A SINGLE-PRODUCT NETWORK SYSTEM

A. V. Ilyin¹ and V. D. Ilyin²

¹State Research Institute of Aviation Systems, 7 Viktorenko Str., Moscow 125319, Russian Federation

²A. A. Dorodnicyn Computing Center, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 40 Vavilova Str., Moscow 119333, Russian Federation

Abstract: A linear model of the flows distribution in a single-product network system is proposed. The model is represented in the form of a system of mandatory and orienting rules, including a set of linear functions describing the distribution of product flows moving along the network arcs, depending on the product quantity sent from the producing nodes and the product quantity delivered to the consumption nodes. The system of rules reflects the physical and technological characteristics of the object (balance in the network nodes, limits of the arcs’ capacity, etc.). To find the model’s parameters, the method of targeted displacement of solution is applied. The measurements of quantities used in the problem solution are synchronously performed at the points of contiguity of the network’s arcs to the nodes.

Keywords: single-product network system; linear model of flows distribution; accounting of physical and technological characteristics of the object; system of mandatory and orienting rules; method of targeted displacement of solution

DOI: 10.14357/08696527180213

References

1. Government of the Russian Federation. 2017. The program “Digital Economy of the Russian Federation.” Approved by Government Order No.1632-r, July 28, 2017, 87 p. Available at: <http://d-russia.ru/wp-content/uploads/2017/07/programma-tsifrov-econ.pdf> (accessed March 4, 2018).
2. Ilyin, V. D., and B. N. Kurov. 1976. Identifikatsiya ustanovivshikhsya rezhimov elektricheskoy seti pri upravlenii v usloviyakh nepolnoy informatsii [Identification of steady-state electric network modes in the process of control under incomplete information]. *Elektrichestvo* [Electr. Technol. USSR] 1:18–22.

3. Box, M. J. 1965. A new method of constrained optimisation and comparison with other methods. *Comput. J.* 8(1):42–52.
4. IEEE. 2010. Machine to machine (M2M) communications. Technical Report 802.16p-10/0005.
5. Kim, R. Y. 2011. Efficient wireless communications schemes for machine to machine communications. *Comm. Com. Inf. Sc.* 181(3):313–323.
6. Lien, S. Y., T. H. Liau, C. Y. Kao, and K. C. Chen. 2012. Cooperative access class barring for machine-to-machine communications. *IEEE T. Wirel. Commun.* 11(1):27–32.
7. Pereyra, C., C. H. Liu, and S. Jayawardena. 2015. The emerging Internet of Things marketplace from an industrial perspective: A survey. *IEEE T. Emerging Topics Computing* 3(4):585–598. doi: 10.1109/TETC.2015.2390034.
8. PWC. 2017. “Internet veshchey” (IoT) v Rossii. Tekhnologiya budushchego, dostupnaya uzhe seychas [“Internet of Things” (IoT) in Russia. Technology of the future, available now]. Available at: https://www.pwc.ru/ru/publications/iot/IoT-inRussia-research_rus.pdf (accessed March 4, 2018).
9. Gerasimov, A. 2015. Ot M2M k Internetu Servisov [From M2M to Internet services]. Available at: <http://www.iksmedia.ru/articles/5220957-Ot-M2M-k-internetu-servisov.html> (accessed March 4, 2018).
10. Ilyin, A. V. 2016. Internet-servisy planirovaniya resursov [Online resource planning services]. Available at: <https://www.res-plan.com> (accessed March 4, 2018).
11. Internet Services. 2018. Available at: http://www.tutorialspoint.com/internet-technologies/internet_services.htm (accessed March 4, 2018).
12. Ilyin, V. D. 2018. Simvol’noe modelirovanie [Symbolic modeling]. *Bol’shaya Rossiyskaya entsiklopediya* [Great Russian Encyclopedia]. Available at: http://dev.bigenc.ru/technology_and_technique/text/4010980 (accessed March 4, 2018).
13. Ilyin, A. V., and V. D. Ilyin. 2004. Interaktivnyy preobrazovatel’ resursov s izmenyaemymi pravilami povedeniya [Interactive resource converter with customisable rules of behavior]. *Informatsionnye tekhnologii i vychislitel’nye sistemy* [Information Technologies and Computer Systems] 2:67–77.
14. Ilyin, A. V. 2013. *Ekspertnoe planirovanie resursov* [Expert resource planning]. Moscow: IPI RAN. 58 p. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/259654243> (accessed March 4, 2018).

Received March 15, 2018

Contributors

Ilyin Alexander V. (b. 1975) — Candidate of Science (PhD) in technology, leading engineer, State Research Institute of Aviation Systems, 7 Vikorenko Str., Moscow 125319, Russian Federation; ilyin@res-plan.com

Ilyin Vladimir D. (b. 1937) — Doctor of Science in technology, Professor, leading scientist, A. A. Dorodnicyn Computing Center, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, 40 Vavilova Str., Moscow 119333, Russian Federation; vdilyin@yandex.ru

ОБ ОДНОЙ РЕАЛИЗАЦИИ МЕТОДА ДИНАМИЧЕСКОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ О ЗАМЕНЕ ОБОРУДОВАНИЯ С ПОМОЩЬЮ ПРИКЛАДНОЙ ПРОГРАММЫ

*Е. В. Архангельская*¹

Аннотация: С развитием информационных технологий большое значение приобретают области знаний, связанные с прикладной информатикой. Средства и методы этой науки позволяют пользователям компьютерной техники создавать программные продукты для решения индивидуальных задач. Несмотря на обилие специальных пакетов программ, использующих математические методы при нахождении решений, зачастую возникает необходимость в создании собственных программных средств. Излагается процесс создания прикладной программы решения задачи о замене оборудования методом динамического программирования. Задача заключается в нахождении оптимальной стратегии при принятии решения о прекращении эксплуатации старого оборудования и приобретении нового. Большое число расчетов, возникающих при реализации решения данной задачи, предлагается автоматизировать с помощью программы, созданной в среде программирования VBA (Visual Basic for Applications).

Ключевые слова: динамическое программирование; пошаговый процесс; задача о замене оборудования; среда программирования VBA

DOI: 10.14357/08696527180214

1 Введение

Современные системы разработки программных продуктов и языки прикладного программирования позволяют пользователям компьютерных технологий, имеющим элементарные навыки программирования, создавать собственные программные средства для решения поставленных задач. Собственные программные разработки активно используются в учебном процессе для автоматизированного создания различных вариантов заданий по изучаемым темам, автоматической проверки правильности решения на компьютере, создания электронных пособий и тестовых программ и т. п. Выбор среды программирования каждым разработчиком осуществляется индивидуально в зависимости от доступности

¹Саратовская государственная юридическая академия, katysar@rambler.ru

программного продукта, возможности его использования на конкретных рабочих местах, изучаемых методов, а также от собственных предпочтений.

Использование информационных ресурсов в образовании — широко обсуждаемая тема в научных изданиях. Авторы разработок делятся опытом их применения в учебном процессе [1], анализируя эффективность и целесообразность использования компьютерных средств в обучении [2]. Большое внимание уделяется созданию программных обучающих средств с помощью широко доступных информационных и прикладных ресурсов [3, 4]. Признана эффективность использования мультимедийных эффектов в электронных учебниках как при изложении материала [5], так и при анализе решения практических задач [6]. Авторы учебных электронных ресурсов стремятся организовать их наиболее оптимальным образом для успешного усвоения изложенного в них материала учащимися [7].

В статье приводится описание создания программы для решения задачи о замене оборудования методом динамического программирования. Программный продукт представляет собой книгу Excel с разработанными процедурами в среде программирования VBA. В программе предусмотрен ввод данных, вывод всех необходимых расчетов и поэтапный вывод решения на экран, что позволяет использовать ее для решения однотипных задач и в качестве электронного пособия для изучения применения метода динамического программирования к задаче о замене оборудования.

2 Постановка задачи

Одной из задач динамического программирования является задача о замене оборудования. Задача заключается в нахождении оптимальной стратегии при принятии решения о прекращении эксплуатации старого оборудования и приобретении нового. При старении оборудования снижается производительность, увеличиваются затраты на изготовление продукции в связи с ремонтом и обслуживанием старого оборудования. Возникает необходимость определения оптимальных сроков замены старого оборудования, когда его эксплуатация становится невыгодной. При этом оптимальным критерием данной задачи, который нужно оптимизировать, может служить либо прибыль от эксплуатации оборудования, либо затраты на эксплуатацию оборудования. В первом случае критерий оптимальности следует максимизировать, во втором — минимизировать.

В рассматриваемой задаче основной характеристикой оборудования является его возраст, от которого зависят такие показатели, как производительность, затраты на производство, ликвидная стоимость и т. п. При принятии решения о замене оборудования период его эксплуатации разбивается на промежутки, и решение о замене принимается в начале каждого планового промежутка. Таким образом, процесс замены рассматривается как пошаговый процесс, на каждом шаге которого принимается решение либо о продолжении эксплуатации

оборудования, либо о замене новым. Именно такой подход к решению задачи позволяет применять методы оптимизации динамического программирования.

Опишем математическую модель задачи. Необходимо определить оптимальные сроки замены оборудования на предприятии в течение n лет для максимизации прибыли от эксплуатации оборудования. При этом известны следующие величины: $f(t)$ — стоимость продукции, производимой на оборудовании возраста t лет; $r(t)$ — затраты на эксплуатацию оборудования возраста t лет; $\varphi(t)$ — ликвидная стоимость оборудования возраста t лет; p — стоимость нового оборудования. Рассмотрим пошаговый процесс, состоящий из n шагов по числу лет, введем k — номер года от начала эксплуатации, $k = \overline{1, n}$. На каждом k -м шаге управление выбирается из следующих двух решений: u^c — сохранение и использование старого оборудования и u^3 — замена оборудования новым.

Параметром состояния системы ξ_k является возраст оборудования. В начале k -го шага возраст оборудования t может принимать значения $0, 1, 2, \dots, k-1$, т. е. $t \leq k-1$. Если к началу k -го шага состояние оборудования определяется параметром $\xi_{k-1} = t$, то при выборе управления u^c возраст оборудования увеличится на 1 год и система перейдет в состояние $\xi_k = t+1$. При выборе управления u^3 на k -м шаге система перейдет в состояние $\xi_k = 1$, так как замену произвели в начале года и к концу k -го года возраст оборудования равен одному году. Таким образом, уравнение состояния для данной задачи имеет следующий вид:

$$\xi_k = \begin{cases} \xi_{k-1} + 1 & \text{при } u_k = u^c; \\ 1 & \text{при } u_k = u^3. \end{cases}$$

В динамическом программировании процесс оптимизации состоит из двух этапов: условной и безусловной оптимизации. На этапе условной оптимизации на каждом шаге начиная с n -го необходимо найти условную прибыль при управлении u^c и управлении u^3 и выбрать из них наибольшую. При выборе сохранения оборудования на каждом шаге прибыль выражается формулой $f(t) - r(t)$, а при замене оборудования — $\varphi(t) + f(0) - p - r(0)$. Введем обозначение $Z_k^*(t)$ — условная максимальная прибыль, полученная за $n - k + 1$ шагов использования оборудования с k -го по n -й год включительно, если к началу k -го года возраст оборудования составлял t лет. Тогда на последнем шаге она определяется из соотношения:

$$Z_n^*(t) = \max \begin{cases} f(t) - r(t) & \text{при } u_k = u^c; \\ \varphi(t) + f(0) - p - r(0) & \text{при } u_k = u^3. \end{cases}$$

На всех остальных шагах $k = \overline{1, n-1}$ прибыль находится из рекуррентных формул:

$$Z_k^*(t) = \max \begin{cases} f(t) - r(t) + Z_{k+1}^*(t+1) & \text{при } u_k = u^c; \\ \varphi(t) + f(0) - p - r(0) + Z_{k+1}^*(1) & \text{при } u_k = u^3. \end{cases}$$

На этапе безусловной оптимизации, зная, что в начале планового периода возраст оборудования составляет t_0 лет, полагаем $\xi_0 = t_0$ и находим $Z_1^*(t_0)$, далее $u_1^* = u_1^*(t_0)$ и т. д. по цепочке. Оптимальное управление представляет собой набор управлений u^c и u^3 , выбранных на каждом шаге.

3 Программная реализация решения задачи

Рассмотрим задачу с числовыми данными. Необходимо определить сроки замены оборудования в течение 6 лет и полученный при этом максимальный доход, если основные характеристики оборудования заданы в виде таблицы. Стоимость нового оборудования будем рассматривать как функцию $p(t)$, предполагая, что она может повышаться.

Для разработки автоматического процесса решения поставленной задачи с помощью компьютерной техники предлагается использовать редактор электронных таблиц Microsoft Excel [8]. Выбор программного продукта, в первую очередь, обусловлен его широкой доступностью, в том числе в учебных заведениях. Во-вторых, исходные данные в рассматриваемой задаче представлены в виде таблицы, а также все расчеты на этапе условной оптимизации метода динамического программирования заносятся в таблицу, поэтому для ввода и вывода удобно использовать ячейки листа файла Excel и не хранить дополнительные переменные и массивы данных. Программа Excel предоставляет большой набор функций, а также возможность программирования для нахождения решения поставленной задачи. Исходные данные задачи можно занести, например, в ячейки A1:G6 на лист файла Excel.

4 Этап условной оптимизации

В данной задаче плановый период разбивается на 6 шагов, т. е. в начале каждого года принимается решение о замене или использовании оборудования.

Для выполнения расчетов на этапе условной оптимизации исходные данные удобнее ввести в таблицу на листе файла Excel, как показано на рис. 1, и добавить в таблицу дополнительные строки вычисления величин $f(t) - r(t)$ и $\varphi(t) + f(0) - p(t) - r(0)$. Значения в ячейки B7:G8 можно вычислить путем ввода формул или при выполнении программного кода.

На последнем шестом шаге условной оптимизации, принимая во внимание, что к последнему году возраст оборудования может составлять $t = 0, 1, 2, 3, 4, 5$ лет, величина критерия оптимальности Z_6^* согласно формуле для каждого значения t определяется как максимум содержимого двух соответствующих ячеек седьмой и восьмой строк; например, для $t = 0$ как максимум ячеек B7 и B8. В программной разработке все расчеты и выбор оптимального управления осуществляются при выполнении специально написанного кода. Для его запуска в файле Excel создана кнопка с надписью «Условная оптимизация», при нажатии которой

	A	B	C	D	E	F	G
1	Исходные данные						
2	t	0	1	2	3	4	5
3	$f(t)$	20	20	18	18	17	15
4	$r(t)$	2	3	3	4	6	8
5	$p(t)$	10	10	11	11	12	12
6	$\varphi(t)$	7	5	4	4	2	2
7	$f(t) - r(t)$	18	17	15	14	11	7
8	$\varphi(t) + f(0) - p(t) - r(0)$	15	13	11	11	8	8

Рис. 1 Исходные данные задачи и дополнительные расчеты в файле Excel

происходит заполнение ячеек B10:G15 соответствующими результатами расчетов. Фрагмент программного кода для определения значений Z_6^* и заполнения B10:G10 ячеек представлен ниже:

```

For t = 0 To 5
  If (Cells(7, 2 + t) > Cells(8, 2 + t)) Then
    Sheets("Лист2").Cells(10, 2 + t) = Cells(7, 2 + t)
    Cells(10, 2 + t) = CStr(Cells(7, 2 + t)) + " / uc"
    Cells(10, 2 + t).Characters(Len(Cells(10, 2 + t).Value) - 1, 1).Font.Italic
    = True
    Cells(10, 2 + t).Characters(Len(Cells(10, 2 + t).Value), 1).Font.Superscript
    = True
  Else
    Sheets("Лист2").Cells(10, 2 + t) = Cells(8, 2 + t)
    Cells(10, 2 + t) = CStr(Cells(8, 2 + t)) + " / uz"
    Cells(10, 2 + t).Characters(Len(Cells(10, 2 + t).Value) - 1, 1).Font.Italic
    = True
    Cells(10, 2 + t).Characters(Len(Cells(10, 2 + t).Value), 1).Font.Superscript
    = True
  End If
Next t

```

На рис. 2 представлены расчеты условной оптимизации данной задачи.

	A	B	C	D	E	F	G
...	...	...	...	...	...	...	...
7	$f(t) - r(t)$	18	17	15	14	11	7
8	$\varphi(t) + f(0) - p(t) - r(0)$	15	13	11	11	8	8
9	Результаты условной оптимизации						
10	Z_6^*	$18/u^c$	$17/u^c$	$15/u^c$	$14/u^c$	$11/u^c$	$8/u^3$
11	Z_5^*	$35/u^c$	$32/u^c$	$29/u^c$	$28/u^3$	$25/u^3$	
12	Z_4^*	$50/u^c$	$46/u^c$	$43/u^3$	$43/u^3$		
13	Z_3^*	$64/u^c$	$60/u^c$	$58/u^c$			
14	Z_2^*	$78/u^c$	$75/u^c$				
15	Z_1^*	$93/u^c$					

Рис. 2 Расчеты, полученные на этапе условной оптимизации

В представленном программном коде внутри цикла вычисляются числовые значения критерия оптимальности и записываются в ячейки листа Лист2, которые не видны пользователю, чтобы их можно было использовать в вычислениях на следующих шагах условной оптимизации. В ячейки B10:G10 записываются текстовые строки, содержащие значение критерия оптимальности и оптимальное управление — u^c или u^3 (см. рис. 2). Для того чтобы запись выглядела, как в классических учебниках, с помощью свойств Italic и Superscript предпоследнему символу строки устанавливается начертание курсивом, а последнему — видоизменение шрифта «надстрочный». С помощью функции CStr осуществляется преобразование числового формата в строковый.

Значения Z_5^* вычисляются согласно формуле в предположении, что к началу пятого года возраст оборудования может составлять $t = 0, 1, 2, 3, 4$ года. Алгоритм вычислений следующий: определяются два значения, первое равно сумме ячейки седьмой строки (значение $f(t) - r(t)$) при соответствующей величине t и ячейки десятой строки (значение Z_6^*) при $t + 1$, т. е. ячейки десятой строки и следующего столбца за тем, в котором ведется вычисление; например, для $t = 0$ искомое значение равно B7 + C10. Второе значение определяется как сумма ячейки восьмой строки (значение $\varphi(t) + f(0) - p(t) - r(0)$) при соответствующей величине t и ячейки десятой строки (значение Z_6^*) при $t = 1$, т. е. ячейки десятой строки и второго столбца с числовыми данными (ячейка C10); например, для $t = 0$ искомое значение равно B8 + C10. Наибольшая из двух найденных величин является значением критерия оптимальности Z_5^* при каждом t . Аналогично проводятся вычисления на остальных шагах условной оптимизации. Расчеты в ячейках B11:G15 (см. рис. 2) также осуществляются в результате выполнения программного кода, принцип работы которого аналогичен коду, описанному выше. Для вычисления оптимальных значений критерия для шагов 1–5 организуется цикл от 1 до 5 по переменной i и внутренний цикл по переменной t от 0 до $5 - i$. По формулам определяются числовые значения, которые записываются в ячейки Листа2 для следующих вычислений, в ячейки текущего листа записываются результат и оптимальное управление на данном шаге, затем нужные символы оформляются курсивом и задается надстрочное видоизменение шрифта. Все результаты расчетов, полученные на этапе условной оптимизации, приведены на рис. 2.

5 Этап безусловной оптимизации

На этапе безусловной оптимизации, как уже говорилось выше, определяется получаемая максимальная прибыль и оптимальное управление, которое представляет собой набор управлений u^c и u^3 . В поставленной задаче предполагается, что к началу первого года эксплуатации оборудование является новым, т. е. к началу процесса $\xi_0^* = t_0 = 0$. Все расчеты на этапе условной оптимизации (см. рис. 2) сделаны исходя из этого предположения. Таким образом, получаем, что оптимальное значение критерия эффективности, т. е. максимальная

	A	B	C	D		A	B	C	D
...					...				
10	Z_6^*	$18/u^c$	$17/u^c$	$15/u^c$	...	Z_6^*	$18/u^c$	$17/u^c$	$15/u^c$
11	Z_5^*	$35/u^c$	$32/u^c$	$29/u^c$		Z_5^*	$35/u^c$	$32/u^c$	$29/u^c$
12	Z_4^*	$50/u^c$	$46/u^c$	$43/u^3$		Z_4^*	$50/u^c$	$46/u^c$	$43/u^3$
13	Z_3^*	$64/u^c$	$60/u^c$	$58/u^c$		Z_3^*	$64/u^c$	$60/u^c$	$58/u^c$
14	Z_2^*	$78/u^c$	$75/u^c$			Z_2^*	$78/u^c$	$75/u^c$	
15	Z_1^*	$93/u^c$				Z_1^*	$93/u^c$		

Рис. 3 Последовательное отображение ячеек с оптимальным управлением на каждом шаге

прибыль $Z_{\max} = Z_1^*(0)$, — это единственное значение Z_1^* , получаемое в ячейке В15.

Алгоритм нахождения вектора оптимального управления

$$U^* = (u_1^*, u_2^*, \dots, u_n^*)$$

заключается в следующем: начиная с ячейки В15 получаем оптимальное управление на первом этапе u_1^* . Если $u_k^* = u^c$, то оптимальное управление на следующем этапе $k + 1$ находится в ячейке, расположенной выше по строке и правее по столбцу; если $u_k^* = u^3$, то оптимальное управление на следующем этапе записано в ячейке, расположенной во втором столбце таблицы значений, т. е. в столбце С, и выше по строке. Нахождение оптимального управления на этапе безусловной оптимизации в данной разработке осуществляется с помощью программного кода, выполняемого при нажатии кнопки с надписью «Безусловная оптимизация». Для наглядного визуального показа процесса нахождения вектора оптимального решения используется последовательное отображение компонент вектора путем выделения содержимого соответствующих ячеек. Последовательное отображение осуществляется с помощью специальных команд, обеспечивающих задержку времени перед выделением очередной ячейки, таким образом создается подобие эффекта анимации [9]. Опишем процесс, видимый пользователю на экране. При нажатии кнопки «Безусловная оптимизация» происходит заливка ячейки В15 с максимальной в желтый цвет, затем через временной промежуток, установленный в 1 с, происходит заливка ячейки С14 (рис. 3).

Фрагмент программного кода, обеспечивающего последовательное отображение ячеек с элементами вектора оптимального управления, представлен ниже:

```

PauseTime = 1
Start = Timer
Range("B15").Interior.Color = RGB(255, 255, 0)
Do While Timer < Start + PauseTime
Loop
Start = Start + PauseTime
s = "U* = (" + Mid(Range("B15"), Len(Range("B15").Value) - 1, 2)
k = 2

```

```

For i = 1 To 5
  If Mid(Cells(15 - i + 1, k), Len(Cells(15 - i + 1, k).Value), 1) = "c" Then
    k = k + 1
    Cells(15 - i, k).Interior.Color = RGB(255, 255, 0)
    (...)
    s = s + ", " + Mid(Cells(15 - i, k), Len(Cells(15 - i, k).Value) - 1, 2)
  Else
    Cells(15 - i, 3).Interior.Color = RGB(255, 255, 0)
    k = 3
    (...)
    s = s + ", " + Mid(Cells(15 - i, 3), Len(Cells(15 - i, 3).Value) - 1, 2)
  End If
Next i
s = s + ")"
Range("B17") = s

```

В программном коде операторы в строках, выделенных курсивом, обеспечивают задержку времени. Фрагмент, отвечающий за задержку времени, дублируется во всех строках, в которых стоит многоточие. В заключение работы программы в ячейке B17 формируется вектор оптимального управления. Окончательный результат работы программы и решения задачи представлен на рис. 4.

10	Z_6^*	$18/u^c$	$17/u^c$	$15/u^c$	$14/u^c$	$11/u^c$	$8/u^3$
11	Z_5^*	$35/u^c$	$32/u^c$	$29/u^c$	$28/u^3$	$25/u^3$	
12	Z_4^*	$50/u^c$	$46/u^c$	$43/u^3$	$43/u^3$		
13	Z_3^*	$64/u^c$	$60/u^c$	$58/u^c$			
14	Z_2^*	$78/u^c$	$75/u^c$				
15	Z_1^*	$93/u^c$					
16							
17	Оптимальное управление	$U^* = (u^c, u^c, u^c, u^3, u^c, u^c)$					
18	Максимальная прибыль	93					

Рис. 4 Результаты решения задачи

Таким образом, разработанный программный продукт позволяет найти решение большого класса однотипных задач об оптимальных сроках замены оборудования в течение шести лет с различными числовыми исходными данными (см. рис. 1) при условии, что в начале планового периода оборудование является новым, получить результаты расчетов условной оптимизации и наглядно просмотреть процесс формирования вектора оптимального управления.

6 Заключение

Разработанная прикладная программа, описанная в статье, применяется для составления задач о замене оборудования и их решения методом динамического программирования. Для ее разработки используется широкодоступный таблич-

ный редактор Microsoft Excel, сама программа представляет собой файл Excel с поддержкой макросов, что делает возможным ее использование на многих компьютерах. Программный продукт обеспечивает возможность задавать исходные данные, тем самым составлять различные варианты задач, вывод результатов расчета на экран и показ формирования решения задачи в мультимедийном режиме. Все вышесказанное позволяет использовать данную прикладную программу еще и в качестве учебного пособия при изучении методов динамического программирования на занятиях, а также для самостоятельного и дистанционного обучения. Программа используется автором на занятиях в компьютерных классах, причем пользователям сначала предлагается решить поставленную задачу о замене оборудования самостоятельно, затем полученный ответ сравнивается с результатом, полученным в ходе выполнения программы. В случае затруднения предлагается просмотреть этапы решения задачи и выявить ошибки.

Литература

1. Федосеев А. А. Электронные образовательные ресурсы: эффективность применения // Системы и средства информатики, 2012. Т. 22. № 2. С. 263–277.
2. Корчажкина О. М. К оценке эффективности учебно-познавательной деятельности учащихся с использованием информационных технологий // Информатика и её применения, 2015. Т. 9. Вып. 1. С. 106–117.
3. Панюкова А. А., Макаровских Т. А., Дударева В. И. Обучение компьютерной графике с использованием свободно распространяемого программного обеспечения // Прикладная информатика, 2014. №6(54). С. 37–46.
4. Шигина Н. А. Облачные инструменты разработки программного обеспечения в учебном процессе вуза // Прикладная информатика, 2016. Т. 11. № 2(62). С. 41–56.
5. Архангельская Е. В. Об одном программном средстве мультимедийной поддержки учебных курсов по информатике // Прикладная информатика, 2017. Т. 12. № 4(70). С. 74–80.
6. Корчажкина О. М. Роль мультимедиамодалности в когнитивных электронных обучающих средах // Информатика и образование, 2016. № 6(275). С. 36–39.
7. Федосеев А. А. К вопросу об уменьшении объема порций учебного материала при электронном обучении // Информатика и её применения, 2016. Т. 10. Вып. 3. С. 105–110.
8. Архангельская Е. В. Компьютерная реализация метода динамического программирования // Наука России: Цели и задачи: Сб. научн. тр. по мат-лам IV Междунар. научн.-практич. конф. — Екатеринбург: Л-Журнал, 2017. Ч. 2. С. 13–17.
9. Архангельская Е. В. Компьютерная программа для обучения переводу чисел в различные системы счисления // Современные концепции развития науки: Сб. статей Междунар. научн.-практич. конф. — Уфа: АЭТЕРНА, 2016. Ч. 2. С. 11–16.

Поступила в редакцию 14.02.18

ABOUT AN IMPLEMENTATION OF THE METHOD OF DYNAMIC PROGRAMMING TO SOLVE THE PROBLEM OF EQUIPMENT REPLACEMENT WITH AN APPLICATION PROGRAM

E. Arkhangelskaya

Saratov State Law Academy, 104 Chernyshevskiy Str., Saratov 410056, Russian Federation

Abstract: With the development of information technologies, the fields of knowledge related to applied informatics are of great importance. The tools and methods of this science allow users of the computer technology to create software products for solving individual problems. Despite the abundance of special software packages that use mathematical methods to find solutions, there is often a need to create your own software. The article describes the process of creating an application program for solving the problem of replacing equipment by the method of dynamic programming. The task is to find the optimal strategy when deciding to stop using old equipment and acquire the new one. It is proposed to automate calculations that arise when implementing a solution to this problem with the help of a program created in the VBA (Visual Basic for Applications) programming environment.

Keywords: dynamic programming; step-by-step process; problem of replacement of equipment; VBA programming environment

DOI: 10.14357/08696527180214

References

1. Fedoseev, A. A. 2012. Elektronnye obrazovatel'nye resursy: effektivnost' primeneniya [Electronic educational resources: Efficiency of application]. *Sistemy i Sredstva Informatiki* — *Systems and Means of Informatics* 22(2):263–277.
2. Korchazhkina, O. M. 2015. K otsenke effektivnosti uchebno-poznavatel'noy deyatelnosti uchashchikhsya s ispol'zovaniem informatsionnykh tekhnologiy [On access to the efficiency of students' cognitive activities while using the new information technologies]. *Informatika i ee Primeneniya* — *Inform. Appl.* 1:106–117.
3. Panyukova, A., T. Makarovskikh, and V. Dudareva. 2014. Obuchenie komp'yuternoy grafike s ispol'zovaniem svobodno rasprostranyaemogo programmogo obespecheniya [On the experience of computer graphics lessons using free software]. *Prikladnaya informatika* [Applied Informatics] 6(54):37–46.
4. Shigina, N. 2016. Oblachnye instrumenty razrabotki programmogo obespecheniya v uchebnom protsesse vuza [Cloud software development tools in the educational process of the university]. *Prikladnaya informatika* [Applied Informatics] 11(2(62)):41–56.
5. Arkhangelskaya, E. V. 2017. Ob odnom programmnom sredstve mul'timediynoy podderzhki uchebnykh kursov po informatike [Multimedia software development in the educational process]. *Prikladnaya informatika* [Applied Informatics] 12(4(70)):74–80.

6. Korchazhkina, O. M. 2016. Rol' mul'timediamodal'nosti v kognitivnykh elektronnykh obuchayushchikh sredakh [The role of multimedia in cognitive modality of e-learning environments]. *Informatika i obrazovanie* [Informatics and Education] 6(275):36–39.
7. Fedoseev, A. A. 2016. K voprosu ob umen'shenii ob"ema portsiy uchebnogo materiala pri elektronnom obuchenii [What is behind the concept of "Knowledge in small packages"]. *Informatika i ee Primeneniya — Inform. Appl.* 10(3):105–110.
8. Arkhangelskaya, E. V. 2017. Komp'yuternaya realizatsiya metoda dinamicheskogo programmirovaniya [Computer implementation of the method of dynamic programming]. *Tr. 4-go Mezhdunar. Simpoziuma "Nauka Rossii: tseli i zadachi"* [4th Symposium (International) "Russian Science: Goals and Objectives" Proceedings]. Ekaterinburg: LJJournal. 2:13–17.
9. Arkhangelskaya, E. V. 2016. Komp'yuternaya programma dlya obucheniya perevodu chisel v razlichnye sistemy schisleniya [Computer program for learning to translate numbers in different number systems]. *Tr. Mezhdunar. Simpoziuma "Sovremennye kontseptsii razvitiya nauki"* [Symposium (International) "The Modern Concepts of Development of Science" Proceedings]. Ufa: AETERNA. 2:11–16.

Received February 14, 2018

Contributor

Arkhangelskaya Ekaterina V. (b. 1974) — Candidate of Sciences (PhD) in physics and mathematics, associate professor, Saratov State Law Academy, 104 Chernyshevskiy Str., Saratov 410056, Russian Federation; katysar@rambler.ru

ОБ АВТОРАХ

Абрамов Геннадий Владимирович (р. 1960) — доктор технических наук, профессор Воронежского государственного университета

Андреева Ольга Вячеславовна (р. 1989) — кандидат технических наук, ассистент кафедры «Ядерные реакторы и энергетические установки» Нижегородского государственного технического университета им. Р. Е. Алексеева

Архангельская Екатерина Владиславовна (р. 1974) — кандидат физико-математических наук, доцент Саратовской государственной юридической академии

Багиров Мираббас Бахтияр оглы (р. 1995) — магистрант Нижегородского государственного технического университета им. Р. Е. Алексеева

Борисов Андрей Владимирович (р. 1965) — доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник Института проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Босов Алексей Вячеславович (р. 1969) — доктор технических наук, главный научный сотрудник Института проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Воронин Алексей Владимирович (р. 1968) — кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник Института проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Гаврилов Александр Николаевич (р. 1965) — кандидат технических наук, доцент кафедры информационных и управляющих систем Воронежского государственного университета инженерных технологий

Грушо Александр Александрович (р. 1946) — доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник Института проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Грушо Николай Александрович (р. 1982) — кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Института проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Данькина Анастасия Александровна (р. 1996) — студентка Нижегородского государственного технического университета им. Р. Е. Алексеева

Дулин Сергей Константинович (р. 1950) — доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник Института проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук; главный научный сотрудник Научно-исследовательского и проектно-конструкторского института информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте (ОАО «НИИАС»)

Дулина Наталья Георгиевна (р. 1947) — кандидат технических наук, ведущий программист Вычислительного центра им. А. А. Дородницына Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Забежайло Михаил Иванович (р. 1956) — доктор физико-математических наук, доцент, заведующий лабораторией Вычислительного центра им. А. А. Дородницына Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Зацаринный Александр Алексеевич (р. 1951) — доктор технических наук, заместитель директора Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук (ФИЦ ИУ РАН); главный научный сотрудник Института проблем информатики ФИЦ ИУ РАН

Зацман Игорь Моисеевич (р. 1952) — доктор технических наук, заведующий отделом Института проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Иванов Алексей Владимирович (р. 1976) — главный специалист Института проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Ильин Александр Владимирович (р. 1975) — кандидат технических наук, ведущий инженер Государственного научно-исследовательского института авиационных систем

Ильин Владимир Дмитриевич (р. 1937) — доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник Вычислительного центра им. А. А. Дородницына Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Ионенков Юрий Сергеевич (р. 1956) — старший научный сотрудник Института проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Королёв Сергей Павлович (р. 1985) — научный сотрудник Вычислительного центра Дальневосточного отделения Российской академии наук

Леонтьев Денис Васильевич (р. 1992) — аспирант Института автоматики и процессов управления Дальневосточного отделения Российской академии наук

Мальковский Сергей Иванович (р. 1983) — научный сотрудник Вычислительного центра Дальневосточного отделения Российской академии наук

Низамутдинов Марсель Малихович (р. 1976) — кандидат технических наук, доцент, заведующий сектором Института социально-экономических исследований Уфимского Федерального исследовательского центра 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

Орешников Владимир Владимирович (р. 1986) — кандидат экономических наук, старший научный сотрудник Института социально-экономических исследований Уфимского Федерального исследовательского центра Российской академии наук

Романова Ираида Мстиславовна (р. 1961) — ведущий программист Института вулканологии и сейсмологии Дальневосточного отделения Российской академии наук

Синицын Владимир Игоревич (р. 1968) — доктор физико-математических наук, доцент, главный научный сотрудник Института проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Синицын Игорь Николаевич (р. 1940) — доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, главный научный сотрудник Института проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Сорокин Алексей Анатольевич (р. 1980) — ведущий научный сотрудник Вычислительного центра Дальневосточного отделения Российской академии наук

Тарасов Георгий Витальевич (р. 1977) — научный сотрудник Института автоматики и процессов управления Дальневосточного отделения Российской академии наук

Тимонина Елена Евгеньевна (р. 1952) — доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник Института проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Федорова Татьяна Олеговна (р. 1997) — студентка Нижегородского государственного технического университета им. Р. Е. Алексеева

Харитонов Дмитрий Иванович (р. 1973) — кандидат технических наук, старший научный сотрудник Института автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения Российской академии наук

Чавтараев Рустам Баширович (р. 1972) — главный специалист Института проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук

Шевелёва Мария Михайловна (р. 1996) — студентка Нижегородского государственного технического университета им. Р. Е. Алексеева

Правила подготовки рукописей статей для публикации в журнале «Системы и средства информатики»

Журнал «Системы и средства информатики» публикует теоретические, обзорные и дискуссионные статьи, посвященные научным исследованиям и разработкам в области информационных технологий.

Журнал издается на русском языке. По специальному решению редколлегии отдельные статьи могут печататься на английском языке.

Тематика журнала охватывает следующие направления:

- информационно-телекоммуникационные системы и средства их построения;
- архитектура и программное обеспечение вычислительных машин, комплексов и сетей;
- методы и средства защиты информации.

1. В журнале печатаются статьи, содержащие результаты, ранее не опубликованные и не предназначенные к одновременной публикации в других изданиях.

Публикация предоставленной автором(ами) рукописи не должна нарушать положений глав 69, 70 раздела VII части IV Гражданского кодекса, которые определяют права на результаты интеллектуальной деятельности и средства индивидуализации, в том числе авторские права, в РФ.

Ответственность за нарушение авторских прав, в случае предъявления претензий к редакции журнала, несут авторы статей.

Направляя рукопись в редакцию, авторы сохраняют свои права на данную рукопись и при этом передают учредителям и редколлегии журнала неисключительные права на издание статьи на русском языке (или на языке статьи, если он отличен от русского) и на перевод ее на английский язык, а также на ее распространение в России и за рубежом. Каждый автор должен представить в редакцию подписанный с его стороны «Лицензионный договор о передаче неисключительных прав на использование произведения», текст которого размещен по адресу <http://www.ipiran.ru/publications/licence.doc>. Этот договор может быть представлен в бумажном (в 2-х экз.) или в электронном виде (отсканированная копия заполненного и подписанного документа).

Редколлегия вправе запросить у авторов экспертное заключение о возможности публикации представленной статьи в открытой печати.

2. К статье прилагаются данные автора (авторов) (см. п. 8). При наличии нескольких авторов указывается фамилия автора, ответственного за переписку с редакцией.
3. Редакция журнала осуществляет экспертизу присланных статей в соответствии с принятой в журнале процедурой рецензирования.

Возвращение рукописи на доработку не означает ее принятия к печати.

Доработанный вариант с ответом на замечания рецензента необходимо прислать в редакцию.

4. Решение редколлегии о публикации статьи или ее отклонении сообщается авторам. Редколлегия может также направить авторам текст рецензии на их статью. Дискуссия по поводу отклоненных статей не ведется.

5. Редактура статей высылается авторам для просмотра. Замечания к редакции должны быть присланы авторами в кратчайшие сроки.
6. Рукопись предоставляется в электронном виде в форматах MS WORD (.doc или .docx) или L^AT_EX (.tex), дополнительно — в формате .pdf, на дискете, лазерном диске или электронной почтой. Предоставление бумажной рукописи необязательно.
7. При подготовке рукописи в MS Word рекомендуется использовать следующие настройки.

Параметры страницы: формат — А4; ориентация — книжная; поля (см): внутри — 2,5, снаружи — 1,5, сверху и снизу — 2, от края до нижнего колонтитула — 1,3.

Основной текст: стиль — «Обычный», шрифт — Times New Roman, размер — 14 пунктов, абзацный отступ — 0,5 см, 1,5 интервала, выравнивание — по ширине.

Рекомендуемый объем рукописи — не свыше 15 страниц указанного формата. При превышении указанного объема редколлегия вправе потребовать от автора сокращения объема рукописи.

Сокращения слов, помимо стандартных, не допускаются. Допускается минимальное количество аббревиатур.

Все страницы рукописи нумеруются.

Шаблоны примеров оформления представлены в Интернете:
<http://www.ipiran.ru/publications/collected/template.doc>
8. Статья должна содержать следующую информацию на **русском и английском языках**:
 - название статьи;
 - Ф.И.О. авторов, на английском можно только имя и фамилию;
 - место работы, с указанием города и страны и электронного адреса каждого автора;
 - сведения об авторах, в соответствии с форматом, образцы которого представлены на страницах:
http://www.ipiran.ru/journal/collected/2012_22_02_rus/authors.asp и
http://www.ipiran.ru/journal/collected/2012_22_02_eng/authors.asp;
 - аннотация (не менее 100 слов на каждом из языков). Аннотация — это краткое резюме работы, которое может публиковаться отдельно. Она является основным источником информации в информационных системах и базах данных. Английская аннотация должна быть оригинальной, может не быть дословным переводом русского текста и должна быть написана хорошим английским языком. В аннотации не должно быть ссылок на литературу и, по возможности, формул;
 - ключевые слова — желательно из принятых в мировой научно-технической литературе тематических тезаурусов. Предложения не могут быть ключевыми словами.
 - источники финансирования работы (ссылки на гранты, проекты, поддерживающие организации и т. п.).
9. Требования к спискам литературы.

Ссылки на литературу в тексте статьи нумеруются (в квадратных скобках) и располагаются в каждом из списков литературы в порядке первых упоминаний.

Списки литературы представляются в двух вариантах:

- (1) **Список литературы к русскоязычной части.** Русские и английские работы — на языке и в алфавите оригинала.
- (2) **References.** Русские работы и работы на других языках — в латинской транслитерации с переводом на английский язык; английские работы и работы на других языках — на языке оригинала.

Необходимо для составления списка “References” пользоваться размещенной на сайте <http://www.translit.net/ru/bgn/> бесплатной программой транслитерации русского текста в латиницу.

Список литературы “References” приводится полностью отдельным блоком, повторяя все позиции из списка литературы к русскоязычной части, независимо от того, имеются или нет в нем иностранные источники. Если в списке литературы к русскоязычной части есть ссылки на иностранные публикации, набранные латиницей, они полностью повторяются в списке “References”.

Примеры ссылок на различные виды публикаций в списке “References”:

Описание статьи из журнала:

Zhang, Z., and D. Zhu. 2008. Experimental research on the localized electrochemical micromachining. *Rus. J. Electrochem.* 44(8):926–930. doi:10.1134/S1023193508080077.

Описание статьи из электронного журнала:

Swaminathan, V., E. Lepkoswka-White, and B. P. Rao. 1999. Browsers or buyers in cyberspace? An investigation of electronic factors influencing electronic exchange. *JCMC* 5(2). Available at: <http://www.ascusc.org/jcmc/vol5/issue2/> (accessed April 28, 2011).

Описание материалов конференций:

Usmanov, T. S., A. A. Gusmanov, I. Z. Mullagalin, R. Ju. Muhametshina, A. N. Chervyakova, and A. V. Sveshnikov. 2007. Osobennosti proektirovaniya razrabotki mestorozhdeniy s primeneniem gidrorazryva plasta [Features of the design of field development with the use of hydraulic fracturing]. *Trudy 6-go Mezhdunarodnogo Simpoziuma “Novye resursoberegayushchie tekhnologii nedropol’zovaniya i povyshe-niya neftegazootdachi”* [6th Symposium (International) “New Energy Saving Subsoil Technologies and the Increasing of the Oil and Gas Impact” Proceedings]. Moscow. 267–272.

Описание книги (монографии, сборники):

Lindorf, L. S., and L. G. Mamikonians, eds. 1972. *Ekspluatatsiya turbogeneratorov s neposredstvennym okhlazhdeniem* [Operation of turbine generators with direct cooling]. Moscow: Energy Publs. 352 p.

Описание переводной книги (в списке литературы к русскоязычной части необходимо указать: / Пер. с англ. — после названия книги, а в конце ссылки указать оригинал книги в круглых скобках):

1. В русскоязычной части:
Тимошенко С. П., Янг Д. Х., Уивер У. Колебания в инженерном деле / Пер. с англ. — М.: Машиностроение, 1985. 472 с. (*Timoshenko S. P., Young D. H., Weaver W. Vibration problems in engineering. — 4th ed. — N.Y.: Wiley, 1974. 521 p.*)

2. В англоязычной части:

Timoshenko, S. P., D. H. Young, and W. Weaver. 1974. *Vibration problems in engineering*. 4th ed. N.Y.: Wiley. 521 p.

Описание неопубликованного документа:

Latypov, A. R., M. M. Khasanov, and V. A. Baikov. 2004. Geology and production (NGT GiD). Certificate on official registration of the computer program No. 2004611198. (In Russian, unpubl.)

Описание интернет-ресурса:

Pravila tsitirovaniya istochnikov [Rules for the citing of sources]. Available at: <http://www.scribd.com/doc/1034528/> (accessed February 7, 2011).

Описание диссертации или автореферата диссертации:

Semenov, V. I. 2003. Matematicheskoe modelirovaniye plazmy v sisteme kompaktnyy tor [Mathematical modeling of the plasma in the compact torus]. D.Sc. Diss. Moscow. 272 p.

Kozhunova, O. S. 2009. Tekhnologiya razrabotki semanticheskogo slovary informat-sionnogo 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 golovkoy samonavedeniya [The way to orient on the roll of aircraft with optical homing head]. Patent RF No. 2280590.

10. Присланные в редакцию материалы авторам не возвращаются.

11. При отправке файлов по электронной почте просим придерживаться следующих правил:

- указывать в поле subject (тема) название журнала и фамилию автора;
- использовать attach (присоединение);
- в состав электронной версии статьи должны входить: файл, содержащий текст статьи, и файл(ы), содержащий(е) иллюстрации.

12. Журнал «Системы и средства информатики» является некоммерческим изданием. Плата за публикацию не взимается, гонорар авторам не выплачивается.

Адрес редакции журнала «Системы и средства информатики»:

Москва 119333, ул. Вавилова, д. 44, корп. 2, ФИЦ ИУ РАН

Тел.: +7 (499) 135-86-92 Факс: +7 (495) 930-45-05

e-mail: rust@ipiran.ru (Сейфуль-Мулюков Рустем Бадриевич)

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

Requirements for manuscripts submitted to Journal “Systems and Means of Informatics”

Journal “Systems and Means of Informatics” publishes theoretical, review, and discussion articles on the research and development in the field of information technology.

The journal is published in Russian. By a special decision of the editorial board, some articles can be published in English.

Topics covered include the following areas:

- information and communication systems and tools of their design;
- architecture and software of computational complexes and networks; and
- methods and tools of information protection.

1. The Journal publishes original articles which have not been published before and are not intended for simultaneous publication in other editions. An article submitted to the Journal must not violate the Copyright law. Sending the manuscript to the Editorial Board, the authors retain all rights of the owners of the manuscript and transfer the nonexclusive rights to publish the article in Russian (or the language of the article, if not Russian) and its distribution in Russia and abroad to the Founders and the Editorial Board. Authors should submit a letter to the Editorial Board in the following form:

Agreement on the transfer of rights to publish:

“We, the undersigned authors of the manuscript “. . . ,” pass to the Founder and the Editorial Board of the Journal “Systems and Means of Informatics” the nonexclusive right to publish the manuscript of the article in Russian (or in English) in both print and electronic versions of the Journal. We affirm that this publication does not violate the Copyright of other persons or organizations.

Author(s) signature(s): (name(s), address(es), date).”

This agreement should be submitted in paper form or in the form of a scanned copy (signed by the authors).

The Editorial Board has the right to request from the authors an official expert conclusion that the submitted article has no classified data prohibited for publication.

2. A submitted article should be attached with **the data on the author(s)** (see item 8). If there are several authors, the contact person should be indicated who is responsible for correspondence with the Editorial Board and other authors about revisions and final approval of the proofs.
3. The Editorial Board of the Journal examines the article according to the established reviewing procedure. If authors receive their article for correction after reviewing, it does not mean that the article is approved to be published. The corrected article should be sent to the Editorial Board for the subsequent review and approval.
4. The decision on the article publication or its rejection is communicated to the authors. The Editorial Board may also send the reviews on the submitted articles to the authors. Any discussion upon the rejected articles is not possible.
5. The edited articles will be sent to the authors for proofread. The comments of the authors to the edited text of the article should be sent to the Editorial Board as soon as possible.
6. The manuscript of the article should be presented electronically in the MS WORD (.doc or .docx) or L^AT_EX (.tex) formats, and additionally in the .pdf format. All documents

may be sent by e-mail or provided on a CD or diskette. A hard copy submission is not necessary.

7. The recommended typesetting instructions for manuscript.

Pages parameters: format A4, portrait orientation, document margins (cm): left — 2.5, right — 1.5, above — 2.0, below — 2.0, footer 1.3.

Text: font — Times New Roman, font size — 14, paragraph indent — 0.5, line spacing — 1.5, justified alignment.

The recommended manuscript size: not more than 15 pages of the specified format. If the specified size exceeded, the editorial board is entitled to require the author to reduce the manuscript.

Use only standard abbreviations. Avoid abbreviations in the title and abstract. The full term for which an abbreviation stands should precede its first use in the text unless it is a standard unit of measurement.

All pages of the manuscript should be numbered.

The templates for the manuscript typesetting are presented on site:

<http://www.ipiran.ru/publication/collected/template.doc>

8. Articles should enclose data both in **Russian and English**:

- title;
- author's name and surname;
- affiliation — organization, its address with ZIP code, city, country, and official e-mail address;
- data on authors according to the format (see site):
http://www.ipiran.ru/journal/collected/2012.22.02_rus/authors.asp and
http://www.ipiran.ru/journal/collected/2012.22.02_eng/authors.asp;
- abstract (not less than 100 words) both in Russian and in English. Abstract is a short summary of the article that can be published separately. The abstract is the main source of information on the article and it could be included in leading information systems and data bases. The abstract in English has to be an original text and should not be an exact translation of the Russian one. Good English is required. In abstracts, avoid references and formulae.
- Indexing is performed on the basis of keywords. The use of keywords from the internationally accepted thematic Thesauri is recommended.
Important! Keywords must not be sentences.
- Acknowledgments.

9. References. Russian references have to be presented both in English translation and in Latin transliteration (refer <http://www.translit.net/ru/bgn/>).

Please take into account the following examples of Russian references appearance:

Article in journal:

Zhang, Z., and D. Zhu. 2008. Experimental research on the localized electrochemical micromachining. *Rus. J. Electrochem.* 44(8):926–930. doi:10.1134/S1023193508080077.

Journal article in electronic format:

Swaminathan, V., E. Lepkoswka-White, and B.P. Rao. 1999. Browsers or buyers in cyberspace? An investigation of electronic factors influencing electronic

exchange. *JCMC* 5(2). Available at: <http://www.ascusc.org/jcmc/vol5/issue2/> (accessed April 28, 2011).

Conference proceedings:

Usmanov, T.S., A.A. Gusmanov, I.Z. Mullagalin, R.Ju. Muhametshina, A.N. Chervyakova, and A.V. Sveshnikov. 2007. Osobennosti proektirovaniya razrabotki mestorozhdeniy s primeneniem gidrorazryva plasta [Features of the design of field development with the use of hydraulic fracturing]. *Trudy 6-go Mezhdunarodnogo Simpoziuma "Novye resursoberegayushchie tekhnologii nedropol'zovaniya i povyshe-niya neftegazootdachi"* [6th Symposium (International) "New Energy Saving Subsoil Technologies and the Increasing of the Oil and Gas Impact" Proceedings]. Moscow. 267–272.

Books and other monographs:

Lindorf, L.S., and L.G. Mamikonians, eds. 1972. *Ekspluatatsiya turbogenera-torov s neposredstvennym okhlazhdeniem* [Operation of turbine generators with direct cooling]. Moscow: Energy Publs. 352 p.

Dissertation and Thesis:

Kozhunova, O.S. 2009. Tekhnologiya razrabotki semanticheskogo slovary informat-sionnogo monitoringa [Technology of development of semantic dictionary of information monitoring system]. PhD Thesis. Moscow: IPI RAN. 23 p.

State standards and patents:

GOST 8.586.5-2005. 2007. Metodika vypolneniya izmereniy. Izmerenie raskhoda i kolichstva 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 golovkoy samonavedeniya [The way to orient on the roll of aircraft with optical homing head]. Patent RF No. 2280590.

References in Latin transcription are presented in the original language.

References in the text are numbered according to the order of their first appearance; the number is placed in square brackets. All items from the reference list should be cited.

10. Manuscripts and additional materials are not returned to Authors by the Editorial Board.
11. Submissions of files by e-mail must include:
 - the journal title and author's name in the "Subject" field;
 - an article and additional materials have to be attached using the "attach" function;
 - an electronic version of the article should contain the file with the text and a separate file with figures.
12. "System and Means of Informatics" journal is not a profit publication. There are no charges for the authors as well as there are no royalties.

Editorial Board address:

FRC CSC RAS, 44, block 2, Vavilov Str., Moscow 119333, Russia

Ph.: +7 (499) 135 86 92, Fax: +7 (495) 930 45 05

e-mail: rust@ipiran.ru (to Prof. Rustem Seyful-Mulyukov)

http://www.ipiran.ru/english/journal_systems.asp

SYSTEMS AND MEANS OF INFORMATICS (SISTEMY I SREDSTVA INFORMATIKI)

SCIENTIFIC JOURNAL

Volume 28 No.2 Year 2018

Editor-in-Chief and Chair of Editorial Council

Academician I. A. Sokolov

IN THIS ISSUE:

ANALYTICAL MODELING OF NORMAL PROCESSES IN VOLTERRA
STOCHASTIC SYSTEMS

I. N. Sinitsyn and V. I. Sinitsyn

4

MONTE CARLO BASED USER ACTIVITY SIMULATION FOR SOFTWARE
PERFORMANCE EVALUATION

A. V. Borisov, A. V. Bosov, A. V. Ivanov, and R. B. Chavtaraev

20

INFORMATION SECURITY ON THE BASIS OF META DATA IN ENTERPRISE
APPLICATION INTEGRATION ARCHITECTURE OF INFORMATION SYSTEMS

A. A. Grusho, M. I. Zabezhailo, N. A. Grusho, and E. E. Timonina

34

USE OF DISSEMINATION ALGORITHMS FOR FORMATION
OF NONSTRUCTURED TEXT INFORMATION IN THE GEODATA BASE

S. K. Dulin, N. G. Dulina

42

COMPARISON OF THE FEATURES OF THE REPRESENTATION
OF GEODATA IN CARTOGRAPHY AND GEOINFORMATICS

D. A. Nikishin

60

THE FEATURES OF EFFICIENCY EVALUATION OF A GEOINFORMATION
SYSTEM AS AN ELEMENT OF A SITUATIONAL CENTER

A. A. Zatsarinny, A. V. Voronin, and Yu. S. Ionenkov

75

SERVICE-ORIENTED INTERFACE TO ACCESS SCIENTIFIC DATA
FOR STUDY AND STATE OPERATIONAL MONITORING
OF VOLCANOES OF KAMCHATKA AND NORTHERN KURILES

S. P. Korolev, I. M. Romanova, S. I. Malkovsky, and A. A. Sorokin

88

SOFTWARE IMPLEMENTATION OF A METHOD FOR GENERATION
OF PETRI NETS OF LARGE SIZE

D. I. Kharitonov, G. V. Tarasov, and D. V. Leontyev

99