Том 73
Выпуск 3

ISSN 2079-0279
2023

ТРУДЫ

ИНСТИТУТА СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

http://www.ISA.ru

Динамика макросистем

Интеллектуальный анализ данных и распознавание образов

Информационные технологии

Математические модели социально-экономических процессов

POLY PRINT SERVICE

Труды Института системного анализа Российской академии наук (ИСА РАН)

http://www.isa.ru/proceedings/

Журнал основан в 2002 году
Журнал выходит ежеквартально

Учредитель
Федеральное государственное учреждение «Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук» (ФИЦ ИУ РАН)
119333, г. Москва, ул. Вавилова, д. 44, корп. 2, тел.: 8 (499) 135-62-60, e-mail: frccsc@frccsc.ru, http://www.frccsc.ru/

Главный редактор
Попков Ю.С., академик РАН,
119312, г. Москва, проспект 60-летия Октября, д. 9
тел. 8 (499) 135-42-22, e-mail: popkov@isa.ru

Редакционный совет
Попков Юрий Соломонович, академик РАН
(председатель Редакционного совета), г. Москва, Россия
Виссен Леонард (Leonardus J.G.van Wissen), проф., г. Амстердам, Нидерланды
Константинов Игорь Сергеевич, д.т.н., г. Белгород, Россия
Соловьев Александр Владимирович, д.т.н.,
(заместитель главного редактора) г. Москва, Россия
Шмульян Борис Лейбович, проф., г. Тель–Авив, Израиль
Щербов Сергей Яковлевич, проф., г. Вена, Австрия

Редакционная коллегия

Алескеров Фуад Тагиевич, д.т.н., г. Москва, Россия
Ашимов Абдыкаппар Ашимович, д.т.н., г. Алматы, Казахстан
Белов Сергей Павлович, д.т.н., г. Белгород, Россия
Булычев Александр Викторович, к.т.н. (ответственный секретарь), г. Москва, Россия
Бурков Владимир Николаевич, д.т.н., г. Москва, Россия
Войтишек Антон Вацлавович, д. ф.-м.н., г. Новосибирск, Россия
Геловани Виктор Арчилович, академик РАН, г. Москва, Россия
Ильин Александр Владимирович, чл.-корр. РАН, г. Москва, Россия
Крутько Вячеслав Николаевич, д.т.н., г. Москва, Россия
Лексин Владимир Николаевич, д.э.н., г. Москва, Россия
Лившиц Вениамин Наумович, д.э.н., г. Москва, Россия
Магницкий Николай Александрович, д.ф.-м.н., г. Москва, Россия
Мижидон Арсалан Дугарович, д.т.н., г. Улан-Удэ, Россия
Орлова Елена Роальдовна, д.э.н., г. Москва, Россия
Петровский Алексей Борисович, д.т.н., г. Москва, Россия
Смирнов Александр Викторович, д.т.н., г. Санкт-Петербург, Россия
Тищенко Виктор Иванович, к.филос.н., г. Москва, Россия
Швецов Александр Николаевич, д.э.н., г. Москва, Россия

Редакция
Шибаева Л.С. (заведующая редакцией)

Адрес редакции
117312, г. Москва, проспект 60-летия Октября, д. 9,
E-mail: tisa@isa.ru, тел. 8 (499) 135-24-33, 8 (926) 490-87-87

Научный журнал «Труды Института системного анализа Российской академии наук (ИСА РАН)» публикует материалы по широкому кругу фундаментальных проблем развития методологии системного анализа и ее приложений к решению разнообразных задач в сфере науки и практики. Журнал предназначен для научных сотрудников, инженеров и исследователей, работающих в рамках этой проблематики, а также для политиков, сотрудников государственных и муниципальных органов, специалистов предприятий и представителей общественных организаций. Правила подготовки статей для публикации в журнале, а также правила их рецензирования приведены на сайте журнала.

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор). Свидетельство о регистрации средства массовой информации ПИ № ФС77-65718 от 20 мая 2016 г.
Подписной индекс журнала – 36089 в электронном каталоге ГК «УРАЛ-ПРЕСС» (http://ural-press.ru/).
Журнал включен в перечень ведущих рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК для публикации основных научных результатов диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук.

© Федеральное государственное учреждение «Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук»

Содержание

Динамика макросистем **3**

Системный анализ динамических состояний механических колебательных систем на основе рычажных связей
(*А.В. Елисеев, Н.К. Кузнецов, А.С. Миронов*) 3

О природе скрытых аттракторов в нелинейных автономных системах дифференциальных уравнений
(*Н.А. Магницкий*) 16

Приближение Гирсановской меры с логарифмической доходностью в случае тяжелохвостных распределений
(*А.Р. Данилишин*) 21

Интеллектуальный анализ данных и распознавание образов **31**

Использование центрально-симметричных признаков Хаара для локализации печати на паспорте гражданина РФ
(*М.А. Валов, Д.П. Маталов, С.А. Усилин*) 31

Информационные технологии **40**

Разработка формального аппарата для описания и обработки концептуальных моделей
(*Ньи Ньи Хтве, Г. Д. Волкова, О.Г. Григорьев*) 40

Информационная система поддержки аудиторской деятельности
(*Г.П. Акимова, А.Ю. Даниленко, Е.В. Пашкина, М.А. Пашкин, А.А. Подрабинович, И.В. Туманова*) 52

Критерии ранжирования накопителей информации в data-центрах по надежности
(*И.Н. Насыров, И.И. Насыров, Р.И. Насыров*) 59

Математические модели социально-экономических процессов **69**

Моделирование оценки системной эффективности развития сетевой транспортной инфраструктуры
(*Н.И. Белоусова, С.П. Бушанский, Е.М. Васильева, В.Н. Ливщиц, И.А. Миронова*) 69

Неопределенность и риски реализации управленческих решений в условиях латентности и лоббизма
(*В.Н. Лексин*) 81

Системный анализ в медицине и биологии **92**

Система «паразит-хозяин» с распределенным временем сохранения иммунитета
(*А.Н. Герасимов, Н.В. Сычева, А.Э. Цыганкова, М.И. Шпитонков*) 92

Информационная технология разработки оптимальных рационов здорового питания
(*Н.С. Потемкина, В.Н. Крутько*) 103

Моделирование двух региональных эпидемических ситуаций и анализ факторов повторных волн COVID-19
(*А.Ю. Переварюха*) 114

Системная диагностика социально-экономических процессов **127**

Идеология России в условиях противостояния Россия-Запад
(*Ю.В. Пазюк, В.П. Ефимова, С.Н. Осипов*) 127

Vol. 73, Issue 3, 2023

PROCEEDINGS OF THE INSTITUTE FOR SYSTEMS ANALYSIS OF RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES

IN THIS ISSUE

Macrosystems Dynamics **3**

System analysis of dynamic states of mechanical oscillatory systems based on lever ties
(*A.V. Eliseev, N.K. Kuznetsov, A.S. Mironov*) 3

On the nature of hidden attractors in nonlinear autonomous systems of differential equations
(*N.A. Magnitskii*) 16

Approximation of Girsanov's measure with logarithmic returns in the case of heavy-tailed distributions
(*A.R. Danilishin*) 21

Data Mining and Pattern Recognition **31**

The use of centrally symmetric Haar features for stamp localization on the passport of a citizen of the Russian Federation
(*M.A. Valov, D.P. Matalov, S.A. Usilin*) 31

Information Technologies **40**

Development of a formal apparatus for the description and processing of conceptual models
(*Nyi Nyi Htwe, G.D. Volkova, O.G. Grigoriev*) 40

Audit Support Information System
(*G.P. Akimova, A.Yu. Danilenko, E.V. Pashkina, M.A. Pashkin, A.A. Podrabinovich, I.V. Tumanova*) 52

Criteria for ranking information storage devices in data centers by reliability
(*I.N. Nasyrov, I.I. Nasyrov, R.I. Nasyrov*) 59

Mathematical Models of Socio-Economic Processes **69**

Modeling the efficiency system assessment for the development of network transport infrastructure
(*N.I. Belousova, S.P. Bushansky, E.M. Vasilieva, V.N. Livchits, I.A. Mironova*) 69

Uncertainty and risks of implementing management decisions in conditions of latency and lobbying
(*V.N. Leksin*) 81

Systems Analysis in Medicine and Biology **92**

Parasite-host system with distributed immunity retention time
(*A.N. Gerasimov, N.V. Sycheva, A.E.Tsygankova, M.I. Shpitonkov*) 92

Information technology for the development of optimal healthy diets
(*N.S. Potemkina, V.N. Krut'ko*) 103

Modeling of the two regional epidemics situations and analysis of factors for repeated waves of COVID-19
(*A.Yu. Perevaryukha*) 114

System Diagnostics of Socio-Economic Processes **127**

The Ideology of Russia in the context of the Russia-West confrontation
(*Yu.V. Pazyuk, V. P. Efimova, S.N Osipov*) 127

Динамика макросистем

Системный анализ динамических состояний механических колебательных систем на основе рычажных связей

А.В. Елисеев[I,II], Н.К. Кузнецов[II], А.С. Миронов[I]

[I] Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Россия
[II] Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Аннотация. Развивается методология оценки динамических состояний технических объектов транспортного или технологического назначения, находящихся в условиях вибрационных нагружений. В качестве расчетных схем используются механические колебательные системы с сосредоточенные параметрами. Применяется структурный подход, в рамках которого механическим колебательным системам ставятся в соответствие структурные схемы эквивалентных в динамическом отношении систем автоматического управления. В рамках развиваемых представлений показано, что совокупности динамических состояний параметрических семейств механических колебательных систем могут быть охарактеризованы конечными наборами динамических инвариантов. Для построения динамических инвариантов разработан метод применения частотных функций, сопоставляющих коэффициентам связности кинематических возмущений частоты обнуления амплитуд колебания координат точек, используемых для оценки динамических состояний, отличающийся тем, что для построения частотных функций обнуления учитываются свойства симметрии параметров системы.

Ключевые слова: *структурное моделирование, механические колебания, связные возмущения, динамические состояния, передаточные функции, рычажные связи, вибрационные нагружения, твердое тело, упругие элементы.*

DOI: 10.14357/20790279230301

Введение

Проблемы обеспечения безопасности технических объектов актуализируют разработку междисциплинарных подходов, охватывающих машиноведение, прикладную и теоретическую механику, теорию автоматического управления, теорию катастроф, системный анализ [1,2]. Развитие представлений о факторах риска опасных событий обращает внимание на технические объекты транспортного и технологического назначения, находящиеся в условиях интенсивных внешних воздействий [3-5]. Внешние вибрационные нагружения с учетом связности могут рассматриваться в качестве одного из механических факторов безопасности технических объектов транспортного и технического назначения, работающих в установившихся режимах [6]. Обеспечение регламентов эксплуатационных режимов, отображающих вибрационные нагружения, предопределяет развитие научно-методологических основ контроля, формирования и управления вынужденными движениями технических объектов в условиях кинематических

нагружений. При построении математических моделей значительное число технических объектов могут быть представлены расчетными схемами в виде механических колебательных систем конечным числом степеней свободы[7]. На этапе поисковых исследований использование колебательных систем с учетом малости сил трения может быть вполне обосновано. Значительное распространение получили расчетные схемы в виде механических колебательных систем, образованных твердым телом на упругих опорах, совершающим вынужденные колебания под действием кинематических возмущений. В целом использование механических колебательных систем в качестве расчетных схем имеет распространение в решении широкого круга задач [8].

В качестве методологической основы построения математических моделей технических объектов, находящихся в условиях вибрационных нагружений, развивается структурный подход, отличающийся тем, что механическим колебательным системам, используемым в качестве расчетных схем технических объектов, ставятся в соответствие структурные схемы эквивалентных, в динамическом отношении, систем автоматического управления [9]. Структурный подход вполне применим на начальных этапах моделирования линейных или линеаризованных систем при условии малости установившихся колебаний элементов технических объектов. Преимуществом структурного подхода является возможность формирования и развития обобщенных представлений о технических объектах с использованием теории автоматического управления, теории систем, системного анализа и динамических аналогий [10].

Существенное значение в оценке свойств механических колебательных систем имеют рычажные связи, представляющие собой отношение смещений координаты системы и опорных поверхностей, зависящее от частоты внешних возмущений. Динамические особенности рычажных связей могут быть отображены с помощью передаточной функции, для которой входным сигналом служит кинематическое возмущение, а выходным – колебания точек объекта, динамическое состояние которого оценивается [11].

Учет связности внешних возмущений приводит к необходимости рассмотрения совокупности механических колебательных систем. Оценка динамических состояний параметрического семейства механических колебательных систем приводит к задаче учета многообразия динамических состояний, зависящего от частоты и коэффициента связности внешних возмущений. Для оценки динамических состояний получило распространение понятие о динамическом инварианте, отображающее существенные динамические особенности в виде числа резонансов, режимов обнуления амплитуд колебаний и числа знакоопределенных форм динамических взаимодействий элементов механических колебательных систем.

Набольшее распространение получили методы структурного математического моделирования, использующие механические колебательные системы с одной и двумя степенями свободы, что связано с простыми аналитическими выражениями для определения динамических особенностей. В частности, для оценки динамических податливостей механических колебательных систем, образованных твердым телом с двумя степенями свободы, построена карта динамических инвариантов, отображающая полный набор динамических особенностей в зависимости от коэффициента связности внешних возмущений силовой природы и координаты точки, которой фиксируется реакция на внешнее возмущение [12]. В рамках системных исследований рассмотрение объектов с тремя степенями служит следующим шагом после объектов с двух степенями свободы и направлено на формирование и развитие обобщенных представлений о состояниях систем, находящихся в условиях связных вибрационных нагружений силового и кинематического характера.

Вместе с тем, методология структурного подхода к построению полной совокупности динамических состояний механических колебательных систем, образованных твердыми телами с тремя степенями свободы, еще не получила должного развития в рамках представлений о рычажных связях.

Предлагаемая статья посвящена разработке метода оценки многообразия динамических состояний механических колебательных систем в рамках обобщенных представлений о рычажных связях в системе, образованной твердым телом с тремя степенями свободы, находящимся в условиях связных вибрационных нагружений кинематической природы.

1. Основные положения. Постановка задачи

Рассматривается механическая колебательная система, образованная твердым телом ABC (рис.1) с массой M_0 и моментами инерции J_1, J_2. Предполагается, что твердое тело совершает малые поступательные и угловые установившиеся колебания относительно положения статического равновесия под воздействием гармонических синфазных ко-

лебаний опорных поверхностей z_1, z_2, z_3. Твердое тело, помещенное на упругие опоры, совершает установившиеся колебания на частоте внешних возмущений. Динамическое состояние твердого тела оценивается на основе отношения амплитуд колебаний в точке измерения, расположенной на твердом теле, к амплитуде колебания основной опорной поверхности z_1.

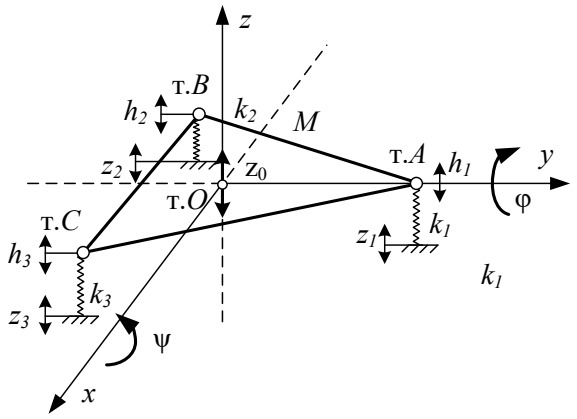


Рис.1. Расчетная схема механической колебательной системы с тремя степенями свободы: *ABC* − твердое тело; z_1, z_2, z_3 − опорные поверхности; k_1, k_2, k_3 − упругие элементы; т.*O* − центр масс; M_0 − масса; J_1, J_2 − моменты инерции

Колебания основной опорной поверхности формируют совокупность динамических состояний твердого тела, оцениваемых на основе передаточного отношения амплитуд колебаний. В зависимости от частоты передаточное отношение может принимать отрицательные, положительные и нулевые значения. Совокупность динамических состояний точки, выбранной для измерений, включает резонанс, режимы динамических гашений колебаний, знакоопределенные формы динамических взаимодействий элементов системы. Учет связности кинематических возмущений расширяет совокупность возможных динамических состояний точек твердого тела. Для оценки динамических состояний может быть выбран подход, учитывающий, существенные особенности динамических состояний в рамках обобщенных представлений.

Задача заключается в разработке метода оценки совокупности динамических состояний систем, образованных твердым телом с тремя степенями свободы, находящимся в условиях связных кинематических нагружений, динамические особенности которого интерпретируются в рамках представлений о рычажных связях.

2. Математическая модель

В качестве обобщенных координат рассматриваются величины h_1, h_2, h_3 малых вертикальных смещений точек *A*, *B*, *C* относительно положения статического равновесия. Упругие элементы k_1, k_2, k_3, соединяющие твердое тело с опорными поверхностями z_1, z_2, z_3, закреплены в точках *A*, *B*, *C* и расположены вертикально. Наравне с обобщенными координатами $\{h_1, h_2, h_3\}$ рассматриваются величины $\{z_0, \varphi, \psi\}$, где z_0 – малые вертикальные смещения центра масс твердого тела, φ, ψ – малые угловые повороты твердого тела вокруг главных осей инерции, которые направлены вдоль осей *Ox*, *Oy* неподвижной декартовой системы координат *Oxyz*. Предполагается, что центр масс твердого тела в положении равновесия, находится в т.*O* начала системы координат. Обобщенные координаты $\{h_1, h_2, h_3\}$ и $\{z_0, \varphi, \psi\}$ связаны между собой выражениями:

$$\begin{cases} h_1 = z_0 + x_1\varphi + y_1\psi; \\ h_2 = z_0 + x_2\varphi + y_2\psi; \\ h_3 = z_0 + x_3\varphi + y_3\psi, \end{cases} \qquad (1)$$

где (x_i, y_i), $i=1,2,3$ – это координаты проекций точек *A, B, C* на плоскость *Oxy*. В связи с малостью углов φ, ψ использованы приближения $\sin\varphi \approx \varphi$, $\sin\psi \approx \psi$. Потенциальная энергия системы в обобщенных координатах h_1, h_2, h_3 определяется на основе жесткостей k_1, k_2, k_3 и может быть представлена в виде:

$$\Pi = \frac{1}{2}\left\langle K(\vec{h}-\vec{z}), (\vec{h}-\vec{z})\right\rangle, \qquad (2)$$

где $K = \begin{pmatrix} k_1 & 0 & 0 \\ 0 & k_2 & 0 \\ 0 & 0 & k_3 \end{pmatrix}$ – матрица жесткостей; $\vec{h} = \begin{pmatrix} h_1 \\ h_2 \\ h_3 \end{pmatrix}$ – вектор обобщенных координат, отражающих вертикальные смещения точек твердого тела; $\vec{z} = \begin{pmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \end{pmatrix}$ – вектор кинематических возмущений; $\langle u, v\rangle = u_1v_1 + u_2v_2 + u_3v_3$ – скалярное произведение. Кинетическая энергия движения твердого тела в координатах $\{z_0, \varphi, \psi\}$ может быть представлена выражением:

$$T = \frac{1}{2}\left\langle M\dot{\vec{\xi}}, \dot{\vec{\xi}}\right\rangle, \qquad (3)$$

где $M=\begin{pmatrix} M_0 & 0 & 0 \\ 0 & J_1 & 0 \\ 0 & 0 & J_2 \end{pmatrix}$ – матрица массоинерционных коэффициентов; $\vec{\xi}=\begin{pmatrix} z_0 \\ \varphi \\ \psi \end{pmatrix}$ – вектор обобщенных координат; $\dot{\vec{\xi}}$ – вектор обобщенных скоростей.

Дифференциальные уравнения Лагранжа 2-го рода могут быть представлены в матричном виде:

$$(U^{-1})^T MU^{-1}\ddot{\vec{h}} + K\vec{h} = K\vec{z}, \qquad (4)$$

где $U=\begin{pmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{pmatrix}$ - матрица преобразования координат (1); $\ddot{\vec{h}}$ – вектор обобщенных ускорений.

Предполагается, что для кинематических возмущений z_1, z_2, z_3 выполнено соотношение:

$$z_2 = \gamma_2 z_1, z_3 = \gamma_3 z_1, \qquad (5)$$

где γ_2, γ_3 – коэффициенты связности, отображающие зависимость между колебаниями опорных поверхностей, принимают положительные, нулевые и отрицательные значения.

Под действием интегрального преобразования Лапласа [13] система дифференциальных уравнений (4) с учетом нулевых начальных условий может быть приведена к алгебраической системе:

$$\left(\left(U^{-1}\right)^T MU^{-1}p^2 + K\right)\overline{\vec{h}} = K\overline{\vec{z}}, \qquad (6)$$

где $p=j\omega$ – комплексная переменная; $j=\sqrt{-1}$ – мнимая единица; ω – частота внешнего кинематического возмущения; значок «-» над символами обозначает интегральное преобразование Лапласа.

На основе известных методов [10] алгебраическая система (6) может быть представлена в виде структурной схемы (рис.2), где коэффициенты m_{ij} матрицы

$$(U^{-1})^T MU^{-1} = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{pmatrix} \qquad (7)$$

определяют особенности парциальных систем и межпарциальных связей уравнения(6).

Механическая колебательная система (рис. 1) с тремя степенями свободы эквивалентна в динамическом отношении структурной схеме системы автоматического управления (рис. 2).

Для оценки динамических состояний механической колебательной системы с учетом условий связности (5) на основе структурной схемы системы автоматического управления могут быть построены передаточные функции $W_{11}(p)$, $W_{21}(p)$, $W_{31}(p)$:

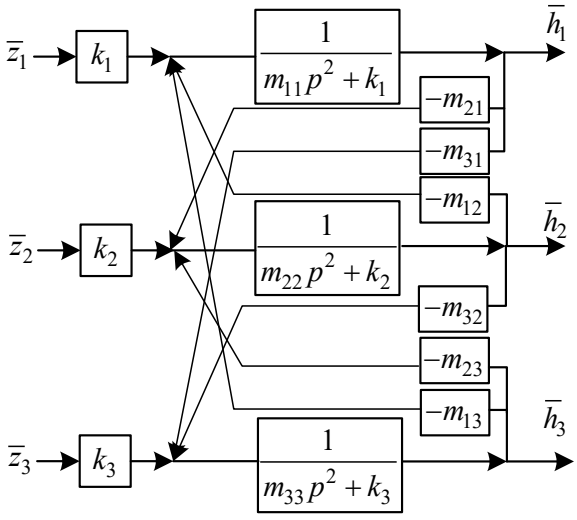


Рис.2. Структурная схема механической колебательной системы

$$W_{11}(p)=\frac{\overline{h}_1}{\overline{z}_1}, W_{21}(p)=\frac{\overline{h}_2}{\overline{z}_1}, W_{31}(p)=\frac{\overline{h}_3}{\overline{z}_1}. \qquad (8)$$

Передаточные функции (8) в физическом смысле отображают представления о рычажных связях [11]. Характер рычажных связей в зависимости от частоты внешних кинематических возмущений может быть отображен амплитудно-частотными характеристиками:

$$A_{11}(\omega)=W_{11}(j\omega), A_{21}(\omega)=W_{21}(j\omega),$$
$$A_{31}(\omega)=W_{31}(j\omega). \qquad (9)$$

Особенности амплитудно-частотных характеристик могут быть интерпретированы в рамках представлений о рычажных связях в зависимости от положения крайних точек рычага относительно точки опоры. Резонансы и режимы динамического гашения отображаются посредством длин плеч рычага. Положительные и отрицательные ветви амплитудно-частотных характеристик могут быть интерпретированы как рычаги второго и первого родов соответственно.

С обобщенной точки зрения совокупность динамических состояний на частотном интервале может быть обозначена так называемым динамическим инвариантом [12], отображающим конечный набор резонансов, режимов динамического гашения и знакоопределенных форм динамических взаимодействий.

3. Оценка совокупности динамических состояний системы с учетом связности внешних возмущений

В предположении связности внешних кинематических возмущений (5) алгебраическая система (6) может быть представлена в виде:

$$\left(\begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{pmatrix}\cdot p^2 + \begin{pmatrix} k_1 & 0 & 0 \\ 0 & k_2 & 0 \\ 0 & 0 & k_3 \end{pmatrix}\right)\cdot\begin{pmatrix} \overline{h}_1 \\ \overline{h}_2 \\ \overline{h}_3 \end{pmatrix} = \overline{z}_1\begin{pmatrix} k_1 \\ k_2\gamma_2 \\ k_3\gamma_3 \end{pmatrix}. \quad (10)$$

Передаточная функция $W_{11}(p)$ (8) может быть найдена с помощью формулы Крамера [14] в вид отношения определителей:

$$W_{11}(p) = \frac{\overline{h}_1}{\overline{z}_1} = \frac{\begin{vmatrix} k_1 & m_{12}p^2 & m_{13}p^2 \\ k_2\gamma_2 & m_{22}p^2 + k_2 & m_{23}p^2 \\ k_3\gamma_3 & m_{32}p^2 & m_{33} + k_3 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} m_{11}p^2 + k_1 & m_{12}p^2 & m_{13}p^2 \\ m_{21}p^2 & m_{22}p^2 + k_2 & m_{23}p^2 \\ m_{31}p^2 & m_{32}p^2 & m_{33}p^2 + k_3 \end{vmatrix}} = \frac{C(p)}{A(p)}, \quad (11)$$

где

$$C(p) = C_1p^4 + C_2p^2 + C_3, \;\; A(p) = A_1p^6 + A_2p^4 + A_3p^2 + A_4. \quad (12)$$

Коэффициенты C_1, C_2, C_3 биквадратного $C(p)$ и бикубического $A(p)$ многочленов (12), представляющих собой результаты вычислений числителя и знаменателя передаточной функции (11) на основе свойств суммы и произведения определителей [14], определяются выражениями:

$$C_1 = \begin{vmatrix} k_1 & m_{12} & m_{13} \\ k_2\gamma_2 & m_{22} & m_{23} \\ k_3\gamma_3 & m_{32} & m_{33} \end{vmatrix},$$

$$C_2 = \begin{vmatrix} k_1 & 0 & m_{13} \\ k_2\gamma_2 & k_2 & m_{23} \\ k_3\gamma_3 & 0 & m_{33} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} k_1 & m_{12} & 0 \\ k_2\gamma_2 & m_{22} & 0 \\ k_3\gamma_3 & m_{32} & k_3 \end{vmatrix},$$

$$C_3 = \begin{vmatrix} k_1 & 0 & 0 \\ k_2\gamma_2 & k_2 & 0 \\ k_3\gamma_3 & 0 & k_3 \end{vmatrix}, \quad (13)$$

$$A_1 = \begin{vmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{vmatrix},$$

$$A_2 = \begin{vmatrix} k_1 & m_{12} & m_{13} \\ 0 & m_{22} & m_{23} \\ 0 & m_{32} & m_{33} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} m_{11} & 0 & m_{13} \\ m_{21} & k_2 & m_{23} \\ m_{31} & 0 & m_{33} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} m_{11} & m_{12} & 0 \\ m_{21} & m_{22} & 0 \\ m_{31} & m_{32} & k_3 \end{vmatrix}, \quad (14)$$

$$A_3 = \begin{vmatrix} m_{11} & 0 & 0 \\ m_{21} & k_2 & 0 \\ m_{31} & 0 & k_3 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} k_1 & m_{12} & 0 \\ 0 & m_{22} & 0 \\ 0 & m_{32} & k_3 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} k_1 & 0 & m_{13} \\ 0 & k_2 & m_{23} \\ 0 & 0 & m_{33} \end{vmatrix},$$

$$A_4 = \begin{vmatrix} k_1 & 0 & 0 \\ 0 & k_2 & 0 \\ 0 & 0 & k_3 \end{vmatrix}. \quad (15)$$

Необходимо отметить, что коэффициенты C_1 и C_2 (13) линейно зависят от коэффициентов связности γ_2 и γ_3 (5). Уравнение $C(j\omega)=0$ (12) определяет частоты θ_0, θ_1, обнуляющие амплитуды колебаний обобщенных координат. Характеристическое уравнение $A(j\omega)=0$ (12) определяет частоты собственных колебаний σ_0, σ_1, σ_2. Взаимное расположение частот θ_i и σ_j зависит от коэффициентов связности γ_2 и γ_3 (5). В случае совпадения некоторых частот θ_i и σ_j эффекты обнулений и резонансов могут взаимоустраняться. Всевозможные взаимные расположения частот обнуления и собственных частот системы определяют совокупность динамических состояний системы. Учет координат крепления и жесткостей упругих элементов позволяет определять частоты обнуления и резонансов в зависимости от коэффициентов связности внешних возмущений.

4. Оценка совокупности обобщенных динамических состояний системы с симметрией

Предполагается, что точки крепления упругих элементов образуют равнобедренный треугольник с основанием и высотой, направленными параллельно осям OX и OY, соответственно:

$$x_1=0, y_1=l_1, x_2=-l_2, y_2=-l_3, x_3=l_2, y_3=-l_3. \quad (16)$$

Дополнительно предполагается условие равенства жесткостей упругих элементов, прикрепленным в симметричных точках B и C:

$$k_2=k_3. \quad (17)$$

С учетом условий (5), (16), (17) функции $C(p)$ и $A(p)$ (12) принимают вид:

$$C(p) = -\frac{(J_1p^2 + 2k_2l_2^2)}{4(l_1+l_3)^2l_2^2}\times$$
$$\times(((\gamma_2+\gamma_3)(l_3l_1M - J_2)k_2 - (M\,l_1^2 + J_2)k_1)p^2 - 2(l_1+l_3)^2k_1k_2), \quad (18)$$

$$A(p) = \frac{(J_1p^2 + 2k_2l_2^2)}{4(l_1+l_3)^2l_2^2}\times$$
$$\times(MJ_2p^4 + (2k_2(l_3^2M + J_2) + k_1(l_1^2M + J_2))p^2 + 2k_1k_2(l_1+l_3)^2). \quad (19)$$

Результаты, связанные с существованием общей частоты обнуления и собственной частоты для

системы с учетом симметрии, получены с частичным использованием программного пакета символьной арифметики [15].

При условии (16), (17) одна из частот обнуления θ_0 совпадает с собственной частотой σ_0 системы:

$$\sigma_0 = \theta_0 = l_2\sqrt{\frac{2k_2}{J_1}}\ . \qquad (20)$$

Совпадение частот σ_0=θ_0 приводит к взаимному устранению эффектов резонанса и обнуления амплитуд колебаний. Передаточная функция $W_{11}(p)$ (8) после сокращение множителя $J_1p^2+2k_2l_2^2$ принимает вид:

$$W_{11}(p) =$$

$$= -\frac{((\gamma_2+\gamma_3)(l_3l_1M - J_2)k_2 - (M\,l_1^2 + J_2)k_1)p^2 - 2(l_1+l_3)^2k_1k_2}{J_2Mp^4 + (2(l_3^2M + J_2)k_2 + (Ml_1^2 + J_2)k_1)p^2 + 2k_1k_2(l_1+l_3)^2}. \qquad (21)$$

Совокупность обобщенных динамических состояний, отображаемых передаточной функцией (21), определяется взаимным расположением частоты обнуления θ_1 по отношению в собственным частотам системы σ_1, σ_2. Для построения совокупности динамических инвариантов может быть использована частотная функция обнуления[12]:

$$\omega^2(\gamma_2,\gamma_3) = \frac{2k_1k_2(l_1+l_3)^2}{k_1(J_2 + l_1^2M) + k_2(J_2 - l_1l_2M)(\gamma_2+\gamma_3)}\ . \qquad (22)$$

Частотная функция обнуления позволяет определять множество граничных значений коэффициентов связности $\gamma_2^{(kp)}$, $\gamma_3^{(kp)}$, $\gamma_2^{(1)}$, $\gamma_3^{(1)}$, $\gamma_2^{(2)}$, $\gamma_3^{(2)}$ из условий обнуления знаменателя (22) и условий совпадения частотной функции обнуления с собственными частотами σ_1, σ_2:

$$\gamma_2^{(kp)} + \gamma_3^{(kp)} = -\frac{k_1(J_2 + l_1^2M)}{k_2(J_2 - l_1l_2M)},$$

$$\omega^2(\gamma_2^{(1)} + \gamma_3^{(1)}) = \sigma_1^2,\ \ \omega^2(\gamma_2^{(2)} + \gamma_3^{(2)}) = \sigma_2^2, \qquad (23)$$

где σ_1, σ_2 – собственные частоты, удовлетворяющие уравнению:

$$J_2M\omega^4 - (2(J_2 + l_3^2M)k_2 + (J_2 + l_1^2M)k_1)\omega^2 +$$

$$+ 2k_1k_2(l_1+l_3)^2 = 0\,. \qquad (24)$$

Совокупность граничных коэффициентов связности $\gamma_2^{(1)}$, $\gamma_3^{(1)}$, $\gamma_2^{(2)}$, $\gamma_3^{(2)}$ (23) разбивает множество коэффициентов на подмножества, в которых динамические инварианты сохраняют свои значения, выражающиеся в количестве резонансов, режимов обнуления и форм динамических взаимодействий элементов механических колебательных систем. Совокупность динамических инвариантов может быть построена для конкретной механической колебательной системы с учетом симметрии.

5. Построение динамических инвариантов. Вычислительный эксперимент

В общем случае задача определения динамических инвариантов связана с построением вычислительных алгоритмов поиска вариантов возможных взаимных расположений корней многочленов, образующих числитель и знаменатель амплитудно-частотной характеристики. Построение полной совокупности динамических инвариантов выполнено для механической системы, образованной твердым телом с двумя степенями свободы [12]. Для построения частичной совокупности динамических инвариантов механических колебательных систем с двумя степенями свободы разработана программа [16].

Наложение условий симметрии позволяет построить частичную совокупность динамических инвариантов для механической колебательной системы с тремя степенями свободы:

$$k_1$=2.0·10^5 Н/м, k_2=1.0·10^5 Н/м,
k_3=1.0·10^5 Н/м, l_1=0.5 м, l_2=0.1 м, l_3=0.3 м, (25)

$$M$=100 кг, J_1=50 кг·м^2, J_2=80 кг·м^2. (26)

Для параметров (25)-(26) системы (рис.1) при условии, что γ_2=0, многочлен $C(j\omega)$ (12) принимает вид:

$$C(j\omega) = ((1.26953125\gamma_3 + 4.1015625)\omega^4 +$$

$$+ (-50.78125\gamma_3 - 5164.0625)\omega^2 + 2\cdot10^5)10^{10} \qquad (27)$$

Частоты обнуления составляют значения:

$$\theta_0$=6.324 рад/с, $\theta_1 = \frac{320}{\sqrt{84+26\gamma_3}}$ рад/с. (28)

Характеристический многочлен $A(p)$ (12) системы принимает вид:

$$A(j\omega) =$$

$$= (-1.5625\omega^6 + 7640.625\omega^4 - 5.303125\cdot10^6\omega^2 + 2.0\cdot10^8)10^7 \qquad (29)$$

Собственные частоты системы имеют значения:

$$\sigma_0\approx6.32 \text{ рад/с}, \sigma_1\approx 28.07 \text{ рад/с}, \sigma_2\approx 63.74 \text{ рад/с}. \qquad (30)$$

Собственная частота σ_0 и частота обнуления θ_0 совпадают:

$$\sigma_0\approx6.32 \text{ рад/с}, \theta_0\approx6.32 \text{ рад/с}. \qquad (31)$$

Семейство амплитудно-частотных характеристик, зависящих от коэффициента связности γ_3, принимает вид:

$$A_{11}(\omega) = \frac{-(1625\cdot\gamma_3 + 5250)\cdot\omega^2 + 6.4\cdot10^6}{2\cdot\omega^4 - 9700\cdot\omega^2 + 6.4\cdot10^6}\ . \qquad (32)$$

Для системы с тремя степенями свободы (рис.1) амплитудно-частотная характеристика (32)

на частоте 63.2 рад/с не отражает ни эффекта резонанса, ни эффекта гашения колебания, принимая конечное ненулевое значение. Возможность отображения амплитудно-частотной характеристики резонансов на частотах σ_1, σ_2 зависит от положения частоты обнуления θ_1, заданной с помощью частотной функции (22) в виде:

$$\omega^2(0,\gamma_3) = \frac{102400}{84 + 26\cdot\gamma_3}. \qquad (33)$$

График функции (33) с учетом значений собственных частот σ_1, σ_2 позволяет определять совокупность граничных значений коэффициентов связности, в которых возможны изменения существенных динамических свойств системы (рис. 3).

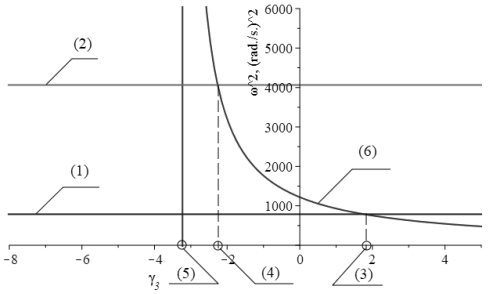


Рис. 3. Частотная функция обнуления: 1 – собственная частота σ_1^2; 2 – собственная частота σ_2^2; 3 – значение коэффициента связности $\gamma_3^{(1)}$; 4 – значение коэффициента связности $\gamma_3^{(2)}$; 5 – критическое значение коэффициента связности $\gamma_3^{(kp)}$; 6 – график частотной функции обнуления

Возможные варианты амплитудно-частотных характеристик определяются на основе набора граничных значений:

$$\gamma_3^{(kp)} \approx -3.23,\ \gamma_3^{(2)} \approx -2.26,\ \gamma_3^{(1)} \approx 1.77. \qquad (34)$$

На множествах $(-\infty, \gamma_3^{(kp)}), \{\gamma_3^{(kp)}\}, (\gamma_3^{(kp)}, \gamma_3^{(2)}), \{\gamma_3^{(2)}\}, (\gamma_3^{(2)}, \gamma_3^{(1)}), \{\gamma_3^{(1)}\}, (\gamma_3^{(1)}, \infty)$ амплитудно-частотные характеристики сохраняют свои существенные особенности в виде количества резонансов, режимов обнуления амплитуд колебаний и знакоопределенных форм динамических взаимодействий (рис. 4).

Существенные особенности амплитудно-частотных характеристик могут быть представлены с помощью динамических инвариантов [12] с характеристиками $+\text{-}S_k^l F_m^n$, где l – количество резонансов, k – количество режимов обнуления колебаний, n – количество положительных и m – отрицательных форм динамического взаимодействия, «+» – означает, что значение амплитудно-частотной характеристики для нулевой частоты положительно, «-» – отрицательно (табл. 1).

Анализ совокупности динамических инвариантов показывает, что для семейства механических колебательных систем варьирование коэффициента связности γ_3 кинематических возмущений приводит к изменениям существенных динамических особенностей, выражающихся в количестве критических состояний и форм динамических взаимодействий.

Зависимость количества динамических особенностей от коэффициента связности внешних

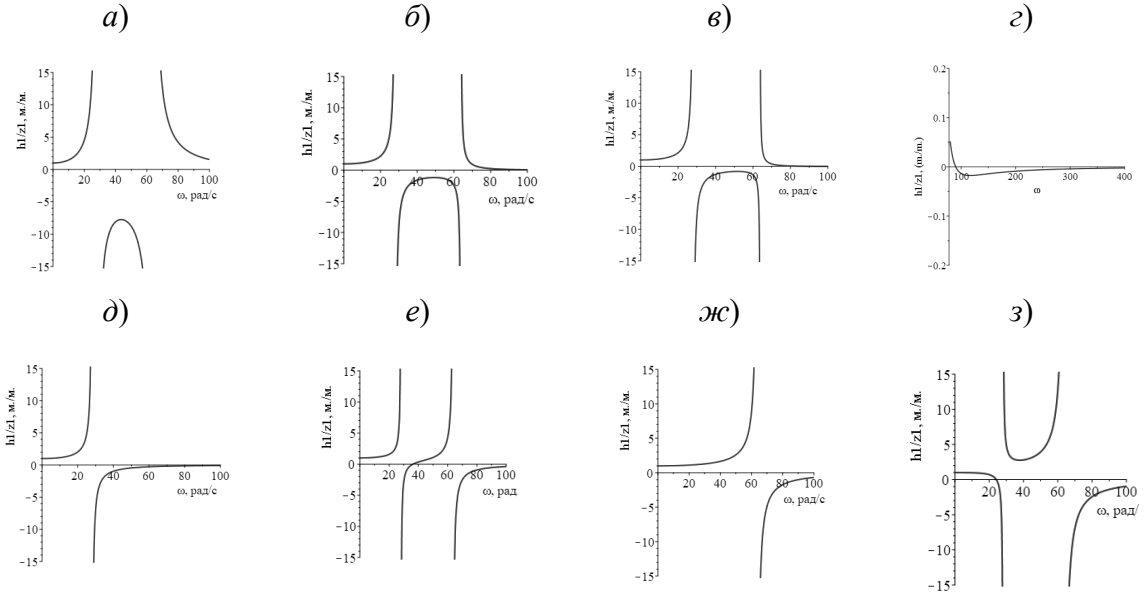


Рис. 4. Амплитудно-частотные характеристики в зависимости от коэффициента связности γ_3: *а*) – γ_3=-13.23; *б*) - γ_3=-3.23; *в*) γ_3=-2.75; *г*) фрагмента графика для γ_3=-2.75; *д*) - γ_3=-2.26; *е*) - γ_3=-0.25; *ж*) - γ_3=1.77; *з*) - γ_3=3.54

кинематических возмущений может быть представлена графически в виде интегральной характеристики (рис. 5).

Интегральная характеристика (рис. 5), рассматриваемая как целочисленная кусочно-постоянная функция с устранимыми и не устранимыми точками разрыва первого рода, отображает чувствительность совокупного количества динамических особенностей системы к изменениям характера связности внешних кинематических возмущений системы.

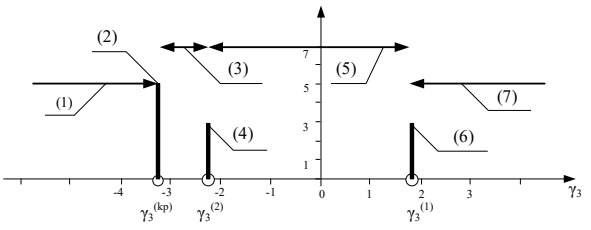


Рис. 5. Интегральная характеристика динамических инвариантов: 1 − на интервале $(-\infty, \gamma_3^{(kp)})$ динамический инвариант $(+S_0^2F_1^2)$ имеет 5 особенностей; 2 − в точке $\gamma_3^{(kp)}$ динамический инвариант $(+S_0^2F_1^2)$ имеет 5 особенностей; 3 − на интервале $(\gamma_3^{(kp)},\gamma_3^{(2)})$ - $(+S_1^2F_2^2)$ − 7; 4 −в точке $\gamma_3^{(2)}$ - $(+S_0^1F_1^1)$ − 3; 5 − на интервале $(\gamma_3^{(2)},\gamma_3^{(1)})$ - $(+S_1^2F_2^2)$ − 7 особенностей; 6 − в точке $\gamma_3^{(2)}$ - $(+S_0^1F_1^1)$ − 3 особенности; 7 −на интервале $(\gamma_3^{(2)},\infty)$ - $(+S_0^2F_1^2)$ − 5

Динамические инварианты, отражающие существенные особенности амплитудно-частотных характеристик передаточных функций в виде отношений смещений, обладают потенциалом интерпретации в виде рычажных связей.

6. Рычажные интерпретации

В рамках системных представлений может быть рассмотрена аналогия между динамическими состояниями, отображаемыми амплитудно-частотными характеристиками передаточных отношений амплитуд колебаний выходных и входных сигналов, и рычажными отношениями, которые могут быть определены с помощью координат условной «выходной» и «входной» точки, рассматриваемых как плечи рычага, поворачивающегося на малый угол относительно точки опоры (рис. 6).

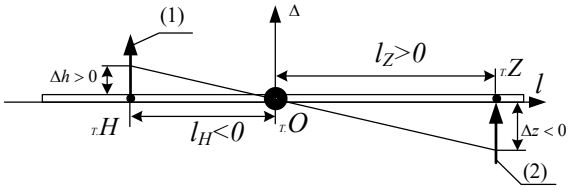


Рис. 6. Рычаг: 1 − стрелка от рычага обозначает «выходное» смещения, 2 −стрелка к рычагу обозначает «входное» смещения; т.Z − точка «входного» смещения с плечом l_Z, т.Н − точка «выходного» смещения с плечом l_H; т.О − точка опоры рычага; l − координатная ось с началом в т.О; l_Z − координата т.Z, l_H − координата т.Н

Связь между значениями амплитудно-частотных характеристик и рычажными отношениями, отражающими поворот рычага на малый угол, может быть представлена выражением:

$$A_{11}(\omega)=\frac{h_1}{z_1}=\frac{l_H}{l_Z}=\frac{\Delta h}{\Delta z}, \qquad (35)$$

где Δz – вертикальное смещение т. Z, рассматриваемое как «входное» или заданное возмущение; Δh – вертикальное смещение т. H, рассматриваемое как «выходное»; l_Z, l_H – координаты точек Z и H, рассматриваемые как плечи. Значения амплитудно-частотных характеристик для фиксированных частот внешних возмущений $A_{11}(\omega)$ могут быть интерпретированы как отношения плеч l_H/l_Z рычага, для которого смещение т.Z с плечом l_Z пропорционально амплитуде входного сигнала z_1, а смещение точки т.H с плечом l_H пропорционально амплитуде выходного сигнала h_1 (рис. 1).

Возможны варианты интерпретации амплитудно-частотной характеристики с помощью рычажных отношений. Для первого варианта «входное» плечо постоянно l_Z=const, а «выходное» определяется выражением:

$$l_H=A_{11}(\omega)l_Z. \qquad (36)$$

Для второго варианта «выходное» плечо постоянно l_H=const, а «входное» определяется отношением:

$$l_Z=l_H/A_{11}(\omega). \qquad (37)$$

Если $A_{11}(\omega)>0$, то точки Z и H расположены по одну сторону от центра вращения т.O и рассматривается рычаг второго рода. Если $A_{11}(\omega)<0$, то точки Z и H расположены по разные стороны от центра

Табл. 1

Динамические инварианты в зависимости от коэффициента связности

	1	2	3	4	5	6	7
I	$(-\infty, \gamma_3^{(kp)})$	$\{\gamma_3^{(kp)}\}$	$(\gamma_3^{(kp)},\gamma_3^{(2)})$	$\{\gamma_3^{(2)}\}$	$(\gamma_3^{(2)},\gamma_3^{(1)})$	$\{\gamma_3^{(1)}\}$	$(\gamma_3^{(1)},\infty)$
II	$+S_0^2F_1^2$	$+S_0^2F_1^2$	$+S_1^2F_2^2$	$+S_0^1F_1^1$	$+S_1^2F_2^2$	$+S_0^1F_1^1$	$+S_0^2F_1^2$
III	$+J_5$	$+J_5$	$+J_7$	$+J_3$	$+J_7$	$+J_3$	$+J_5$

Табл. 2

Интерпретация динамических особенностей в виде рычагов

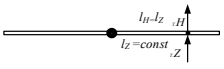
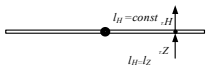
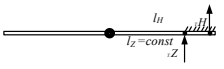
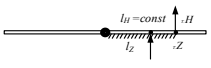
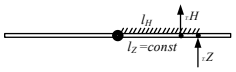
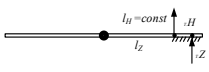
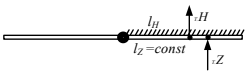
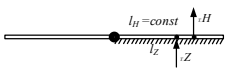
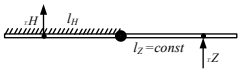
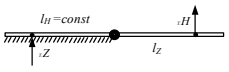
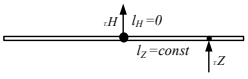
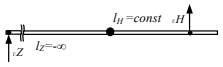
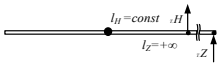
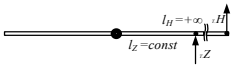
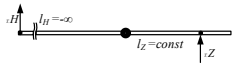
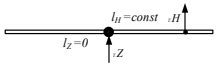
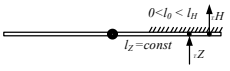
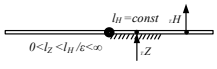
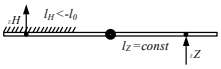
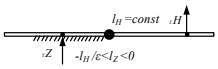
	а	б	в	г
	Совокупность динамических состояний	Рычажная интерпретация l_Z=const, l_H -переменная	Рычажная интерпретация l_H=const, l_Z -переменная	Тип рычага
1	$A_{11}(0)=1$			Рычаг 2-го рода
2	Положительная ветвь: $1<A_{11}(\omega)<\infty$			Рычаг 2-го рода
3	Положительная ветвь: $0<A_{11}(\omega)<1$			Рычаг 2-го рода
4	Положительная ветвь: $0<A_{11}(\omega)< \infty$			Рычаг 2-го рода
5	Отрицательная ветвь: $-\infty<A_{11}(\omega)< 0$			Рычаг 1-го рода
6	Режим динамического гашения: $A_{11}(\omega)= 0$			Вырожденный рычаг (нулевое выходное плечо)
7	Режим динамического гашения: $A_{11}(\omega)= 0$			Вырожденный рычаг 1-го рода (выходное плечо бесконечно)
8	Режим динамического гашения: $A_{11}(\omega)= 0$			Вырожденный рычаг 2-го рода (выходное плечо бесконечно)
9	Режим резонанса: $A_{11}(\omega)= \infty$			Вырожденный рычаг (с бесконечным плечом выхода)
10	Режим резонанса: $A_{11}(\omega)=-\infty$			Вырожденный рычаг (с бесконечным плечом выхода)
11	Режим резонанса: $A_{11}(\omega)= \infty$			Вырожденный рычаг (с нулевым плечом входа)
12	Отделенная положительная ветвь: $0<\varepsilon <A_{11}(\omega)< \infty$			Рычаг 2-го рода
13	Отделенная отрицательная ветвь: $-\infty <A_{11}(\omega)<-\varepsilon<0$			Рычаг 1-го рода

Рис. 7. Рычажная интерпретация ветвей амплитудно-частотной характеристики $-\infty < A_{11}(\omega) < -\varepsilon < 0$: а) l_Z =const, l_H -переменная; б) l_H =const, l_Z -переменная; штриховка − область изменения переменной точки

вращения т.*O* и рассматривается рычаг первого рода. Динамические особенности системы, отображаемые с помощью амплитудно-частотных характеристик, могут быть интерпретированы в рамках представлений о рычагах первого и второго рода.

7. Оценка динамических состояний в рамках рычажных представлений

Анализ обобщенных динамических состояний механической колебательной системы (36-38) может быть проведен в рамках рычажной интерпретации (табл. 2). В частности, для коэффициента связности γ_3 из интервала $(-\infty, \gamma_3^{(kp)})$ совокупность состояний системы характеризуется динамическим инвариантом $+S_0^2F_1^2$ (рис.4,а). Равенство $A_{11}(\omega)=0$ означает, что в статическом состоянии реализуется рычаг 2-го рода, для которого «входное» и «выходное» плечо равны (табл. 2, строка 1). Резонанс на частоте σ_1 интерпретируется бесконечным «выходным» плечом (строки 9,10) или «входным» (строка 11). Положительная первая ветвь амплитудно-частотной характеристики на интервале $(0, \sigma_1)$ интерпретируется рычагом 2-го рода, для которого «выходное» плечо больше «входного» (строка 2, столбец б) или «входное» меньше «выходного» (столбец в). Отрицательная вторая ветвь амплитудно-частотной характеристики (рис.4,*а*) интерпретируется рычагами первого рода, для которых «выходное» плечо больше некоторого значения (строка 13, столбец б) или «входное» плечо ограничено сверху (столбец в).

Наравне с представлениями о рычагах, отображающих динамические особенности систем в виде резонансов, режимов обнуления амплитуд колебаний и знакоопределенных форм динамических взаимодействий, могут получить развитие обобщенные представления, учитывающие полный набор динамических особенностей на частотных интервалах. В частности, отрицательные отделенные от нуля ветви амплитудно-частотной характеристики на интервале между собственными частотами колебаний(рис. 4,а) могут быть представлены в виде специфических составных рычагов (рис. 7).

Составной рычаг с постоянным «входным» плечом (рис. 7,а), образованный из двух частей (строка 13, столбец б), отображает с помощью нижней части плеча отрицательную возрастающую полуветвь амплитудно-частотной характеристики (рис. 4,а) на интервале между σ_1 и σ_2, а с помощью нижней – убывающую. Аналогично, составной рычаг с постоянным «выходным» плечом (рис.7,б), образованный из двух частей (строка 13, столбец в), отображает с помощью верхней части плеча отрицательную убывающую полуветвь амплитудно-частотной характеристики (рис. 4,а) на интервале между σ_1 и σ_2, а с помощью нижней – возрастающую.

Выходное плечо «раздваивается», отображая приближение к двум частотам резонанса σ_1 и σ_2. Заштрихованная область обозначает множество возможных положений для «выходной» точки *H*.

Используя методы монографической проекции бесконечной оси на окружность по аналогии со стереографической проекцией комплексной плоскости на сферу, можно показать, что совокупность динамических свойств механической колебательной системы может быть интерпретирована с помощью специфических рычагов, спроецированных на окружность.

Заключение

Для механических колебательных систем с тремя степенями свободы получены явные аналитические выражения и структура коэффициентов амплитудно-частотных характеристик с учетом зависимости от коэффициентов связности внешних возмущений. Для частного случая системы, обладающей свойствами симметрии, получен явный вид частотной функции обнуления, используемой для построения совокупности динамических состояний. На основе явного вида частотной функции построена совокупность динамических инвариантов.

Показано, что коэффициенты связности кинематических возмущений существенным образом способны изменять динамические состояние системы путем перемещения частот обнуления относительно частот собственных колебаний системы. Установлено, что сближение частоты обнуления с

собственной частотой системы приводит к взаимному устранению эффекта динамического гашения и эффекта резонанса. Можно полагать, что возможно и обратное «разделение» знакоопределенной формы динамических взаимодействий на динамическое состояние резонанса и динамического гашения колебаний.

В рамах методологии структурного математического моделирования разработан системный подход к оценке разнообразия динамических состояний механических колебательных систем, развивающий представления о динамических инвариантах, интерпретируемых в виде совокупности рычагов. Показано, что на основе рычажных представлений, учитывающих входные и выходные возмущения, динамические инварианты могут быть интерпретированы в виде рычагов специфической формы и структуры.

Литература

1. *Ганиев Р.Ф.* Нелинейные резонансы и катастрофы. Надежность, безопасность и бесшумность. Москва, Ижевск: Регулярная и хаотическая динамика. 2013. 592 с.
2. *Москвичев В.В., Махутов Н.А., Шокин Ю.И.* Прикладные задачи конструкционной прочности и механики разрушения технических систем. Новосибирск: Наука. 2021. 795 с.
3. *Ларичев О.И.* Проблемы принятия решений с учетом фактора риска и безопасности // Вестник АН СССР. 1987. № 11.
4. *Цыгичко В.Н*. Оценка рисков нарушения безопасности критически важных объектов и критических инфраструктур. Проблемы анализа риска. 2016. №13(5). С. 6-10.
5. *Махутов Н.А., Гаденин М.М., Резников Д.О.* Критерии и определяющие уравнения для оценки прочности, ресурса, живучести и безопасности несущих элементов подвижного состава железнодорожного транспорта // Научные основы и технологии повышения ресурса и живучести подвижного состава железнодорожного транспорта. 2021. С. 94 – 107.
6. *Clarence W. de Silva*. Vibration. Fundamentals and Practice. Boca Raton: CRC Press. 2006. 1064 p.
7. *Rao S.* 2012. Ride Analysis of Three Wheeled Vehicle Using MATLAB/Simulink. International Journal of Material Forming. Vol. 02. P. 22-26.
8. *Ганиев Р.Ф., Кононенко В.О.* Колебания твердых тел. М.: Наука. 1976. 432 с.
9. *Коловский М.З.* Автоматическое управление виброзащитными системами. М.: Наука, 1976. 320 с.
10. *Eliseev S.V., Eliseev A.V.* Theory of Oscillations. Structural Mathematical Modeling in Problems of Dynamics of Technical Objects. Series: Studies in Systems, Decision and Control, Vol.252, Springer International Publishing, Cham. 2020. 521 p.
11. *Елисеев С.В., Каргапольцев С.К., Большаков Р.С., Елисеев А.В.* Рычажные связи: возможности формирования динамических состояний в механических колебательных системах // Транспорт Урала. 2020. № 3 (66). С. 17–23.
12. *Елисеев А.В., Ситов И.С., Кузнецов Н.К.* Системный подход к оценке полной совокупности динамических состояний технических объектов в условиях связных вибрационных нагружений // Системы. Методы. Технологии. 2023. № 1 (57). С. 7– 20.
13. *Лурье, А.И.* Операционное исчисление и применение в технических приложениях. М.: Наука. 1959. 368 с.
14. *Bronshtein I.N. and Semendyayevю K.A.* (2015) Handbook of Mathematics. - Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 1225 p.
15. Maple. URL: https://www.maplesoft.com (дата обращения: 14.02.2023).
16. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2022667233, 16.09.2022. Заявка № 2022666097 от 31.08.2022.

Елисеев Андрей Владимирович. Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск. Доцент кафедры математики. Иркутский национальный исследовательский технический университет, доцент, кандидат технических наук. Область научных интересов: методы структурного математического моделирования на основе использования методологии системного анализа для решения задач динамики технических объектов, находящихся в условиях вибрационного нагружения.
E-mail: eavsh@ya.ru (Ответственный за переписку).

Кузнецов Николай Константинович. Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск. Заведующий кафедрой. Доктор технических наук, профессор. Область научных интересов: динамика машин различного назначения, работающих в условиях вибрационного нагружения.
E-mail: knik@istu.edu

Миронов Артем Сергеевич. Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск. Соискатель. Область научных интересов: методы структурного математического моделирования.
E-mail: art.s.mironov@mail.ru

System analysis of dynamic states of mechanical oscillatory systems based on lever ties

A.V. Eliseev[I,II], N.K. Kuznetsov[II], A.S. Mironov[I]

[I] Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russia

[II] Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract. A methodology is being developed for estimating the dynamic states of technical objects of transport or technological purpose under conditions of vibration loads. Mechanical oscillatory systems with concentrated parameters are used as calculation schemes. A structural approach is applied, within the framework of which structural schemes of dynamically equivalent automatic control systems are aligned with mechanical oscillatory systems. Within the framework of the developed concepts, it is shown that the sets of dynamic states of parametric families of mechanical oscillatory systems can be characterized by finite sets of dynamic invariants.

Keywords: *structural modeling, mechanical vibrations, connected perturbations, dynamic states, transfer functions, lever connections, vibration loads, solid, elastic elements*.

DOI: 10.14357/20790279230301

References

1. *Ganiev R.F.* 2013. Nelinejnye rezonansy i katastrofy. Nadezhnost', bezopasnost' i besshumnost' [Nonlinear resonances and catastrophes. Reliability, safety and noiselessness]. Moscow, Izhevsk: Regulyarnaya i haoticheskaya dinamika. 592 p.
2. *Moskvichev V.V., Mahutov N.A. and Shokin YU.I.* 2021. Prikladnye zadachi konstrukcionnoj prochnosti i mekhaniki razrusheniya tekhnicheskih system [Applied problems of structural strength and mechanics of destruction of technical systems]. Novosibirsk: Nauka. 795 p.
3. *Larichev O.I.* 1987. Problemy prinyatiya reshenij s uchetom faktora riska i bezopasnosti [roblems of decision-making taking into account the risk and safety factor]. Vestnik AN SSSR [Bulletin of the USSR Academy of Sciences]. Vol. 11.
4. *Tsygichko V.N.* 2016. Ocenka riskov narusheniya bezopasnosti kriticheski vazhnyh ob"ektov i kriticheskih infrastruktur. Problemy analiza riska [Assessment of security risks of critical facilities and critical infrastructures]. Problems of risk analysis [Problems of risk analysis]. 13(5):6-10.
5. *Mahutov N.A., Gadenin M.M. and Reznikov D.O.* 2021. Kriterii i opredelyayushchie uravneniya dlya ocenki prochnosti, resursa, zhivuchesti i bezopasnosti nesushchih elementov podvizhnogo sostava zheleznodorozhnogo transporta [Criteria and defining equations for assessing the strength, resource, survivability and safety of bearing elements of railway rolling stock]. Nauchnye osnovy i tekhnologii povysheniya resursa i zhivuchesti podvizhnogo sostava zheleznodorozhnogo transporta [Scientific foundations and technologies for improving the resource and survivability of railway rolling stock. Proceedings of the International Scientific Conference]. Kolomna. P. 94 – 107.
6. *Clarence W. de Silva*. 2006. Vibration. Fundamentals and Practice. Boca Raton: CRC Press. 1064 p.
7. *Rao S.* 2012. Ride Analysis of Three Wheeled Vehicle Using MATLAB/Simulink. International Journal of Material Forming. Vol. 02. P. 22-26.
8. *Ganiev R.F. and Kononenko V.O.* 1976. Kolebaniya tverdyh tel [Vibrations of solids]. Moscow: Nauka. 432 p.
9. *Kolovskij M.Z.* 1976. Avtomaticheskoe upravlenie vibrozashchitnymi sistemami[Automatic control of vibration protection systems]. Moscow: Nauka. 320 p.
10. *Eliseev S.V. and Eliseev A.V.* 2020. Theory of Oscillations. Structural Mathematical Modeling in Problems of Dynamics of Technical Objects. Cham: Springer International Publishing. 521 p.
11. *Eliseev S.V., Kargapol'cev S.K., Bol'shakov R.S. and Eliseev A.V.* 2020. Rychazhnye svyazi: vozmozhnosti formirovaniya dinamicheskih sostoyanij v mekhanicheskih kolebatel'nyh sistemah [Lever connections: possibilities of formation of dynamic states in mechanical oscillatory systems]. Transport Urala [Transport of the Urals]. 3(66). P. 17–23.
12. *Eliseev A.V., Sitov I.S. and Kuznecov N.K.* 2023. Sistemnyj podhod k ocenke polnoj sovokupnosti dinamicheskih sostoyanij tekhnicheskih ob"ektov v usloviyah svyaznyh vibracionnyh nagruzhenij [A systematic approach to the assessment of the complete set of dynamic states of technical objects under conditions of coherent vibration loads]. Sistemy. Metody. Tekhnologii[Methods. Technologies]. 1 (57). P. 7– 20.
13. *Lur'e A.I.* 1959. Operacionnoe ischislenie i primenenie v tekhnicheskih prilozheniyah[Operational calculus and application in technical applications]. Moscow: Nauka. 368 p.

14. *Bronshtein I.N. and Semendyayev K.A.* (2015) Handbook of Mathematics. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 1225 p.
15. Maple. URL: https://www.maplesoft.com (data accessed March 14, 2023).
16. Svidetel'stvo o registracii programmy dlya EVM 2022667233[Certificate of registration of the computer program], 16.09.2022. Zayavka № 2022666097 ot 31.08.2022.

Eliseev Andrey Vladimirovich. Irkutsk State Transport University, Associate Professor of the Department of Mathematics; Irkutsk National Research Technical University, Associate Professor of the Department of Design and Standardization in Mechanical Engineering. Candidate of Technical Sciences. Docent. Number of printed works: 347 (including 4 monographs). Research interests: methods of structural mathematical modeling.
E-mail: eavsh@ya.ru (Responsible for correspondence).

Kuznetsov Nikolai Konstantinovich. Irkutsk National Research Technical University, Head of the Department of Design and Standardization in Mechanical Engineering. Doctor of Technical Sciences. Professor. Number of printed works: 179 (including 8 monographs). Research interests: dynamics of machines for various purposes operating under conditions of vibration loading. E-mail: knik@istu.edu

Mironov Artem Sergeevich. Irkutsk State Transport University. The applicant. Number of publications: 103. Research interests: methods of structural mathematical modeling. E-mail: art.s.mironov@mail.ru

О природе скрытых аттракторов в нелинейных автономных системах дифференциальных уравнений*

Н.А. Магницкий

Федеральное государственное учреждение «Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук», г. Москва, Россия

Аннотация. В работе на примере проведенного аналитического и численного анализа бифуркаций циклов системы уравнений, содержащей «скрытый» аттрактор, показано, что переход к хаосу в системе происходит, как и в любых других нелинейных хаотических системах дифференциальных уравнений, в соответствии с универсальным бифуркационным сценарием Фейгенбаума-Шарковского-Магницкого. При этом, вследствие отсутствия особых точек и, следовательно, отсутствия гомоклинических и гетероклинических сепаратрисных контуров, в системе реализуется несколько неполных ФШМ-каскадов бифуркаций, формирующих бесконечно листную поверхность двумерного гетероклиничнеского сепаратрисного многообразия (сепаратрисного зигзага), содержащего как все сингулярные аттракторы системы, так и все ее неустойчивые предельные циклы.

Ключевые слова: *диссипативные системы, бифуркации, динамический хаос, скрытый аттрактор, теория ФШМ.*

DOI: 10.14357/20790279230302

Введение

В современной литературе по нелинейной и хаотической динамике широко используется понятие «скрытого» аттрактора автономной системы обыкновенных дифференциальных уравнений в том случае, когда система вместе с нерегулярным аттрактором либо вообще не имеет особых точек (см. [1-3]), либо имеет устойчивые особые точки (см. [4-6]). Авторы таких работ пытаются охарактеризовать «скрытый» аттрактор вычислением одного или нескольких положительных показателей Ляпунова, вычислением размерности Каплана-Йорке или доказательством существования подковы Смейла. Однако, как следует из результатов автора и как продемонстрировано на многочисленных примерах в работах [7-10], существует один универсальный бифуркационный сценарий перехода к хаосу во всех без исключения системах нелинейных дифференциальных уравнений: автономных и неавтономных, диссипативных и консервативных, обыкновенных, с частными производными и с запаздывающим аргументом.

Это сценарий Фейгенбаума-Шарковского-Магницкого, начинающийся каскадом бифуркаций Фейгенбаума удвоения периода цикла или тора и продолжающийся субгармоническим каскадом бифуркаций Шарковского и гомоклиническим (или гетероклиническим) каскадом бифуркаций Магницкого. Все рождающиеся в ходе реализации такого сценария нерегулярные аттракторы являются исключительно сингулярными аттракторами, то есть непериодическими ограниченными почти устойчивыми траекториями в конечномерном или бесконечномерном фазовом пространстве, в любой окрестности которых содержится бесконечное число неустойчивых периодических траекторий. При этом доказано, что любой сингулярный циклический аттрактор, порожденный ФШМ – каскадом бифуркаций сингулярного цикла, принадлежит замыканию его неустойчивого двумерного инвариантного многообразия (сепаратрисной поверхности), являющегося бесконечно листным складчатым гетероклиническим сепаратрисным зигзагом, натянутым на сепаратрисное дерево (листы Мебиуса) каскада Фейгенбаума и следующих за ним каскадов бифуркаций [7-8]. Следовательно, на любом сингулярном аттракторе (почти устойчивой непериодической траектории) старший характеристический показатель Ляпунова равен нулю. Эффект положительности показателя Ляпунова

* Работа поддержана Российским Научным Фондом (гранты 23-21-00095 и 23-21-00107).

является исключительно следствием ошибок вычислений, так как из-за наличия всюду плотного множества непериодических и периодических неустойчивых траекторий численное движение возможно только по всей области, в которой расположена траектория сингулярного аттрактора, а не по самой его траектории. Кроме того, численный показатель Ляпунова будет также положительным и при движении по устойчивой периодической траектории большого периода, находящейся в окрестности какого-либо сингулярного аттрактора. Таким образом, ошибочно найденные численно положительные показатели Ляпунова не являются характеристикой хаотического движения по «скрытому» аттрактору. Кроме того, доказано, что движение по сложному сингулярному аттрактору в окрестности петли сепаратрисы седло-фокуса или других гомоклинических и гетероклинических сепаратрисных контуров не может быть описано ни подковой Смейла, ни даже бесконечным числом таких подков.

Целью настоящей статьи является показать, что «скрытый» аттрактор, рассмотренный в работе [3], также является обычным сложным сингулярным аттрактором, порожденным каскадом бифуркаций по сценарию ФШМ.

1. Аналитическое исследование

Рассмотренная в работе [1] система дифференциальных уравнений имеет следующий вид:

$$\dot{x} = a(y - x) - w,\ \ \dot{y} = xz,\ \ \dot{z} = b - xy,\ \ \dot{w} = x. \quad (1)$$

При этом «скрытый» аттрактор найден авторами работы [3] в системе (1) при $a = 4$, $b = 40$, а якобы положительный показатель Ляпунова вычислен в MATLAB интегрированием уравнений системы методом Рунге-Кутта четвертого порядка, что, как отмечено выше, является абсолютно бессмысленной процедурой и не является характеристикой аттрактора.

То, что система (1) должна иметь какой-либо аттрактор при всех $a > 0$, следует из ее диссипативности, так как для дивергенции ее правой части $\boldsymbol{F}(x, y, z, w)$ имеет место:

$$div\boldsymbol{F} = \left(\frac{\partial F_1}{\partial x} + \frac{\partial F_2}{\partial y} + \frac{\partial F_3}{\partial z} + \frac{\partial F_4}{\partial w}\right) = -a < 0.$$

Обычно сложный сингулярный аттрактор рождается в результате ФШМ-каскада бифуркаций устойчивого цикла или тора, которые сами рождаются в результате одной или двух бифуркаций Андронова-Хопфа из первоначально устойчивой особой точки. Ясно, что этот сценарий не проходит для системы (1), так как она вообще не имеет особых точек при $b \neq 0$. В этом случае ее правые части не могут равняться нулю одновременно. Тем не менее численно покажем, что найденный в системе «скрытый» аттрактор также является сложным сингулярным аттрактором ФШМ-каскадов бифуркаций по параметру a некоторых изначально устойчивых предельных циклов системы (1), не рожденных из особых точек в результате бифуркаций Андронова-Хопфа, а рожденных в результате седло-узловых бифуркаций.

2. Численный анализ

Исследование динамики решений системы (1) проведем численными методами при $b = 40$ и при уменьшении значений бифуркационного параметра $a < 15.5$. Численный анализ показывает, что при $a = 15.48$ система имеет три устойчивых предельных цикла, на которые можно выйти интегрированием уравнений системы с различными начальными условиями. На рис. 1 показаны проекции этих циклов на плоскость (x, z). При уменьшении параметра a центральный симметричный цикл претерпевает бифуркацию типа вилки, оставаясь неустойчивым в системе. А с двумя родившимися при этом устойчивыми предельными циклами происходят каскады бифуркаций в полном соответствии с теорией ФШМ. Так, устойчивые циклы периода два наблюдаются при $a = 13.5$, периода четыре – при $a = 13.37$, периода восемь –

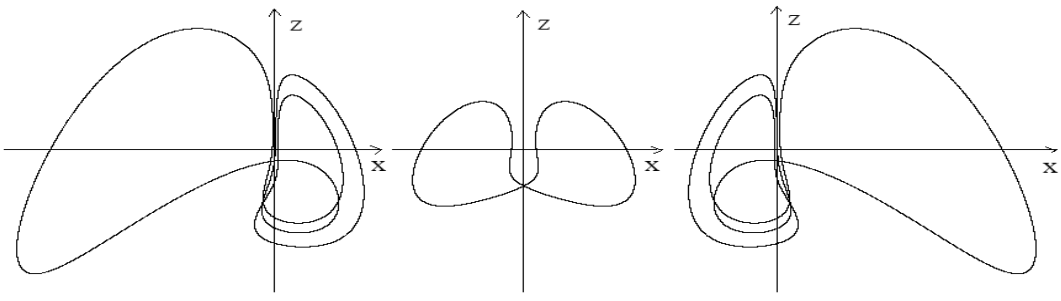


Рис.1. Проекции на плоскость (x, z) устойчивых циклов системы (1) при $a = 15.48$

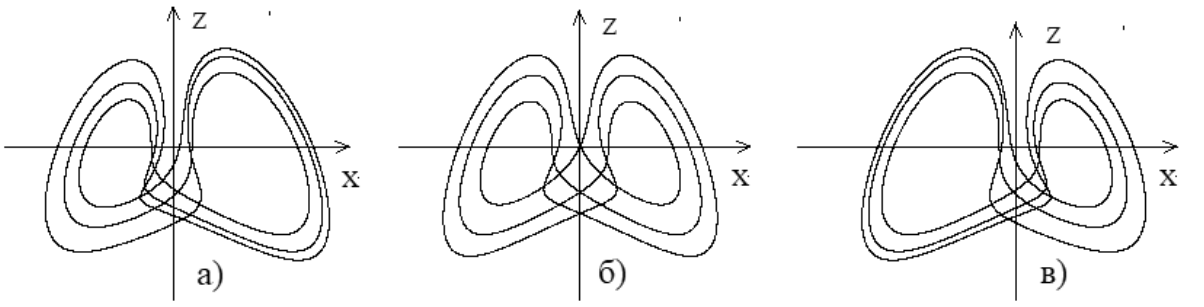


Рис. 2. Проекции на плоскость (x, z) устойчивых циклов периода три каскадов Шарковского при a = 12.71 (а,в) и a = 10.3 (б)

при a = 13.36, первые сингулярные аттракторы Фейгенбаума – при a = 13.34. Циклы периода три, завершающие субгармонические каскады бифуркаций Шарковского можно наблюдать при a = 12.71 (рис. 2,а,в).

Дальнейшее усложнение динамики решений системы происходит, как и в системе уравнений Лоренца, посредством слияния двух лент гетероклинических сепаратрисных многообразий, содержащих все неустойчивые циклы, с появлением каскада бифуркаций гетероклинических циклов. Один из устойчивых гетероклинических циклов, найденный при a = 10.3, изображен на рис. 2,б.

При дальнейшем уменьшении значений параметра a происходит рождение в результате седло-узловых бифуркаций новых устойчивых циклов, найденных при a = 10.1 и показанных на рис. 3. С циклами, изображенными на рис. 3а и рис. 3,г происходят бифуркации удвоения периодов при a = 9.95 и затем полные субгармонические каскады бифуркаций Шарковского. Циклы, изображенные на рис.3,б и рис.3,в остаются устойчивыми до a = 9.25, а затем также претерпевают полные субгармонические каскады бифуркаций Шарковского.

На рис.4. показаны найденные при a = 8.767 устойчивые циклы периодов три, завершающие субгармонические каскады бифуркаций Шарковского, начало которым положено циклами, изображенными на рис. 3,б и 3,в.

Таким образом, так называемый «скрытый» аттрактор, найденный в системе (1) при a = 4, является следствием нескольких бесконечных каскадов бифуркаций в соответствии с универсальным бифуркационным сценарием Фейгенбаума-Шарковского-Магницкого при уменьшении значений бифуркационного параметра a. То есть «скрытый» аттрактор системы не является каким-то особенным видом нерегулярных аттракторов, но точно так же, как и в любых других трехмерных и многомерных нелинейных диссипативных системах дифференциальных уравнений, он является одним из бесконечного числа сингулярных аттракторов системы. Так как все циклы, рождающиеся и становящиеся неустойчивыми на всех стадиях всех ФШМ-каскадов бифуркаций, не исчезают, а остаются в системе, то сложность сингулярных аттракторов системы (1) существенно возрастает при уменьшении параметра a, а области устойчивости рождающихся в результате седло-узловых бифуркаций новых устойчивых циклов значительно уменьшаются, что существенно ограничивает возможность их численного нахождения при $a \gtrsim 4$. Хотя, несомненно, такие устойчивые циклы должны существовать и в интервале

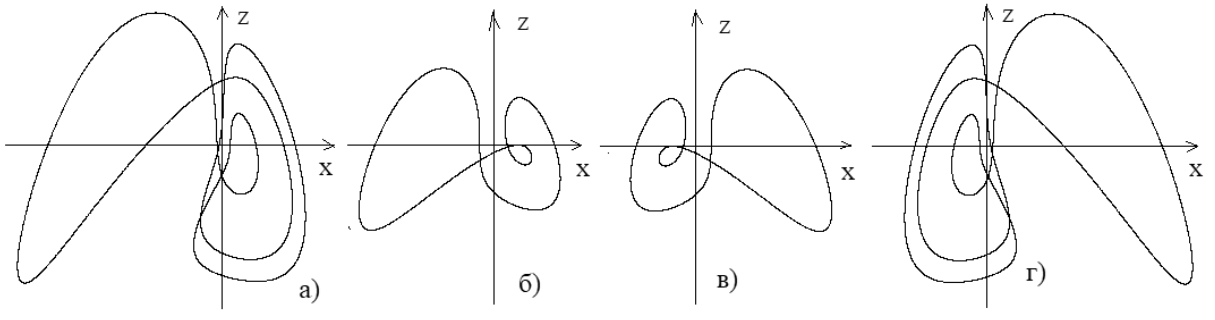


Рис. 3. Проекции на плоскость (x, z) устойчивых циклов системы (1) при a = 10.1

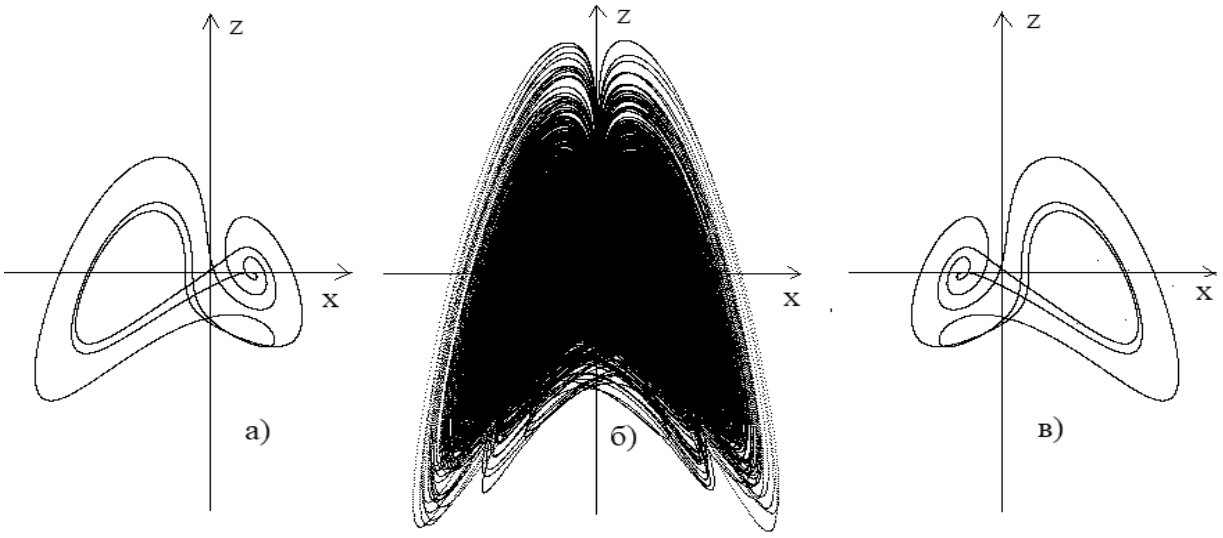


Рис. 4. Проекции на плоскость (x, z) устойчивых циклов системы (1) периода три из каскадов Шарковского при a = 8.767 (4,а и 4,в) и «скрытого» аттрактора при a = 4 (4,б)

$4 < a < 8.7$. Симметричность «скрытого» аттрактора относительно оси z и рождающихся на всех стадиях всех каскадов бифуркаций пар симметричных циклов вытекает из симметрии уравнений системы (1): $x \to -x$, $y \to -y$, $z \to -z$, $w \to -w$.

Заключение

В работе проведено численное исследование природы «скрытых» аттракторов нелинейных автономных систем дифференциальных уравнений на примере нерегулярного аттрактора системы (1). Показано, что переход к аттрактору в данной нелинейной системе дифференциальных уравнений происходит, как и в любых других нелинейных хаотических системах дифференциальных уравнений, в соответствии с универсальным бифуркационным сценарием Фейгенбаума-Шарковского-Магницкого. При этом, вследствие отсутствия особых точек и, следовательно, гомоклинических и гетероклинических сепаратрисных контуров, в системе реализуется несколько неполных ФШМ-каскадов бифуркаций, формирующих бесконечно листную поверхность двумерного гетероклиничнеского сепаратрисного многообразия (сепаратрисного зигзага), содержащего как все сингулярные аттракторы системы, так и все ее неустойчивые предельные циклы. Старший характеристический показатель Ляпунова на любом сингулярном аттракторе системы является нулевым, а его найденные численно положительные значения лишь результатом ошибок вычислений.

Литература

1. *Pham V. T., Volos Ch. K., Jafari S. and Kapitaniak T.* Coexistence of hidden chaotic attractors in a novel no-equilibrium system // Nonlinear Dynamics 2017. V 87. No.3. P. 2001–2010.
2. *Zuo Z. L. and Li C.* Multiple attractors and dynamic analysis of a no-equilibrium chaotic system // Optik. 2016. V. 127. No. 19. P. 7952–7957.
3. *Sambas1 A., Mamat M., Vaidyanathan S., Mohamed M. A. and MadaSanjaya W. S.* A New 4-D Chaotic System with Hidden Attractor and its Circuit Implementation // Int. J. Eng. & Tech. 2018. V.7. No.3. P. 1245-1250
4. *Wang X., Chen G.R.* A chaotic system with only one stable equilibrium // Commun. Nonlinear Sci. Numer. Simul. 2012. No. 17. P.1264-1272.
5. *Huan S., Li Q., Yang X.-S.* Horseshoes in a chaotic system with only one stable equilibrium // Int. J. Bifurc. Chaos. 2013. Vol. 23. No. 1. 1350002.
6. *Wei Z., Zhang W.* Hidden hyperchaotic attractors in a modified lorenz-stenflo system with only one stable equilibrium // Int. J. Bifurc. Chaos. 2014. V. 24, No. 10. 1450127.
7. *Магницкий Н.А.* О топологической структуре сингулярных аттракторов нелинейных систем дифференциальных уравнений // Дифференциальные уравнения. 2010. Т. 46. № 11. С. 1551–1560.
8. *Магницкий Н.А.* Теория динамического хаоса. М.: Ленанд. 2011. 320 с.
9. *Magnitskii N.A.* Universality of Transition to Chaos in All Kinds of Nonlinear Differential Equations. Chapter in Nonlinearity, Bifurcation and Chaos - Theory and Applications. Rijeca: InTech. 2012. P. 133-174.

10. *Magnitskii N.A*. Bifurcation Theory of Dynamical Chaos. Chapter in Chaos Theory. Rijeka: InTech. 2018. P.197-215

Магницкий Николай Александрович. Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» РАН, г. Москва, Россия. Главный научный сотрудник. Доктор физико-математических наук, профессор. Область научных интересов: нелинейные дифференциальные уравнения, хаотическая динамика, математическая физика, нейронные сети, интегральные уравнения, математическое моделирование. E-mail: nikmagn@gmail.com

On the nature of hidden attractors in nonlinear autonomous systems of differential equations

N.A. Magnitskii

Federal Research Center "Computer Science and Control" of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Abstract. Using the example of the performed analytical and numerical analysis of cycle bifurcations of a system of equations containing a "hidden" attractor, it is shown that the transition to chaos in the system occurs, as in any other nonlinear chaotic systems of differential equations, in accordance with the universal Feigenbaum-Sharkovsky-Magnitskii bifurcation scenario. At the same time, due to the absence of singular points and, consequently, the absence of homoclinic and heteroclinic separatrix contours, several incomplete FShM cascades of bifurcations are realized in the system, forming an infinitely sheeted surface of a two-dimensional heteroclinic separatrix manifold (separatrix zigzag) containing both all singular attractors of the system and all its unstable limit cycles.

Keywords: *dissipative systems, bifurcations, dynamic chaos, "hidden" attractor, FShM theory.*
DOI: 10.14357/20790279230302

References

1. *Pham V. T., Volos Ch. K., Jafari S. and Kapitaniak T*. Coexistence of hidden chaotic attractors in a novel no-equilibrium system // Nonlinear Dynamics 2017. V 87. No.3. P. 2001–2010.
2. *Zuo Z. L. and Li C.* Multiple attractors and dynamic analysis of a no-equilibrium chaotic system // Optik. 2016. V. 127. No. 19. P. 7952–7957.
3. *Sambas1 A., Mamat M., Vaidyanathan S., Mohamed M. A. and MadaSanjaya W. S.* A New 4-D Chaotic System with Hidden Attractor and its Circuit Implementation // Int. J. Eng. & Tech. 2018. V.7. No.3. P. 1245-1250
4. *Wang X., Chen G.R*. A chaotic system with only one stable equilibrium // Commun. Nonlinear Sci. Numer. Simul. 2012. No. 17. P.1264-1272.
5. *Huan S., Li Q., Yang X.-S*. Horseshoes in a chaotic system with only one stable equilibrium // Int. J. Bifurc. Chaos. 2013. Vol. 23. No. 1. 1350002.
6. *Wei Z., Zhang W.* Hidden hyperchaotic attractors in a modified lorenz-stenflo system with only one stable equilibrium // Int. J. Bifurc. Chaos. 2014. V. 24, No. 10. 1450127.
7. *Magnitskiy N.A.* O topologicheskoy strukture singulyarnykh attraktorov nelineynykh sistem differentsial'nykh uravneniy // Differents. uravneniya. 2010. T. 46. № 11. P. 1551–1560.
8. *Magnitskiy N.A.* Teoriya dinamicheskogo khaosa. M.: Lenand, 2011. 320 p.
9. *Magnitskii N.A.* Universality of Transition to Chaos in All Kinds of Nonlinear Differential Equations. Chapter in Nonlinearity, Bifurcation and Chaos - Theory and Applications. Rijeca: InTech. 2012. P. 133-174.
10. *Magnitskii N.A*. Bifurcation Theory of Dynamical Chaos. Chapter in Chaos Theory. Rijeka: InTech. 2018. P.197-215

Magnitskii N.A. Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor. Federal Research Center "Computer Science and Control" of Russian Academy of Sciences, 44/2 Vavilova Str., Moscow. Research interests: nonlinear differential equations, chaotic dynamics, mathematical physics, neural networks, integral equations, mathematical modeling. E-mail: nikmagn@gmail.com

Приближение Гирсановской меры с логарифмической доходностью в случае тяжелохвостных распределений

А.Р. Данилишин

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия

Аннотация. Статья посвящена дальнейшему развитию темы применения расширенного принципа Гирсанова для тяжелохвостных распределений. Расширенный принцип Гирсанова предполагает поиск условного математического ожидания отношения цен базовых активов опционных контрактов в текущий момент времени к ценам базовых активов в предыдущий момент времени. Для этого необходимо выбрать соответствующую модель, которая будет наилучшим способом описывать динамику данного отношения цен. В качестве объекта моделирования принято рассматривать либо линейную доходность, либо логарифмическую. Риск-нейтральная динамика для распределения с тяжелым хвостом (Su Джонсона) в случае моделирования линейной доходности была получена в статье [1]. В статье [2], была показана эффективность найденного подхода оценки опционных контрактов с помощью полученной мартингальной меры. Однако может возникнуть необходимость использования логарифмической доходности, которая обладает рядом полезных свойств (неотрицательность цен базовых активов, симметричность относительно роста и падения цен). В данной статье получена мартингальная мера для случая, где рассматривается приближение логарифмической доходности, которое в простейшем случае совпадает с линейной доходностью и по мере увеличения степени приближения стремится к логарифмической.

Ключевые слова: *ARIMA-GARCH, мартингальная мера; расширенный принцип Гирсанова, распределение Su Джонсона.*

DOI: 10.14357/20790279230303

Введение

ARIMA (p, d, q) – GARCH (r, g) (AutoRegressive Integrated Moving Average – Generalized Autoregressive Conditional Heteroskedasticity) модель является комбинацией двух популярных статистических моделей – ARIMA и GARCH. Она используется для анализа и прогнозирования временных рядов, в основном, в финансовой экономике. Ее широкое применение в современных методах описания ценовой динамики связано с несколькими ключевыми факторами. Прежде всего, ценообразование производных финансовых инструментов, таких как опционы или фьючерсы, тесно связано с двумя основными аспектами: направлением изменения базового актива и его волатильностью. ARIMA-GARCH модель предоставляет инструменты для анализа и прогнозирования обоих факторов. Авторегрессионная (AR) и скользящая средняя (MA) компоненты ARIMA-модели позволяют учесть тренды и особенности ценового движения базового актива. В то же время, GARCH-модель учитывает изменчивость и волатильность, которые могут существенно влиять на цены производных инструментов. Использование ARIMA-GARCH модели в различных методиках получения риск-нейтральных динамик цен открывает широкие возможности для анализа безарбитражных стратегий и оценки производных финансовых инструментов [3, 4]. Модель ARIMA – GARCH имеет следующий вид:

$$\Delta^d Y_t = m_t + h_t\varepsilon_t,\ \varepsilon_t \sim iid(0,1), h_t > 0,$$

$$m_t = \mathbb{E}[\Delta^d Y_t | \mathcal{F}_{t-1}] = \phi_0 + \phi_1 \Delta^d Y_{t-1} +$$

$$+ \cdots + \phi_p \Delta^d Y_{t-p} + \theta_1 \varepsilon_{t-1} + .. + \theta_q \varepsilon_{t-q},$$

$$h_t^2 = Var[\Delta^d Y_t | \mathcal{F}_{t-1}] = \alpha_0 + \alpha_1 h_{t-1}^2 +$$

$$+ \alpha_r h_{t-r}^2 + \cdots + \beta_1 h_{t-1}^2 \varepsilon_{t-1}^2 + \beta_g h_{t-g}^2 \varepsilon_{t-g}^2,$$

где

- p – порядок авторегрессии, r – порядок ARCH членов, m_t – ARIMA часть модели;

- q – порядок скользящего среднего, g – порядок GARCH членов, h_t^2 – GARCH часть модели;
- d – порядок разности временного ряда;
- $\phi_i, \theta_i, \alpha_i, \beta_i$ – параметры модели.

Безарбитражность рынка является ключевым концептом в финансовой экономике. Безарбитражность означает отсутствие возможности получения безрисковой прибыли путем использования несовершенств или неэффективностей рынка. Рынок считается безарбитражным если не существует таких торговых стратегий, которые гарантированно приносят прибыль без какого-либо риска. Условие безарбитражности формализуется через понятие мартингальных мер. Мартингальная мера ($\mathbb{Q}$) – это вероятностная мера, при которой дисконтированные цены активов (последовательность $\tilde{S}_t$) представляют собой мартингалы, то есть математическое ожидание будущих цен равно текущим ценам. Здесь $\tilde{S}_k = e^{-rk}S_k$ – дисконтированные цены активов (r – безрисковая процентная ставка). Если на рынке существует мартингальная мера, эквивалентная исходной (основной) мере вероятности ($\mathbb{P}$), то рынок безарбитражен, так как отсутствуют возможности для получения безрисковой прибыли. Однако в случае неполного рынка, когда доступны не все активы или инструменты, безарбитражность может быть определена иначе. В таких условиях безарбитражность рынка равносильна существованию нескольких эквивалентных мартингальных мер, при которых цены активов представляют собой мартингалы. На неполном рынке может существовать неопределенность в оценке риска и доходности активов, и различные мартингальные меры могут представлять различные взгляды на будущую динамику цен.

Одним из подходов к получению мартингальной меры из физической для неполного рынка является использование расширенного принципа Гирсанова [5]. В этом случае мартингальная мера получается естественным путем как мера, которая обеспечивает минимум квадрата скорректированных на риск затрат хеджирования опционного контракта. Формально задачу поиска такой меры можно представить в следующем виде.

Найти стратегию хеджирования $\pi = (\eta_t, t = 1, \dots, T)$, где η_t – количество единиц базового актива , которое агент динамически меняет каждый день (затрачивая на это капитал в размере $c_t(\tilde{S}_t)$), реализующая

$$\min_{\eta_{t-1}} \mathbb{E}^{\mathbb{P}}\left[c_t^2(\tilde{S}_t)\middle|\mathcal{F}_{t-1}\right], \forall t = 1, \dots, T,$$

что соответствует выбору замены меры с плотностью (доказательство приведено в статье Elliott R. J., Madan D. B. “A discrete time equivalent martingale measure” [5]):

$$\frac{d\mathbb{Q}}{d\mathbb{P}}|_{\mathcal{F}_{t-1}} = Z_t = \prod_{k=1}^{T} \frac{g_{W_k}^{\mathbb{P}}\left(\frac{\tilde{S}_k}{\tilde{S}_{k-1}}\right)e^{v_k}}{g_{W_k}^{\mathbb{P}}\left(e^{-v_k}\frac{\tilde{S}_k}{\tilde{S}_{k-1}}\right)},$$

где

- $\mathcal{F}_{t-1}$ – фильтрация вероятностного пространства $(\Omega, \mathcal{F}, \mathbb{P})$;
- $W_k = M_k/M_{k-1}$ (M_k – мартингальный случайный процесс);
- $\tilde{S}_k = e^{-rk}S_k$ – дисконтированные цены базовых активов (r – безрисковая процентная ставка);
- $g_{W_k}^{\mathbb{P}}(*)$ – условная плотность распределения случайного процесса W_k;
- $v_k = -r + \ln\left(\mathbb{E}^{\mathbb{P}}\left[\frac{S_k}{S_{k-1}}\middle|\mathcal{F}_{k-1}\right]\right)$.

При этом динамика дисконтированных цен базовых активов задается уравнением $\tilde{S}_k = \tilde{S}_{k-1}e^{v_t}W_t$. Полученный выше случайный процесс Z_t является производной Радона-Никодима и позволяет совершать переход от физической меры к риск-нейтральной.

Для обеспечения стационарности моделируемого ряда в финансовой математике принято рассматривать логарифмическую доходность цен базовых активов $Y_k = \ln\left(\frac{S_k}{S_{k-1}}\right)$. Тогда переход к мартингальной мере можно осуществить через условную плотность распределения $f_{Y_k}^{\mathbb{P}}(*)$ случайного процесса Y_k:

$$\frac{d\mathbb{Q}}{d\mathbb{P}}|_{\mathcal{F}_{t-1}} = Z_t = \prod_{k=1}^{t} \frac{f_{Y_k}^{\mathbb{P}}\left(Y_k - r + \ln\left(M_{Y_k|\mathcal{F}_{k-1}}(1)\right)\right)}{f_{Y_k}^{\mathbb{P}}(Y_k)}.$$

Здесь значение производящей функции моментов в точке один $\left(M_{Y_k|\mathcal{F}_{k-1}}(1)\right)$ следует из v_k, где

$$\mathbb{E}^{\mathbb{P}}\left[\frac{S_k}{S_{k-1}}\middle|\mathcal{F}_{k-1}\right] = \mathbb{E}^{\mathbb{P}}\left[e^{\ln\left(\frac{S_k}{S_{k-1}}\right)}\middle|\mathcal{F}_{k-1}\right] = \mathbb{E}^{\mathbb{P}}[e^{Y_k}|\mathcal{F}_{k-1}].$$

Как известно, для тяжелохвостных распределений не существует производящей функции моментов в точках отличных от нуля [6, 7], поэтому оценить $M_{Y_k|\mathcal{F}_{k-1}}(1)$ не представляется возможным. Для решения этой проблемы в статье [1] было предложено моделировать относительные приращения цены базовых активов $\tilde{Y}_t = \frac{S_t}{S_{t-1}} - 1$ (модификация расширенного принципа Гирсанова), тогда ARIMA $(\tilde{m}_t)$ – GARCH $(\tilde{h}_t)$ случайный процесс [8,9] $\left(\tilde{Y}_t = \tilde{m}_t + \tilde{h}_t\varepsilon_t, \varepsilon_t \sim iid(0,1)\right)$ по мартингальной мере будет иметь следующий вид (p – количество начислений риск-нейтральной ставки за год):

$$\tilde{Y}_t = \left(1+\frac{r}{p}\right)^p - 1 + \tilde{h}_t \frac{\left(1+\frac{r}{p}\right)^p}{1+\tilde{m}_t}\varepsilon_t,\ \varepsilon_t \sim iid(0,1).$$

В статье [2] показано, что данный подход дает хорошие результаты для задачи оценивания справедливой стоимости опционных контрактов. Однако может возникнуть прикладная задача, где в качестве объекта моделирования необходимо рассматривать логарифмическую доходность, которая в случае тяжелохвостных распределений не дает возможности применить расширенный принцип Гирсанова. В данной статье рассматривается поиск мартингальной меры с использованием первых членов разложения логарифмической доходности в ряд Тейлора.

Статья построена следующим образом. В Разделе 1 рассматривается подход к обобщению модификации расширенного принципа Гирсанова и доказываются основные теоремы, необходимые для перехода от физической меры к мартингальной. В Разделе 2 показаны частные случаи приближений логарифмической доходности.

1. Обобщение модификации расширенного принципа Гирсанова

Согласно второму замечательному пределу $\lim\limits_{n\to\infty}\left(\frac{Y_k}{n}+1\right)^n = e^{Y_k} = \frac{S_k}{S_{k-1}}$, тогда, если в качестве моделируемой величины рассматривать $\tilde{Y}_k = \left(\left(\frac{S_k}{S_{k-1}}\right)^{\frac{1}{n}} - 1\right)n$, то по мере роста n (где n – степень приближения), величина $\tilde{Y}_k$ будет стремиться к логарифмической доходности Y_k. Выбор $\tilde{Y}_k$ в качестве моделируемого объекта является обобщением модификации расширенного принципа Гирсанова [1], т.к. при n = 1, мы получим линейную доходность, а по мере роста n мы будем приближаться к логарифмической доходности.

Рассматриваемые доходности Y_k и $\tilde{Y}_k$ при использовании одной модели могут по-разному описывать динамику отношения цен базовых активов (т.к. оцененные параметры модели могут отличаться), что, в свою очередь, даст разные мартингальные меры. Эти меры будут приблизительно обеспечивать минимум квадрата скорректированных на риск затрат хеджирования портфеля активов. Данное приближение будет стремиться к истинному минимуму по мере приближения построенной физической меры к истинной мере отношения цен базовых активов.

Теорема 1. Случайный процесс Z_t, выраженный через условную плотность распределения $g^{\mathbb{P}}_{W_t}$ случайного процесса W_t, можно представить через условную плотность распределения $f^{\mathbb{P}}_{\tilde{Y}_t}$ по фильтрации $\mathcal{F}_{t-1}$ случайного процесса $\tilde{Y}_t$:

$$\prod_{k=1}^{t} \frac{g^{\mathbb{P}}_{W_k}\left(\frac{\tilde{S}_k}{\tilde{S}_{k-1}}\right)e^{v_k}}{g^{\mathbb{P}}_{W_k}\left(e^{-v_k}\frac{\tilde{S}_k}{\tilde{S}_{k-1}}\right)} =$$

$$\prod_{k=1}^{t} e^{\frac{v_k}{n}} \frac{f^{\mathbb{P}}_{\tilde{Y}_k}\left(\left(\left(\frac{\tilde{Y}_k}{n}+1\right)e^{\frac{v_k}{n}}-1\right)n\right)}{f^{\mathbb{P}}_{\tilde{Y}_k}\left(\tilde{Y}_k\right)}.$$

Представим выражение для $g^{\mathbb{P}}_{W_k}\left(\frac{\tilde{S}_k}{\tilde{S}_{k-1}}\right)$ через условную плотность распределения $f^{\mathbb{P}}_{\tilde{Y}_k}$:

$$g^{\mathbb{P}}_{W_k}\left(\frac{\tilde{S}_k}{\tilde{S}_{k-1}}\right) = \frac{dP(W_k < a)}{da}\Big|_{a=\frac{\tilde{S}_k}{\tilde{S}_{k-1}}} = \frac{dP\left(\frac{\tilde{S}_k}{\tilde{S}_{k-1}}e^{-v_k} < a\right)}{da}\Big|_{a=\frac{\tilde{S}_k}{\tilde{S}_{k-1}}}$$
$$= \frac{dP\left(\frac{S_k}{S_{k-1}} < ae^{v_k+r}\right)}{da}\Big|_{a=\frac{\tilde{S}_k}{\tilde{S}_{k-1}}} = \frac{dP\left(\left(\frac{\tilde{Y}_k}{n}+1\right)^n < ae^{v_k+r}\right)}{da}\Big|_{a=\frac{\tilde{S}_k}{\tilde{S}_{k-1}}}$$
$$= \frac{dP\left(\tilde{Y}_k < \left(a^{\frac{1}{n}}e^{\frac{v_k+r}{n}}-1\right)n\right)}{da}\Big|_{a=\frac{\tilde{S}_k}{\tilde{S}_{k-1}}}$$

$$= f_{\tilde{Y}_k}^{\mathbb{P}}\left(\left(a^{\frac{1}{n}}e^{\frac{v_k+r}{n}}-1\right)n\right)_{a=\frac{\tilde{S}_k}{\tilde{S}_{k-1}}}\frac{dP\left(\left(a^{\frac{1}{n}}e^{\frac{v_k+r}{n}}-1\right)n\right)}{da}\Big|_{a=\frac{\tilde{S}_k}{\tilde{S}_{k-1}}}$$

$$= f_{\tilde{Y}_k}^{\mathbb{P}}\left(\left(\left(\frac{\tilde{Y}_k}{n}+1\right)e^{\frac{v_k}{n}}-1\right)n\right)\left(\left(\frac{\tilde{Y}_k}{n}+1\right)^{1-n}e^{\frac{v_k}{n}+r}\right).$$

Проделаем аналогичные преобразования для знаменателя $g_{W_k}^{\mathbb{P}}\left(e^{-v_k}\frac{\tilde{S}_k}{\tilde{S}_{k-1}}\right)$:

$$g_{W_k}^{\mathbb{P}}\left(e^{-v_k}\frac{\tilde{S}_k}{\tilde{S}_{k-1}}\right) = \frac{dP(W_k<a)}{da}\Big|_{a=e^{-v_k}\frac{\tilde{S}_k}{\tilde{S}_{k-1}}}$$

$$= \frac{dP\left(\frac{\tilde{S}_k}{\tilde{S}_{k-1}}e^{-v_k}<a\right)}{da}\Big|_{a=e^{-v_k}\frac{\tilde{S}_k}{\tilde{S}_{k-1}}}\frac{dP\left(\frac{S_k}{S_{k-1}}<ae^{v_k+r}\right)}{da}\Big|_{a=e^{-v_k}\frac{\tilde{S}_k}{\tilde{S}_{k-1}}}$$

$$= \frac{dP\left(\left(\frac{\tilde{Y}_k}{n}+1\right)^n<ae^{v_k+r}\right)}{da}\Big|_{a=e^{-v_k}\frac{\tilde{S}_k}{\tilde{S}_{k-1}}} = \frac{dP\left(\tilde{Y}_k<\left(a^{\frac{1}{n}}e^{\frac{v_k+r}{n}}-1\right)n\right)}{da}\Big|_{a=e^{-v_k}\frac{\tilde{S}_k}{\tilde{S}_{k-1}}}$$

$$= f_{\tilde{Y}_k}^{\mathbb{P}}\left(\left(a^{\frac{1}{n}}e^{\frac{v_k+r}{n}}-1\right)n\right)_{a=\frac{\tilde{S}_k}{\tilde{S}_{k-1}}}\frac{dP\left(\left(a^{\frac{1}{n}}e^{\frac{v_k+r}{n}}-1\right)n\right)}{da}\Big|_{a=e^{-v_k}\frac{\tilde{S}_k}{\tilde{S}_{k-1}}}$$

$$= f_{\tilde{Y}_k}^{\mathbb{P}}(\tilde{Y}_k)\left(\left(\tilde{Y}_k+1\right)^{1-n}e^{v_k+r}\right).$$

Окончательно получим:

$$\frac{g_{W_k}^{\mathbb{P}}\left(\frac{\tilde{S}_k}{\tilde{S}_{k-1}}\right)e^{v_k}}{g_{W_k}^{\mathbb{P}}\left(e^{-v_k}\frac{\tilde{S}_k}{\tilde{S}_{k-1}}\right)} = \frac{f_{\tilde{Y}_k}^{\mathbb{P}}\left(\left(\left(\frac{\tilde{Y}_k}{n}+1\right)e^{\frac{v_k}{n}}-1\right)n\right)\left(\left(\frac{\tilde{Y}_k}{n}+1\right)^{1-n}e^{\frac{v_k}{n}+r}\right)e^{v_k}}{f_{\tilde{Y}_k}^{\mathbb{P}}(\tilde{Y}_k)\left(\left(\frac{\tilde{Y}_k}{n}+1\right)^{1-n}e^{v_k+r}\right)}$$

$$= e^{\frac{v_k}{n}}\frac{f_{\tilde{Y}_k}^{\mathbb{P}}\left(\left(\left(\frac{\tilde{Y}_k}{n}+1\right)e^{\frac{v_k}{n}}-1\right)n\right)}{f_{\tilde{Y}_k}^{\mathbb{P}}(\tilde{Y}_k)}.$$

Теорема 2. Случайный процесс $\tilde{Y}_t = \tilde{m}_t + \tilde{h}_t\varepsilon_t$, где $\tilde{m}_t = \mathbb{E}^{\mathbb{P}}[\tilde{Y}_t|\mathcal{F}_{t-1}]$, $\tilde{h}_t^2 = Var^{\mathbb{P}}[\tilde{Y}_t|\mathcal{F}_{t-1}]$, описываемый ARIMA-GARCH моделью по физической мере, при переходе к мартингальной мере будет иметь следующий вид:

$$\tilde{Y}_t = (\tilde{m}_t+n)e^{-\frac{v_t}{n}} - n + e^{-\frac{v_t}{n}}\tilde{h}_t\varepsilon_t, \varepsilon_t \sim iid(0,1),$$

$$v_t = -r + \ln\left(\mathbb{E}^{\mathbb{P}}\left[\left(\tilde{Y}_t+1\right)^n\middle|\mathcal{F}_{t-1}\right]\right).$$

Найдем условное математическое ожидание по мартингальной мере:

$$\mathbb{E}^{\mathbb{Q}}[\tilde{Y}_t|\mathcal{F}_{t-1}] = \mathbb{E}^{\mathbb{P}}\left[\tilde{Y}_t e^{\frac{v_t}{n}} \frac{f_{\tilde{Y}_t}^{\mathbb{P}}\left(\left(\left(\frac{\tilde{Y}_t}{n}+1\right)e^{\frac{v_t}{n}}-1\right)n\right)}{f_{\tilde{Y}_t}^{\mathbb{P}}(\tilde{Y}_t)}\middle|\mathcal{F}_{t-1}\right] =$$

$$= \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{y}_t e^{\frac{v_t}{n}} \frac{f_{\tilde{Y}_t}^{\mathbb{P}}\left(\left(\left(\frac{\tilde{Y}_t}{n}+1\right)e^{\frac{v_t}{n}}-1\right)n\right)}{f_{\tilde{Y}_t}^{\mathbb{P}}(\tilde{y}_t)} f_{\tilde{Y}_t}^{\mathbb{P}}(\tilde{y}_t)d\tilde{y}_t$$

$$= \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{y}_t e^{\frac{v_t}{n}} f_{\tilde{Y}_t}^{\mathbb{P}}\left(\left(\left(\frac{\tilde{Y}_t}{n}+1\right)e^{\frac{v_t}{n}}-1\right)n\right)d\tilde{y}_t,$$

сделаем замену $u_t = \left(\left(\frac{\tilde{y}_t}{n}+1\right)e^{\frac{v_t}{n}}-1\right)n$, тогда $\tilde{y}_t = \left(\left(\frac{u_t}{n}+1\right)e^{-\frac{v_t}{n}}-1\right)n$, $d\tilde{y}_t = e^{-\frac{v_t}{n}}du_t$,

$$\int_{-\infty}^{\infty} \tilde{y}_t e^{\frac{v_t}{n}} f_{\tilde{Y}_t}^{\mathbb{P}}\left(\left(\left(\frac{\tilde{y}_t}{n}+1\right)e^{\frac{v_t}{n}}-1\right)n\right)d\tilde{y}_t = \int_{-\infty}^{\infty}\left(\left(\frac{u_t}{n}+1\right)e^{-\frac{v_t}{n}}-1\right)n f_{\tilde{Y}_t}^{\mathbb{P}}(u_t)du_t$$

$$= \left(\left(\frac{\tilde{m}_t}{n}+1\right)e^{-\frac{v_t}{n}}-1\right)n.$$

Найдем условное математическое ожидание квадрата $\tilde{Y}_t$ по мартингальной мере:

$$\mathbb{E}^{\mathbb{Q}}[\tilde{Y}_t^2|\mathcal{F}_{t-1}] = \mathbb{E}^{\mathbb{P}}\left[\tilde{Y}_t^2 e^{\frac{v_t}{n}} \frac{f_{\tilde{Y}_t}^{\mathbb{P}}\left(\left(\left(\tilde{Y}_t+1\right)e^{\frac{v_t}{n}}-1\right)n\right)}{f_{\tilde{Y}_t}^{\mathbb{P}}(\tilde{Y}_t)}\middle|\mathcal{F}_{t-1}\right]$$

$$= \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{y}_t^2 e^{\frac{v_t}{n}} f_{\tilde{Y}_t}^{\mathbb{P}}\left(\left(\tilde{y}_t+1\right)e^{\frac{v_t}{n}}-1\right)d\tilde{y}_t = \int_{-\infty}^{\infty}\left(\left(\left(\frac{u_t}{n}+1\right)e^{-\frac{v_t}{n}}-1\right)n\right)^2 f_{\tilde{Y}_t}^{\mathbb{P}}(u_t)du_t$$

$$= \int_{-\infty}^{\infty}\left(u_t^2 e^{-\frac{2v_t}{n}} + 2u_t n e^{-\frac{2v_t}{n}} + n^2 e^{-\frac{2v_t}{n}} - 2u_t n e^{-\frac{v_t}{n}} - 2n^2 e^{-\frac{v_t}{n}} + n^2\right) f_{\tilde{Y}_t}^{\mathbb{P}}(u_t)du_t$$

$$= \mathbb{E}^{\mathbb{P}}[\tilde{Y}_t^2|\mathcal{F}_{t-1}]e^{-\frac{2v_t}{n}} + 2\tilde{m}_t n e^{-\frac{2v_t}{n}} + n^2 e^{-\frac{2v_t}{n}} - 2\tilde{m}_t n e^{-\frac{v_t}{n}} - 2n^2 e^{-\frac{v_t}{n}} + n^2.$$

Возведем $\mathbb{E}^{\mathbb{Q}}[\tilde{Y}_t|\mathcal{F}_{t-1}]$ в квадрат:

$$\mathbb{E}^{\mathbb{Q}}[\tilde{Y}_t|\mathcal{F}_{t-1}]^2 = \mathbb{E}^{\mathbb{P}}[\tilde{Y}_t|\mathcal{F}_{t-1}]^2 e^{-\frac{2v_t}{n}} + 2\tilde{m}_t n e^{-\frac{2v_t}{n}} + n^2 e^{-\frac{2v_t}{n}} - 2\tilde{m}_t n e^{-\frac{v_t}{n}} - 2n^2 e^{-\frac{v_t}{n}} + n^2.$$

Окончательно получим выражение для условной дисперсии:

$$Var^{\mathbb{Q}}[\tilde{Y}_t|\mathcal{F}_{t-1}] = \mathbb{E}^{\mathbb{Q}}\left[\tilde{Y}_t^2\middle|\mathcal{F}_{t-1}\right] - \left(\mathbb{E}^{\mathbb{Q}}[\tilde{Y}_t|\mathcal{F}_{t-1}]\right)^2 =$$

$$= e^{-\frac{2v_t}{n}}\left(\mathbb{E}^{\mathbb{P}}[\tilde{Y}_t^2|\mathcal{F}_{t-1}] - \mathbb{E}^{\mathbb{P}}[\tilde{Y}_t|\mathcal{F}_{t-1}]^2\right) = e^{-\frac{2v_t}{n}}Var^{\mathbb{P}}[\tilde{Y}_t|\mathcal{F}_{t-1}] = e^{-\frac{2v_t}{n}}\tilde{h}_t^2.$$

Случайный процесс $\tilde{Y}_t$ в новой мере будет иметь вид:

$$\tilde{Y}_t = \mathbb{E}^{\mathbb{Q}}[\tilde{Y}_t|\mathcal{F}_{t-1}] + \sqrt{Var^{\mathbb{Q}}[\tilde{Y}_t|\mathcal{F}_{t-1}]}\varepsilon_t = (\tilde{m}_t + n)e^{-\frac{v_t}{n}} - n + e^{-\frac{v_t}{n}}\tilde{h}_t\varepsilon_t.$$

2. Частные случаи приближения мартингальной меры, полученной при помощи логарифмической доходности

Акцентируем внимание, что полученные выше результаты являются приближениями экспоненты (логарифмической доходности) допредельным выражением с разными степенями. Рассмотрим частные случаи применения Теоремы 2 для первого, второго и четвертого приближений (первое приближение рассматривается как случай линейной доходности, а второе и четвертое - с целью получить меру для базовых активов, которые не могут иметь отрицательные значения) случайного процесса логарифмической доходности Y_t. В случае четвертого приближения логарифмической доходности вид ARIMA-GARCH процесса по мартингальной мере $\mathbb{Q}$ зависит от выбора распределения ошибки. В рамках данной статьи рассмотрено распределение S_u Джонсона. Оно представляет собой гибкое и универсальное распределение, которое может быть использовано для моделирования цен в рамках ARIMA-GARCH случайного процесса с нелинейной зависимостью и тяжелыми хвостами [10, 11]. Распределение является нелинейным преобразованием нормально распределенной случайной величины $X \sim N(0,1)$:

$$Y = \xi + \lambda \sinh\left(\frac{X-\gamma}{\delta}\right) = g(X),$$

где $-\infty < \xi < \infty$ – параметр сдвига местоположения, $0 < \lambda < \infty$ – параметр масштабирования, $-\infty < \gamma < \infty$ –параметр асимметрии, $0 < \delta < \infty$ – показатель эксцесса.

Функция плотности распределения S_u Джонсона имеет следующий вид:

$$f_Y(y) = \frac{\delta}{\lambda\sqrt{2\pi}} \frac{1}{\sqrt{1+\left(\frac{y-\xi}{\lambda}\right)^2}} e^{-\frac{1}{2}\left(\gamma+\delta \sinh^{-1}\left(\frac{y-\xi}{\lambda}\right)\right)^2}.$$

Следствие 1. В линейном приближении случайный процесс логарифмической доходности Y_t, описываемый процессом ARIMA-GARCH, имеет следующее представление по мартингальной мере $\mathbb{Q}$:

$$\tilde{Y}_t = e^r - 1 + \tilde{h}_t\left(\frac{e^r}{1+\tilde{m}_t}\right)\varepsilon_t, \qquad \varepsilon_t \sim iid(0,1).$$

По Теореме 2 получим выражение для v_t при $n = 1$:

$$v_t = -r + \ln\left(\mathbb{E}^{\mathbb{P}}\left[\left(\frac{\tilde{Y}_t}{n}+1\right)^n \middle| \mathcal{F}_{t-1}\right]\right)_{n=1} = -r + \ln(\tilde{m}_t + 1).$$

Тогда

$$\tilde{Y}_t = \left((\tilde{m}_t + n)e^{-\frac{v_t}{n}} - n + e^{-\frac{v_t}{n}}\tilde{h}_t\varepsilon_t\right)_{n=1} = (\tilde{m}_t + 1)e^{-v_t} - 1 + e^{-v_t}\tilde{h}_t\varepsilon_t$$
$$= e^r\frac{(\tilde{m}_t+1)}{(\tilde{m}_t+1)} - 1 + \tilde{h}_t\left(\frac{e^r}{1+\tilde{m}_t}\right)\varepsilon_t = e^r - 1 + \tilde{h}_t\left(\frac{e^r}{1+\tilde{m}_t}\right)\varepsilon_t.$$

Если процентная ставка базовых активов начисляется не непрерывно, а p раз в год, то вместо выражения $\tilde{S}_t = e^{-rt}S_t$ мы получим $\tilde{S}_t = \left(1+\frac{r}{p}\right)^{-pt} S_t$, тогда вместо e^r будем иметь $\left(1+\frac{r}{p}\right)^p$. В этом случае процесс $\tilde{Y}_t$ будет описываться следующим выражением:

$$\tilde{Y}_t = \left(1+\frac{r}{p}\right)^p - 1 + \tilde{h}_t\frac{\left(1+\frac{r}{p}\right)^p}{1+\tilde{m}_t}\varepsilon_t, \qquad \varepsilon_t \sim iid(0,1).$$

Таким образом в линейном приближении логарифмической доходности выражение будет совпадать с полученным в статье [1].

Следствие 2. Во втором приближении логарифмическая доходность, описываемая процессом ARIMA-GARCH, имеет следующее представление по мартингальной мере $\mathbb{Q}$:

$$\tilde{Y}_t = e^{\frac{r}{2}}\frac{2(\tilde{m}_t+2)}{\sqrt{h_t^2+(\tilde{m}_t+2)^2}} - 2 + \tilde{h}_t\left(\frac{2e^{\frac{r}{2}}}{\sqrt{h_t^2+(\tilde{m}_t+2)^2}}\right)\varepsilon_t,$$
$$\varepsilon_t \sim iid(0,1)$$

По Теореме 2 получим выражение для v_t при $n = 2$:

$$v_t = -r + \ln\left(\mathbb{E}^{\mathbb{P}}\left[\left(\frac{\tilde{Y}_t}{n}+1\right)^n \middle| \mathcal{F}_{t-1}\right]\right)_{n=2} =$$
$$= -r + \ln\left(\frac{\mathbb{E}^{\mathbb{P}}\left[\tilde{Y}_t{}^2 \middle| \mathcal{F}_{t-1}\right]}{4} + m_t + 1\right).$$

Так как $\mathbb{E}^{\mathbb{P}}\left[\tilde{Y}_t{}^2 \middle| \mathcal{F}_{t-1}\right] = \tilde{h}_t^2 + \tilde{m}_t^2$, получим

$$-\frac{v_t}{2}=\frac{r}{2}-\frac{1}{2}\ln\left(\frac{\tilde{h}_t^2+\tilde{m}_t^2}{4}+\tilde{m}_t^2+1\right)=$$

$$=\frac{r}{2}+\ln\left(\frac{2}{\sqrt{\tilde{h}_t^2+(\tilde{m}_t+2)^2}}\right),$$

тогда

$$\tilde{Y}_t=\left((\tilde{m}_t+n)e^{-\frac{v_t}{n}}-n+e^{-\frac{v_t}{n}}\tilde{h}_t\varepsilon_t\right)_{n=2}=$$

$$=(\tilde{m}_t+2)e^{-\frac{v_t}{2}}-2+e^{-\frac{v_t}{2}}\tilde{h}_t\varepsilon_t$$

$$=e^{\frac{r}{2}}\frac{2(\tilde{m}_t+2)}{\sqrt{h_t^2+(\tilde{m}_t+2)^2}}-2+\tilde{h}_t\left(\frac{2e^{\frac{r}{2}}}{\sqrt{h_t^2+(\tilde{m}_t+2)^2}}\right)\varepsilon_t.$$

Во втором приближении логарифмическая доходность обеспечивает свойство неотрицательности цен базовых активов. Данное свойство будет сохраняться для четных степеней приближения. Что касается остальных свойств логарифмической доходности, то они будут утрачиваться по мере роста разброса отношения цен базовых активов относительно единицы. В этом случае необходимо более точное приближение логарифмической доходности.

Следствие 3. В четвертом приближении логарифмическая доходность, описываемая процессом ARIMA-GARCH с ошибками, распределенными по закону S_u Джонсона, имеет следующее представление по мартингальной мере $\mathbb{Q}$:

$$\tilde{Y}_t=e^{\frac{r}{4}}\frac{4(\tilde{m}_t+2)}{\sqrt[4]{\mu_{t_4}^{+}+16\mu_{t_3}^{+}+96\tilde{h}_t^2+96\tilde{m}_t^2+256\tilde{m}_t+256}}-2$$
$$+h_t\left(\frac{4e^{\frac{r}{4}}}{\sqrt[4]{\mu_{t_4}^{+}+16\mu_{t_3}^{+}+96\tilde{h}_t^2+96\tilde{m}_t^2+256\tilde{m}_t+256}}\right)\varepsilon_t,$$

$$\varepsilon_t\sim JSU\left(\bar{\xi},\bar{\lambda},\gamma,\delta\right)$$

где

- $\mu_{t_3}^{+}=\tilde{h}_t^3\mu_{t_3}+3\tilde{m}_t\tilde{h}_t^2+\tilde{m}_t^3$
- $\mu_{t_4}^{+}=h_t^4\mu_{t_4}+4\mu_{t_3}^{+}\tilde{m}_t-6\tilde{h}_t^2\tilde{m}_t^2-3\tilde{m}_t^4$
- $\mu_{t_3}=-\frac{\bar{\lambda}^3\tilde{h}_t^3\sqrt{e^{\delta^{-2}}}\left(e^{\delta^{-2}}-1\right)^2\left(\left(e^{\delta^{-2}}\right)\left(e^{\delta^{-2}}+2\right)\sinh\left(\frac{3\gamma}{\delta}\right)+3\sinh\left(\frac{2\gamma}{\delta}\right)\right)}{4\tilde{h}_t^{\frac{3}{2}}}$
- $\mu_{t_4}=\frac{\bar{\lambda}^4\tilde{h}_t^4\left(e^{\delta^{-2}}-1\right)^2(K_1+K_2+K_3)}{8\tilde{h}_t^2}$
- $K_1=\left(e^{\delta^{-2}}\right)^2\left(\left(e^{\delta^{-2}}\right)^4+2\left(e^{\delta^{-2}}\right)^3+3\left(e^{\delta^{-2}}\right)^2-3\right)\cosh\left(\frac{3\gamma}{\delta}\right)$
- $K_2=4\left(e^{\delta^{-2}}\right)^2\left(\left(e^{\delta^{-2}}\right)+2\right)\cosh\left(\frac{3\gamma}{\delta}\right)$
- $K_3=3\left(2\left(e^{\delta^{-2}}\right)+1\right)$
- $\bar{\lambda}=\sqrt{2}\left(\left(e^{\frac{1}{\delta^2}}-1\right)\left(e^{\frac{1}{\delta^2}}\cosh\left(\frac{2\gamma}{\delta}\right)+1\right)\right)^{-\frac{1}{2}}$
- $\bar{\xi}=\bar{\lambda}e^{\frac{1}{2\delta^2}}\sinh\left(\frac{\gamma}{\delta}\right)$

По Теореме 2 получим выражение для v_t при $n=4$

$$-\frac{v_t}{n}=\frac{r}{n}-\frac{1}{n}\ln\left(\mathbb{E}^{\mathbb{P}}\left[\left(\frac{\tilde{Y}_t}{n}+1\right)^n\middle|\mathcal{F}_{t-1}\right]\right)_{n=4}=$$
$$=\frac{r}{4}-\frac{1}{4}\ln\left(\frac{\mathbb{E}^{\mathbb{P}}\left[\tilde{Y}_t^4\middle|\mathcal{F}_{t-1}\right]}{256}+\frac{\mathbb{E}^{\mathbb{P}}\left[\tilde{Y}_t^3\middle|\mathcal{F}_{t-1}\right]}{16}+\right.$$
$$\left.\frac{3\mathbb{E}^{\mathbb{P}}\left[\tilde{Y}_t^2\middle|\mathcal{F}_{t-1}\right]}{8}+\mathbb{E}^{\mathbb{P}}\left[\tilde{Y}_t\middle|\mathcal{F}_{t-1}\right]+1\right)=\frac{r}{4}-$$
$$\frac{1}{4}\ln\left(\frac{\mathbb{E}^{\mathbb{P}}\left[\tilde{Y}_t^4\middle|\mathcal{F}_{t-1}\right]+16\mathbb{E}^{\mathbb{P}}\left[\tilde{Y}_t^3\middle|\mathcal{F}_{t-1}\right]+96\mathbb{E}^{\mathbb{P}}\left[\tilde{Y}_t^2\middle|\mathcal{F}_{t-1}\right]+256\mathbb{E}^{\mathbb{P}}\left[\tilde{Y}_t\middle|\mathcal{F}_{t-1}\right]+256}{256}\right).$$

Необходимо найти моменты третьего и четвертого порядка, при этом учтем, что

$$\mathbb{E}^{\mathbb{P}}\left[\tilde{Y}_t{}^2\middle|\mathcal{F}_{t-1}\right]=\tilde{h}_t^2+\tilde{m}_t^2;$$

$$\mu_{t_3}=\mathbb{E}^{\mathbb{P}}\left[\left(\frac{\tilde{Y}_t-\tilde{m}_t}{\tilde{h}_t}\right)^3\middle|\mathcal{F}_{t-1}\right]=$$
$$=\frac{\mathbb{E}^{\mathbb{P}}\left[\tilde{Y}_t{}^3\middle|\mathcal{F}_{t-1}\right]-3\tilde{m}_t\tilde{h}_t^2-\tilde{m}_t^3}{\tilde{h}_t^3}.$$

Введем обозначение $\mu_{t_3}^{+}=\mathbb{E}^{\mathbb{P}}\left[\tilde{Y}_t{}^3\middle|\mathcal{F}_{t-1}\right]$, тогда получим:

$$\mu_{t_3}^{+}=\tilde{h}_t^3\mu_{t_3}+3\tilde{m}_t\tilde{h}_t^2+\tilde{m}_t^3.$$

Для четвертого момента

$$\mu_{t_4}=\mathbb{E}^{\mathbb{P}}\left[\left(\frac{\tilde{Y}_t-\tilde{m}_t}{\tilde{h}_t}\right)^4\middle|\mathcal{F}_{t-1}\right]$$
$$=\frac{\mathbb{E}^{\mathbb{P}}\left[\tilde{Y}_t{}^4\middle|\mathcal{F}_{t-1}\right]-4\mathbb{E}^{\mathbb{P}}\left[\tilde{Y}_t{}^3\middle|\mathcal{F}_{t-1}\right]\tilde{m}_t+6\mathbb{E}^{\mathbb{P}}\left[\tilde{Y}_t{}^2\middle|\mathcal{F}_{t-1}\right]\tilde{m}_t^2-4\mathbb{E}^{\mathbb{P}}[\tilde{Y}_t|\mathcal{F}_{t-1}]\tilde{m}_t^3+\tilde{m}_t^4}{\tilde{h}_t^4}.$$

Введем также обозначение для четвертого момента $\mu_{t_4}^{+}=\mathbb{E}^{\mathbb{P}}\left[\tilde{Y}_t{}^4\middle|\mathcal{F}_{t-1}\right]$, тогда получим для него следующее выражение:

$$\mu_{t_4}^{+}=h_t^4\mu_{t_4}+4\mu_{t_3}^{+}\tilde{m}_t-6\tilde{h}_t^2\tilde{m}_t^2-3\tilde{m}_t^4.$$

Далее необходимо найти коэффициенты асимметрии μ_{t_3} и эксцесса μ_{t_4} для случайного процесса Y_t. Для этого необходимо найти плотность распределения $\tilde{Y}_t$, зная плотность распределения ошибки ARIMA-GARCH случайного процесса $\tilde{Y}_t$, где они репараметризованны так, чтобы их среднее было нулевым, а дисперсия была равна единице. Известно, что $\varepsilon_t\sim JSU(\xi,\lambda,\gamma,\delta)$, тогда

$$\mathbb{E}^{\mathbb{P}}[\varepsilon_t|\mathcal{F}_{t-1}]=\xi-\lambda e^{\frac{1}{2\delta^2}}\sinh\left(\frac{\gamma}{\delta}\right)=0\Rightarrow\tilde{\xi}=\tilde{\lambda}e^{\frac{1}{2\delta^2}}\sinh\left(\frac{\gamma}{\delta}\right),$$

$$Var^{\mathbb{P}}[\varepsilon_t|\mathcal{F}_{t-1}] = \frac{\lambda^2}{2}\left(e^{\frac{1}{\delta^2}}-1\right)\left(e^{\frac{1}{\delta^2}}\cosh\left(\frac{2\gamma}{\delta}\right)+1\right) = 1 \Rightarrow \tilde{\lambda} =$$
$$= \sqrt{2}\left(\left(e^{\frac{1}{\delta^2}}-1\right)\left(e^{\frac{1}{\delta^2}}\cosh\left(\frac{2\gamma}{\delta}\right)+1\right)\right)^{-\frac{1}{2}}.$$

Далее найдем плотность распределения случайного процесса Y_t. Для этого заметим, что ошибку ε_t можно выразить через $\tilde{Y}_t$,

$$\varepsilon_t = \frac{\tilde{Y}_t - \tilde{m}_t}{\tilde{h}_t} = g\left(\tilde{Y}_t\right), \frac{dg(\tilde{y}_t)}{d\tilde{y}_t} = \frac{1}{\tilde{h}_t}.$$

Тогда

$$f^{\mathbb{P}}_{\tilde{Y}_t}(\tilde{y}_t) = f_{\varepsilon_t}(g(\tilde{y}_t))\left(\frac{dg(\tilde{y}_t)}{d\tilde{y}_t}\right)$$

$$f^{\mathbb{P}}_{\tilde{Y}_t}(\tilde{y}_t) = f_{\varepsilon_t}(g(\tilde{y}_t))\left(\frac{dg(\tilde{y}_t)}{d\tilde{y}_t}\right)$$
$$= \frac{\delta}{\tilde{\lambda}\tilde{h}_t\sqrt{2\pi}}\frac{1}{\sqrt{1+\left(\frac{\tilde{y}_t-(\tilde{m}_t+\tilde{\xi}\tilde{h}_t)}{\tilde{h}_t\tilde{\lambda}}\right)^2}}e^{-\frac{1}{2}\left(\gamma+\delta\sinh^{-1}\left(\frac{\tilde{y}_t-(\tilde{m}_t+\tilde{\xi}\tilde{h}_t)}{\tilde{h}_t\tilde{\lambda}}\right)\right)^2}.$$

Сравнивая плотности $f^{\mathbb{P}}_{\varepsilon_t}(\varepsilon_t)$ и $f^{\mathbb{P}}_{\tilde{Y}_t}(\tilde{y}_t)$ получим, что распределение случайного процесса Y_t имеет распределение S_u Джонсона со следующими параметрами: $JSU(\tilde{m}_t + \tilde{\xi}\tilde{h}_t, \tilde{\lambda}\tilde{h}_t, \gamma, \delta)$. Из полученной формулы плотности распределения Y_t легко получить выражения для коэффициентов асимметрии μ_{t_3} и эксцесса μ_{t_4}.

Из Следствий 1, 2 видно, что для первых двух приближений логарифмической доходности общий вид риск-нейтральных случайных процессов не будет зависеть от распределения случайной ошибки. Процессы будут отличаться лишь оцененными параметрами $\tilde{m}_t$ и $\tilde{h}_t$. Общий вид риск-нейтрального случайного процесса начинает меняться для разных плотностей, если логарифмическая доходность рассматривается в более высоких приближениях. В этом случае. при переходе к мартингальной мере нужно учитывать моменты выше второго порядка, которые для ARIMA-GARCH модели будут зависеть от плотности распределения ошибки.

Заключение

В статье рассмотрена задача приближения логарифмической доходности при получении мартингальной меры в расширенном принципе Гирсанова в случае тяжелохвостных распределений. При выбранном подходе все предпосылки расширенного принципа Гирсанова сохраняются, поэтому полученная мера является мартингальной. Стоит отдельно отметить, что вне зависимости от того, какая доходность (линейная, логарифмическая) выбрана для моделирования случайным ARIMA-GARCH процессом, условие минимума квадрата скорректированных на риск затрат хеджирования опционного контракта будет обеспечиваться со статистической погрешностью, зависящей от корректности подобранной модели динамики отношения цен базовых активов опционного контракта. В статье получено семейство мартингальных мер, каждая из которых соответствует степени приближения мартингальной меры, соответствующей логарифмической доходности, которая для тяжелохвостных распределений отсутствует. Выбирая из приближений логарифмической доходности то, которое наилучшим образом описывает ARIMA-GARCH процессом динамику отношения цены базового актива, можно получить соответствующую мартингальную меру, обеспечивающую наиболее близкое к минимуму значение квадрата скорректированных на риск затрат хеджирования опционного контракта.

Первым результатом статьи является доказательство теоремы, с помощью которой можно выполнить переход от физической вероятностной меры к мартингальной через условную плотность распределения $f^{\mathbb{P}}_{\tilde{Y}_t}$ по фильтрации $\mathcal{F}_{t-1}$ случайного процесса $\tilde{Y}_t$. Так как для моделирования случайного процесса $\tilde{Y}_t$ была выбрана ARIMA-GARCH модель, то вторая теорема описывает как меняются параметры ARIMA-GARCH модели при переходе к мартингальной вероятностной мере.

Вторым результатом работы является получение трех мер из семейства мартингальных мер, описанных в Теореме 1. Данные меры соответствуют приближению первого, второго и четвертого порядков мартингальной меры, полученной при использовании логарифмической доходности цен базовых активов.

Литература

1. *Данилишин А.Р., Голембиовский Д.Ю.* Риск-нейтральная динамика для ARIMAGARCH модели с ошибками, распределенными по закону S_U Джонсона // Информатика и ее применения. 2020. Т. 14. С. 48 – 55. doi: 10.14357/19922264200107.
2. *Данилишин А.Р., Голембиовский Д.Ю.* Оценка стоимости опционов на основе ARIMA-GARCH моделей с ошибками, распределенными по закону Su Джонсона // Информатика и ее применения. 2020. Т. 14. С. 83 – 90. doi: 10.14357/19922264200412.
3. *Davis R., Resnick S.* Limit theory for moving averages of random variables with regularity varying tail probabilities // Ann. Probab. 1985. Vol. 13. Iss. 1. P. 179-195.

4. *Granger C., Joyeux R.* An introduction to long-memory time series and fractional differencing // J. Time Ser. Anal. 1980. Vol. 1. P. 15-30.
5. *Elliott R.J., Madan D.B.* A discrete time equivalent martingale measure // Math. Financ. 1998. Vol. 8. Iss. 2. P. 127–152. doi: 10.1111/1467-9965.00048.
6. *Rolski T., Schmidli H., Schmidt V.* Stochastic Processes for Insurance & Finance // British Actuarial Journal. 1999. 6(04). P. 876 – 877. doi: 10.1017/S1357321700002044.
7. *Nair J., Wierman B., Zwart B.* The Fundamentals of Heavy Tails Properties, Emergence, and Estimation // Cambridge University Press. 2022. doi: 10.1017/9781009053730.
8. *Akgiray V.* Conditional heteroscedasticity in time series of stock returns: Evidence and forecasts // J. Bus. 1989. Vol. 62. Iss. 1. P. 55–80. doi: 10.1086/296451.
9. *Follmer H., Schied A.* Stochastic finance: An introduction in discrete time. – Berlin: Walter de Gruyter. 2002. 422 p.
10. *Johnson N.* Systems of Frequency Curves Generated by Methods of Translation // Biometrika. 1949. Vol. 36. Iss. 1-2. P. 149-176. doi: 10.2307/2332539.
11. *Johnson N.* Bivariate Distributions Based on Simple Translation Systems // Biometrika. 1949. Vol. 36. Iss. 3-4. P. 297-304. doi: 10.1093/biomet/36.3-4.297.

Данилишин Артём Ростиславович. Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва. Аспирант. Область научных интересов: математическая статистика, финансовая математика. E-mail: danilishin-artem@mail.ru.

Approximation of Girsanov's measure with logarithmic returns in the case of heavy-tailed distributions

A.R. Danilishin
M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

Abstract. The article is devoted to further development of the topic of applying the extended Girsanov principle for heavy-tailed distributions. The extended Girsanov principle involves finding the conditional mathematical expectation of the ratio of prices of underlying assets of option contracts at the current time to prices of underlying assets at the previous time. To do this, it is necessary to choose an appropriate model that will best describe the dynamics of this price ratio. The linear return or logarithmic return is typically used as the modeling object. In the case of linear returns, the risk-neutral dynamics for the heavy-tailed distribution (Su Johnson) was obtained in [1]. In [2], the effectiveness of the found martingale measure was demonstrated in the example of option contract valuation. However, there may be a need to use logarithmic returns, which have several useful properties (non-negativity of underlying asset prices, symmetry with respect to price increases and decreases). This article derives the martingale measure for the case where the approximation of logarithmic returns is considered. In the simplest case, the approximation coincides with linear returns, and as the degree of approximation increases, it approaches logarithmic returns.
Keywords: Approximation of Girsanov measure with logarithmic returns in the case of heavy-tailed distributions.
DOI: 10.14357/20790279230303

References

1. *Danilishin A, Golembiovsky D.Y.* Risk-neytral'naya dinamika dlya ARIMA-GARCH modeli s oshibkami, raspredelennymi po zakonu S_U Dzhonsona [Risk-neutral dynamics for ARIMA-GARCH random process with errors distributed according to the Johnson's S_U law]. Informatica I ee Primeneniya, 2020; V. 14, 1. P. 48-55. doi: 10.14357/19922264200107.
2. *Danilishin A, Golembiovsky D.Y.* Otsenka stoimosti optsionov na osnove ARIMA-GARCH modelej s oshibkami, raspredelennymi po zakonu *Su* Dzhonsona [Option Pricing Based on ARIMA-GARCH Models with Johnson's *Su*-Distributed Errors]. Informatica I ee Primeneniya, 2020; V. 14, 4. P. 83-90. doi: 10.14357/19922264200412.
3. *Davis R., Resnick S.* Limit theory for moving averages of random variables with regularity varying tail probabilities // Ann. Probab, 1985. Vol. 13. Iss. 1. P. 179-195.

4. *Granger C., Joyeux R.* An introduction to long-memory time series and fractional differencing // J. Time Ser. Anal, 1980. Vol. 1. P. 15-30.
5. *Elliott R.J., Madan D.B.* A discrete time equivalent martingale measure // Math. Financ., 1998. Vol. 8. Iss. 2. P. 127–152. doi: 10.1111/1467-9965.00048.
6. *Rolski T., Schmidli H., Schmidt V.* Stochastic Processes for Insurance & Finance // British Actuarial Journal, 1999. 6(04):876 – 877. doi: 10.1017/S1357321700002044.
7. *Nair J., Wierman B., Zwart B.* The Fundamentals of Heavy Tails Properties, Emergence, and Estimation // Cambridge University Press, 2022. doi: 10.1017/9781009053730.
8. *Akgiray V.* Conditional heteroscedasticity in time series of stock returns: Evidence and forecasts // J. Bus., 1989. Vol. 62. Iss. 1. P. 55–80. doi: 10.1086/296451.
9. *Follmer H., Schied A.* Stochastic finance: An introduction in discrete time. — Berlin: Walter de Gruyter, 2002. 422 p.
10. *Johnson N.* Systems of Frequency Curves Generated by Methods of Translation // Biometrika, 1949. Vol. 36. Iss. 1-2. P. 149-176. doi: 10.2307/2332539.
11. *Johnson N.* Bivariate Distributions Based on Simple Translation Systems // Biometrika, 1949. Vol. 36. Iss. 3-4. P. 297-304. doi: 10.1093/biomet/36.3-4.297.

Danilishin A.R. PhD student, Department of Operations Research, Faculty of Computational Mathematics and Cybernetics, M. V. Lomonosov Moscow State University, 1-52 Leninskiye Gory, GSP-1, Moscow 119991, Russian Federation. E-mail: danilishin-artem@mail.ru

Интеллектуальный анализ данных и распознавание образов

Использование центрально-симметричных признаков Хаара для локализации печати на паспорте гражданина РФ

М.А. Валов[I], Д.П. Маталов[I,II], С.А. Усилин[I,II]

[I] ООО «Смарт Энджинс Сервис», г. Москва, Россия
[II] Федеральное государственное учреждение «Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук», г. Москва, Россия

Аннотация. В статье предложена оригинальная модификация алгоритма Виолы-Джонса в части используемого пространства признаков для решения задачи поиска и локализации круглого оттиска печати на изображениях документа. Показано, что точность локализации объекта детектором существенно повышается при расширении признакового пространства квадратными центрально-симметричными признаками. Преимущества данного метода продемонстрированы в контексте поиска гербовой печати на изображениях паспорта гражданина Российской Федерации. Приведены количественные оценки полученного улучшения.

Ключевые слова: *каскады Виолы и Джонса, машинное обучение, обработка изображений, распознавание документов, форензика, детектирование образов.*
DOI: 10.14357/20790279230304

Введение

Обучение каскада Виолы и Джонса с использованием признаков Хаара успешно применяется в задачах детектирования объектов, особенно в системах, где важнейшим критерием является быстродействие.

Оригинальный алгоритм был предложен Виолой и Джонсоном в контексте задачи обнаружения анфаса лиц на фотографиях [1]. Детектирование целевого объекта происходит при помощи обученного классификатора методом скользящего окна. В угоду обеспечения высокой производительности, итоговый классификатор представляется в виде каскада классификаторов, позволяющего отсеивать значительную часть наиболее простых для детектирования окон на первых уровнях, позволяя таким образом при обучении последующих уровней сконцентрироваться на сложных примерах. Каждый уровень каскада представляет собой сильный классификатор – построенная методом AdaBoost комбинация слабых, выбираемых последовательно жадным образом. В качестве слабых классификаторов традиционно применяются решающие

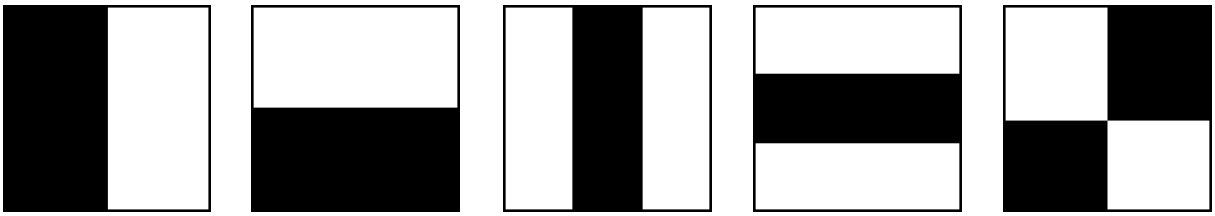


Рис. 1. 2-прямоугольные, 3-прямоугольные и 4-прямоугольные признаки Хаара

деревья с одним ветвлением на основе признаков Хаара. На рис. 1 представлены классические 2-прямоугольные, 3-прямоугольные и 4-прямоугольные признаки Хаара. Значения соответствующих признаков вычисляются как разность суммы пикселей в белых прямоугольниках и суммы пикселей в черных. Для быстрого подсчёта признаков, задействующих прямоугольные области сканирующего окна, используется понятие интегрального изображения.

Предложенный Виолой и Джонсом метод по-прежнему успешно применяется для поиска лиц на изображениях [2,3]. Помимо этого, спроектированные на его основе системы находят свое применение в задачах детекции колесных пар в видеопотоке [4], распознавании дорожных знаков [5,6], обнаружения объектов на медицинских снимках [7], в комплексах искусственного зрения беспилотных летательных аппаратов [8,9].

Первичная задача в системах промышленного распознавания документов – определение типа и шаблона документа, для чего может применяться в том числе рассматриваемый нами метод Виолы и Джонса [10]. Помимо определения шаблона, каскадами Виолы и Джонса могут и детектироваться отдельные атрибуты документа [11].

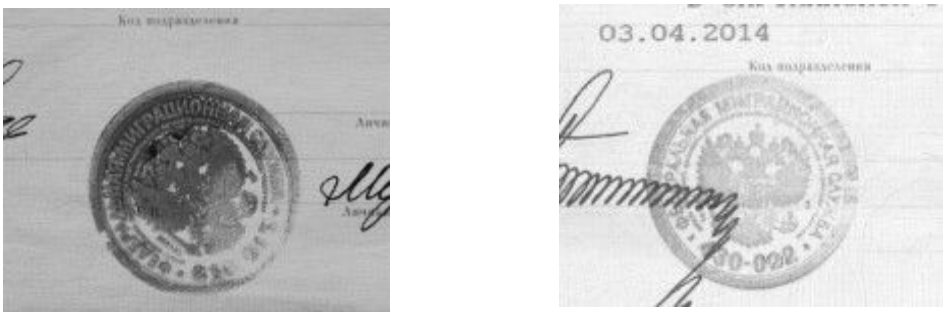
Так, одной из востребованных на практике задач является детектирование печатей и штампов. Метод Виолы-Джонса в этом ключе уже рассматривался ранее [12] и неплохо зарекомендовал себя. Однако специфика объекта (произвольные место и угол выставления печати, возможное пересечение печати с полями паспорта и подписью, постепенное выцветание со временем) создают необходимость в усовершенствовании существующего подхода для построения более конкурентного детектора с необходимыми показателями быстродействие-качество и разумным количеством признаков. На рис. 2 и 3 представлены примеры описанных проблем, затрудняющих построение детектора.

Стоит отметить, что печать в паспорте РФ может наноситься чернилами как красного, так и черного цветов. Помимо того, в результате выцветания и в зависимости от цветовой коррекции снимка и освещения, при котором производилась съемка, цвет оттиска также может варьироваться в различных оттенках. Все это не позволяет использовать пространства признаков, учитывающие цветовые характеристики [13].

Еще одной важной особенностью задачи поиска печати на документе является необходимость точной локализации объекта для возможности последующей качественной обработки информации (например, распознавания текстовой информации внутри печати с помощью OCR [14]).

На данный момент есть несколько общих методов решения описанных проблем с целью отбора наиболее подходящих признаков. Так, может применяться метод предварительной аугментации данных таким образом, чтобы в обучающем наборе оказалось как можно больше изображений оттиска печати под разнообразными углами. Еще один метод повышения эффективности детектора – использование увеличенной области для поиска печати вкупе с расширением признакового про-

Рис. 2. Различия в углах проставления печати



а) б)

Рис. 3. Примеры возникающих проблем в задаче детекции печати на изображении паспорта гражданина РФ: а – Крайне неравномерный оттиск печати; б – пересечение с другими атрибутами документа, в том числе с подписью

странства, полученного добавлением граничных признаков – прямоугольных признаков Хаара поверх изображения модуля градиента. Именно этот подход был предложен в работе [12]. Тем не менее, классические прямоугольные признаки Хаара, используемые в той же работе, вообще говоря, являются особенно неустойчивыми относительно поворота объекта на произвольный угол, потому плохо подходят для решаемой нами задачи.

Для более успешного решения задачи поиска печати в работе предлагается модификация оригинального метода Виолы-Джонса с помощью расширения признакового пространства за счет добавления изначально, исходя из конструкции, более устойчивых к повороту и неравномерности оттиска признаков Хаара.

1. Расширение признакового пространства в задаче поиска печати

В целях повышения эффективности детектора предлагается использовать прямоугольные быстро вычисляемые области изображения, а исходя из геометрической формы детектируемого объекта, в конструкцию признаков должно быть заложено изначально использование строго квадратных областей. Принимая во внимание центральную симметричность внешних границ печати и неизвестный угол ее выставления, предлагается применение центрально-симметричных (как устойчивых к различным углам поворота) признаков. Совокупность представленных идей приводит нас к построению квадратных центрально-симметричных признаков Хаара. Исходя из особенностей, заложенных в их конструкции, эти признаки оказываются гораздо более устойчивыми к поворотам и неравномерностям оттиска печати, по сравнению с классическими. В качестве соответствующего слабого классификатора используется решающее дерево с одним ветвлением на основе описанного признака.

Обозначим через $i(x, y)$ исходное одноканальное изображение размера $N \times M$. Тогда интегральное изображение определяется как изображение размера $N \times M$, в точке (x, y) вычисляемое по формуле:

$$ii(x,y) = \sum_{x' \le x,\, y' \le y} i(x', y').$$

Сумма значений интенсивностей пикселей внутри заданного прямоугольника выполняется с помощью четырех обращений к интегральному изображению. На рис. 4 приведена соответствующая схема-пояснение. Исходя из определения, значение интегрального изображения в каждой из отмеченных точек есть сумма пикселей во всех прямоугольниках, находящихся выше и левее данной точки. Нетрудно видеть, что сумма пикселей в прямоугольнике под номером 4 может быть вычислена как

$$\sum_{(x,y) \in ABCD} i(x,y) = ii(D) - ii(B) - ii(C) + ii(A).$$

Для краткости, в дальнейшем условимся обозначать подобное выражение через $ii(ABCD)$.

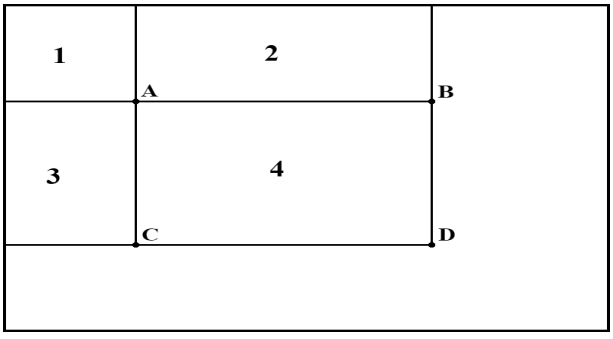


Рис. 4. Схема-иллюстрация к понятию интегрального изображения

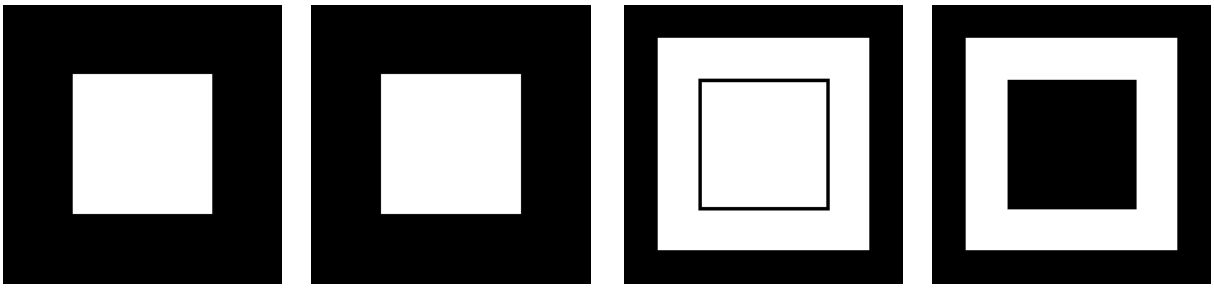


Рис. 5. Признаки, предлагаемые к рассмотрению

Предлагаются к рассмотрению следующие четыре семейства признаков (5 и 6).

- A – рамочный 2-квадратный центрально-симметричный признак. Он определяется двумя вложенными квадратами, внутренний располагается в центре внешнего. Значением признака A является $ii(S_1)$. Интенсивность пикселей во внутреннем квадрате S_2 на результат вычислений не влияет.
- B – 2-квадратный центрально-симметричный признак. Определяется двумя квадратами. Производится подсчет разностей значений интенсивности пикселей в областях, на рис. 5A закрашенных черным и белым, соответственно. Значение признака B определяется как $ii(S_1) - ii(S_2)$.
- C – Рамочный 3-квадратный центрально-симметричный признак. Определяется тремя вложенными квадратами, расположенных в центральной симметрии относительно центра признака. Значения пикселей во внутреннем квадрате S_3 на результат вычислений не влияет. Значение признака C может быть вычислено из соотношения $ii(S_1) - ii(S_2)$.
- D – 3-квадратный центрально-симметричный признак. Значение признака D определяется формулой $ii(S_1) - ii(S_2) + ii(S_2)$. Аналогично признаку B осуществляется вычисление разностей значений интенсивности пикселей в областях, закрашенных на рис. 5,D черным и белым.

2. Описание эксперимента

Для построения детектора применялся датасет из 1603 положительных примеров. Выполнялась аугментация изображений с помощью изменения гамма-коррекции и имитации частичного выцветания оттиска печати. После аугментации количество положительных примеров составило 3497. Негативный датасет состоял из 6412 не содержащих целиком оттиск печати изображений регионов паспорта. В качестве объекта для поиска использовался расширенный слева и справа на 36%, сверху на 27% и снизу на 18% образ печати. Это позволило использовать большую область для детектирования печати, что, как было показано в работе [12], способствует улучшению качества детектирования.

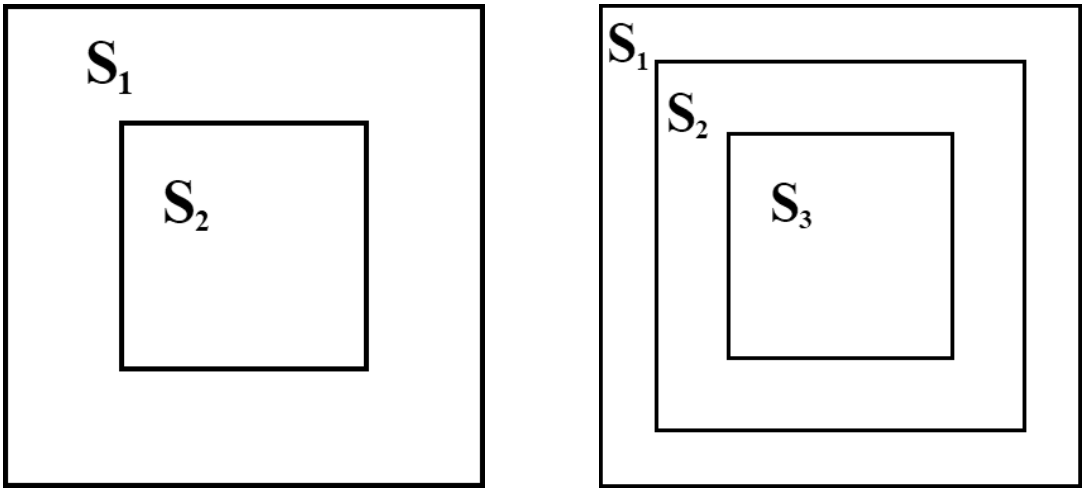


Рис. 6. Схема с выделенными областями, используемыми в вычислении квадратных центрально-симметричных признаков

В рамках эксперимента производилось обучение трех моделей детекторов.

В первой модели в качестве пространства признаков использовались классические 2-прямоугольные и 3-прямоугольные признаки Хаара.

Во второй в качестве пространства признаков использовались только представленные в данной работе квадратно-симметричные признаки.

В третьей модели использовалось признаковое пространство, составленное из совокупности классических 2-прямоугольных, 3-прямоугольных признаков и квадратных центрально-симметричных.

Во всех случаях признаки вычислялись поверх оригинального изображения, а также поверх изображения модуля градиента, что, как было показано в статье [12], способно улучшить показатели итогового детектора. Все остальные параметры алгоритма обучения каскада (максимально допустимые значения доли ложных срабатываний, критерии останова и т. д.) выбирались одинаковыми во всех моделях.

3. Результаты эксперимента

Проверка качества и точности построенных в эксперименте детекторов выполнялась на наборе данных из 2603 изображений второй страницы паспорта РФ с размеченной областью оттиска печати. В табл. 1 воспроизведены точность и полнота для трёх построенных моделей. При проверке качества для всех детекторов также подсчитывалось количество вычисляемых слабых классификаторов на каждом сканирующем окне. Среднее значение данного показателя для каждого детектора представлено в таблице. Данная величина представляется естественной оценкой быстродействия для детекторов типа Виолы-Джонса. На рис. 7 изображена карта насыщенности признаков для каждой построенной в рамках эксперимента модели.

Качество обученных детекторов оценивалось исходя из известных метрик:

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP};$$

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN};$$

$$F_{mean} = \frac{2 \cdot Recall \cdot Precision}{Recall + Precision}.$$

Результаты приведены в табл. 1.

Табл. 1

Качество и среднее количество вычисляемых слабых классификаторов на окно в рамках проведенного эксперимента

Номер модели	Precision	Recall	F-мера	Среднее количество слабых классификаторов на окно
Модель 1	0.9626	0.9985	0.9802	7.136
Модель 2	0.9646	0.9958	0.9800	14.813
Модель 3	0.9683	0.9988	0.9833	7.698

Из эксперимента следует, что все описанные способы позволяют строить детекторы, обладающие хорошей полнотой. Однако использование новых признаков сопряжено с улучшением в качестве обнаружения, заключающееся в меньшем количестве ложных срабатываний. Количество вычисляемых в среднем слабых классификаторов на окно оказалось схожим у модели, обученной на классических признаках и у модели, построенной на комбинированном пространстве. Модель, построенная исключительно с использованием центрально-симметричных признаков, демонстрирует существенно худший показатель быстродействия, – что логично обуславливается малой мощностью семейства возможных для генераций данных, исходя из серьезных заложенных в их конструкции ограничений, и сложностью к выделению отдель-

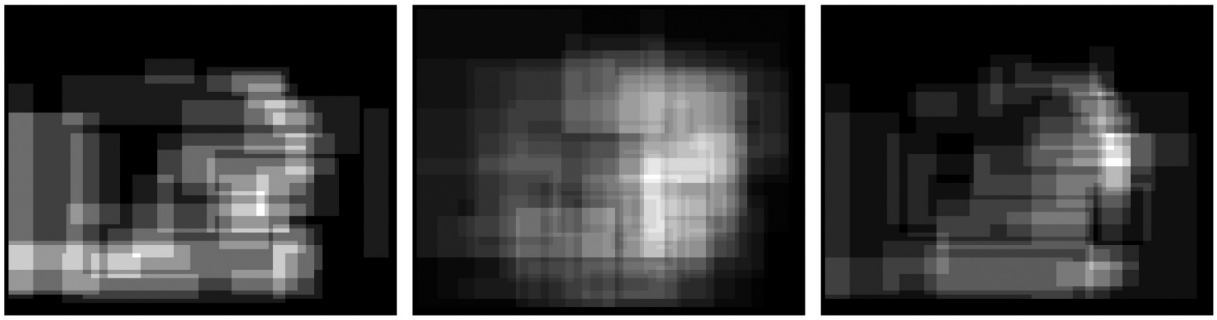


Рис. 7. Карта насыщенности признаков для построенных в эксперименте моделей

ных малых областей с увеличением глубины детектора.

Исходя из специфики задачи и принимая во внимание необходимость как можно более точного определения позиции искомого объекта на изображении, помимо параметров ложных положительных и отрицательных срабатываний и быстродействия, стоит учитывать и точность локализации детектором печати. В качестве метрики точности обнаружения используется, так называемая, мера Жаккара – отношение площади пересечения найденной детектором области с фактической областью печати к площади объединения этих областей. Данная метрика является классической и была представлена в работе [15]. На рис. 8 отображен график доли изображений без найденной печати в зависимости от минимально допустимого значения метрики. На оси абсцисс отмечено соответствующее пороговое значение для меры Жаккара, на оси ординат – доля изображений без найденного образа печати от общего числа изображений в наборе данных при определенном выставленном пороге точности. В табл. 2 представлено значение F-меры при различных показателях порога обнаружения объекта. Как можно видеть, существенно более точной локализации искомого объекта сопутствует применение центрально-симметричных признаков, учитывающих геометрические особенности оттиска печати.

Табл. 2

Значение F-меры для представленных моделей с различными параметрами предельной допустимой для обнаружения объекта меры Жаккара.

Модель	0.5	0.6	0.7	0.8
1	0.9802	0.9783	0.9696	0.8188
2	0.9800	0.9792	0.9788	0.8888
3	0.9833	0.9818	0.9777	0.8877

Заключение

В работе представлена модификация алгоритма Виолы и Джонса для локализации государственной гербовой печати в паспорте гражданина Российской Федерации. Для более эффективного нахождения области объекта предлагается расширение признакового пространства добавлением семейств квадратных центрально-симметричных признаков Хаара. Эта модификация делает итоговый детектор более устойчивым к неравномерности оттиска печати, постепенным выцветанием со временем и различным углам проставления. Отмечено существенное улучшение точности решения задачи локализации. Предполагается, что подобный подход может быть адаптирован для более результативного решения задачи детектирования прочих печатей и иных объектов, имеющих круглую форму.

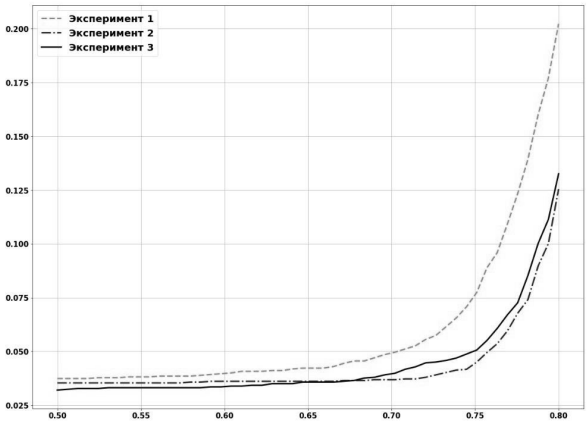


Рис. 8. Доля изображений без найденной печати при соответствующем пороге точности

Литература

1. *Viola P., Jones M.J.* Robust Real-Time Face Detection // International Journal of Computer Vision 57, C. 137–154 (2004). https://doi.org/10.1023/B:VISI.0000013087.49260.fb
2. *Huang J., Shang Y., Chen H.* Improved Viola-Jones face detection algorithm based on HoloLens // J Image Video Proc. 2019. Т. 2019. №. 1. С. 1-11.
3. *Lu Wen-Yao, and Y.A.N.G. Ming.* Face detection based on viola-jones algorithm applying composite features. 2019 International Conference on Robots & Intelligent System (ICRIS) С. 82-85.
4. *Поляков И.В., Кузнецова Е.Г., Усилин С.А., Николаев Д.П.* Построение оптимальных каскадов Виолы–Джонса при помощи “жадных” алгоритмов перебора управляющих параметров с промежуточным контролем по валидационной выборке // Сенсорные системы. 2016. Т. 30. № 3. С. 241-248.
5. *Пчелинцев С.Ю., Арзамасцев А.А.* Применение Метода Виолы-Джонса для распознавания дорожных знаков // Российская наука в современном мире. 2019. С. 111-112.
6. *Jose A, Thodupunoori H, Nair BB.* A novel traffic sign recognition system combining Viola–Jones framework and deep learning // InSoft Computing and Signal Processing. Springer, Singapore. 2019. P. 507-517.
7. *Hussein I.J. et al.* Fully automatic segmentation of gynaecological abnormality using a new viola–jones model // Comput. Mater. Contin. 2021. Т. 66. P. 3161-3182.

8. *Usilin S.A., Slavin O.A., Arlazarov V.V.* Memory Consumption and Computation Efficiency Improvements of Viola–Jones Object Detection Method for Remote Sensing Applications // Pattern Recognition and Image Analysis. 2021. Т. 31. №. 3. P. 571-579.
9. *Xu Y, Yu G, Wang Y, Wu X, Ma Y.* A hybrid vehicle detection method based on viola-jones and HOG+ SVM from UAV images. // Sensors. 2016 Aug 19;16(8):1325.
10. *Usilin S. et al.* Visual appearance based document image classification // Proceedings - International Conference on Image Processing, ICIP. Hong Kong, 2010. P. 2133–2136.
11. *Арлазаров В.В., Николаев Д.П., Усилин С.А., Шоломов Д.Л.* Распознавание гильоширных элементов: определение страниц паспорта РФ // Труды ИСА РАН. 2013. Т. 63. № 3. С. 106-110.
12. *Арлазаров В.В., Маталов Д.П., Усилин С.А.* Локализация образа печати на документе, удостоверяющем личность, методом машинного обучения // Труды ИСА РАН. 2018. Т. 68. Спецвыпуск № S1. С. 158-166. DOI: 10.14357/20790279180518.
13. *Kuznetsova E., Shvets E., Nikolaev D.* Viola-Jones based hybrid framework for real-time object detection in multispectral images // ICMV 2015 / Antanas Verikas; Petia Radeva; Dmitry Nikolaev. – Bellingham, Washington 98227-0010 USA: Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE). Т. 9875. 2015. P. 98750N1-98750N6. DOI: 10.1117/12.2228707.
14. *Алиев М.А., Арлазаров В.В., Маталов Д.П., Николаев Д.П., Полевой Д.В., Усилин С.А.* Способ оценки действительности документа при помощи оптического распознавания текста на изображении круглого оттиска печати/штампа на цифровом изображении документа // Роспатент RU 2750395 C1.
15. *Everingham M., Van Gool L., Williams C.K.I. et al.* The PASCAL Visual Object Classes (VOC) Challenge. Int J Comput Vis, 2010. Т. 88. No. 2, P. 303–338. https://doi.org/10.1007/s11263-009-0275-4.

Валов Максим Александрович. ООО «Смарт Энджинс Сервис», г. Москва. Лаборант-программист. Область научных интересов: теория аппроксимаций, машинное обучение. E-mail: m.valov@smartengines.com

Маталов Даниил Павлович. ООО «Смарт Энджинс Сервис», г. Москва. Научный сотрудник-программист. Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» РАН, г. Москва. Младший научный сотрудник. Область научных интересов: обработка изображений, распознавание образов, машинное обучение. E-mail: d.matalov@smartengines.com

Усилин Сергей Александрович. ООО «Смарт Энджинс Сервис», г. Москва. Исполнительный директор. Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» РАН, г. Москва. Ведущий научный сотрудник. Кандидат технических наук. Область научных интересов: обработка изображений, распознавание образов, машинное обучение. E-mail: usilin@smartengines.com (ответственный за переписку)

The use of centrally symmetric Haar features for stamp localization on the passport of a citizen of the Russian Federation

M.A. Valov[I], D.P. Matalov[I,II], S.A. Usilin[I,II]

[I] Smart Engines Service LLC, Moscow, Russia

[II] Federal Research Center "Computer Science and Control" of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Abstract. This paper proposes a modified version of the Viola-Jones algorithm to improve the accuracy of object localization in document images when searching for and locating a stamp. The modification involves expanding the feature space with square centrally symmetric features, resulting in a significant increase in accuracy. The effectiveness of this approach is demonstrated through its application to locating the official stamp on Russian Federation passports, and the paper provides quantitative estimates of the improvement achieved.

Keywords: *Viola-Jones cascades, machine learning, image processing, document recognition, forensics, pattern detection*.

DOI: 10.14357/20790279230304

References

1. *Viola P., Jones M.J.* Robust Real-Time Face Detection. International Journal of Computer Vision 57, P. 137–154 (2004). https://doi.org/10.1023/B:VISI.0000013087.49260.fb
2. *Huang J., Shang Y., Chen H.* Improved Viola-Jones face detection algorithm based on HoloLens. J Image Video Proc. 2019. V. 2019. no. 1. P. 1-11.
3. *Lu Wen-Yao and Y.A.N.G. Ming.* Face detection based on viola-jones algorithm applying composite features. 2019 International Conference on Robots & Intelligent System (ICRIS) P. 82-85.
4. *Polyakov I.V., Kuznetsova E.G., Usilin S.A., Nikolaev D.P.* Postroenie optimalnykh kaskadov violy–dzhonsa pri pomoshchi "zhadnykh" algoritmov perebora upravlyayushchikh parametrov s promezhutochnym kontrolem po validatsionnoi vyborke [Training optimal viola–jones detectors using greedy algorithms for selecting control parameters with intermediate validation on each level]. Sensornye sistemy [Sensory systems]. 2016. V. 30(3). P. 241-248 (in Russian).
5. *Pchelincev S.Y., Arzamascev A.A.* Primenenie Metoda Violy-Dzhonsa dlya raspoznavaniya dorozhnyh znakov [Applying the Viola-Jones Method to Traffic Sign Recognition]. Rossijskaya nauka v sovremennom mire [Russian science in the modern world]. 2019. P. 111-112.
6. *Jose A, Thodupunoori H, Nair BB.* A novel traffic sign recognition system combining Viola–Jones framework and deep learning. InSoft Computing and Signal Processing. Springer, Singapore. 2019. P. 507-517.
7. *Hussein I.J. et al.* Fully automatic segmentation of gynaecological abnormality using a new viola–jones model. Comput. Mater. Contin. 2021. V. 66. P. 3161-3182.
8. *Usilin S.A., Slavin O.A., Arlazarov V.V.* Memory Consumption and Computation Efficiency Improvements of Viola–Jones Object Detection Method for Remote Sensing Applications. Pattern Recognition and Image Analysis. 2021. V. 31. No. 3. P. 571-579.
9. *Xu Y, Yu G, Wang Y, Wu X, Ma Y.* A hybrid vehicle detection method based on viola-jones and HOG+ SVM from UAV images. Sensors. 2016. Aug 19;16(8):1325.
10. *Usilin S. et al.* Visual appearance based document image classification. Proceedings - International Conference on Image Processing, ICIP. Hong Kong. 2010. P. 2133–2136.
11. *Arlazarov V.V., Nikolaev D.P., Usilin S.A. and Sholomov D.L.* Raspoznavanie gil'oshirnyh elementov: opredelenie stranic pasporta RF [Guilloche Elements Recognition Applied to Passport Page Processing]. Trudy ISA RAN. 2013. V. 63. No 3. P. 106-110.
12. *Arlazarov V.V., Matalov D.P. and Usilin S.A.* Lokalizaciya obraza pechati na dokumente, udostoveryayushchem lichnost', metodom mashinnogo obucheniya [Localization of the seal on the identity document image using machine learning approach]. Trudy ISA RAN. Special Issue. 2018. No. 1. Vol. 68. P. 158-166.
13. *Kuznetsova E., Shvets E., Nikolaev D.* Viola-Jones based hybrid framework for real-time object detection in multispectral images. ICMV 2015 V. 9875. 2015. P. 98750N1-98750N6. DOI: 10.1117/12.2228707.
14. *Aliev M.A., Arlazarov V.V., Matalov D.P., Nikolaev D.P., Polevoy D.V. and Usilin S.A.* Sposob ocenki dejstvitel'nosti dokumenta pri pomoshchi opticheskogo raspoznavaniya teksta

na izobrazhenii kruglogo ottiska pechati/shtampa na cifrovom izobrazhenii dokumenta [Method of assessing the validity of a document using optical recognition of text on the image of a round impression of a print / stamp on a digital image of a document] // Rospatent RU 2750395 C1.

15. *Everingham M., Van Gool L., Williams C.K.I. et al.* The PASCAL Visual Object Classes (VOC) Challenge. Int J Comput Vis. 2010. V. 88. No. 2, P. 303–338. https://doi.org/10.1007/s11263-009-0275-4

Valov M.A. Laboratory assistant-programmer at Smart Engines Service LLC, Moscow, Russia. Number of publications: 1. Research interests: approximation theory, machine learning. E-mail: m.valov@smartengines.com

Matalov D.P. Researcher-programmer at Smart Engines Service LLC, Moscow, Russia. Junior researcher at the Federal Research Center "Computer Science and Control" of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia. Research interests: image processing, pattern recognition, machine learning. E-mail: d.matalov@smartengines.com

Usilin S.A. Executive Director at Smart Engines Service LLC, Moscow, Russia. Leading Researcher at the Federal Research Center "Computer Science and Control" of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia. PhD. Research interests: image processing, pattern recognition, machine learning. E-mail: usilin@smartengines.com

Информационные технологии

Разработка формального аппарата для описания и обработки концептуальных моделей

Ньи Ньи Хтве[I], Г.Д. Волкова[I], О.Г. Григорьев[II]

[I] Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», г. Москва, Россия
[II] Федеральное государственное учреждение «Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук», г. Москва, Россия

Аннотация. В статье представлено формальное описание концептуальной модели 1-го рода на объектном и конкретном уровнях для предметной задачи, представляющей документированные технические знания с учетом различной степени их формализации и расслоения концептуальной модели под постоянную информацию.

Ключевые слова: *моделирование предметных знаний, формальное описание концептуальной модели 1-го рода, статистические ограничения 1-го рода, типология ограничений 1-го рода.*
DOI: 10.14357/20790279230305

Введение

Интеллектуальный ресурс любой организации или промышленного предприятия включает как опыт и знания работающих в них специалистов и руководителей, так и разнообразные фонды, хранящиеся и в документной, и в электронной форме. Фонды могут иметь различное назначение, например, организованы в виде архивов технической и организационной документации, библиотечных фондов, фондов регламентов, стандартов, патентов, методик, типовых решений и др. По сути, документные фонды предприятий представляют собой аккумулированные знания многих поколений специалистов.

В современных условиях, связанных с дефицитом квалифицированных инженерных кадров и ситуацией «разрыва поколений», на промышленных предприятиях остро стоит вопрос сохранения и дальнейшего развития интеллектуального потенциала. Специфика инженерных знаний заключается в их сложной организации, обусловленной необходимостью их увязывать в рамках жизненного цикла создаваемых машиностроительных изделий.

Одним из решений этого вопроса является перенос интеллектуального ресурса в компьютерную среду. Но простое сканирование и/или формирование документов непосредственно в компьютере не позволит решить эту проблему. Требуется перевести в компьютерную среду не только «форму», но и «содержание» документа. Это возможно при наличии формализованных методов семантического моделирования предметных областей, в которых знания зафиксированы в различных средах: бумажных носителях, в компьютере, в памяти специалистов.

Формализованные методы семантического моделирования в значительной мере зависят от технологий автоматизации информационных и интеллектуальных процессов. Можно условно выделить несколько этапов развития и смены технологий в этой области [1,31]:

– электронная обработка данных (ЭОД) или технологии традиционного программирования;

– информационные технологии (ИТ) или технологии структурного программирования;
– новые информационные технологии (НИТ) или технологии объектно-ориентированного программирования и методов искусственного интеллекта;
– когнитивный подход (КП) или когнитивные технологии.

Когнитивный подход как этап развития автоматизации интеллектуального труда продолжает развиваться и в настоящее время. Суть этого этапа заключается в многоуровневом отображении реального мира, где каждый уровень заключает в себе ряд функциональных центров: монадического, структурного и контекстуального, которые связаны между собой законом цикличности научного познания [31].

1. Анализ методов семантического моделирования

Анализ методов семантического моделирования в рамках выделенных этапов выполнялся по следующим критериям: область деятельности – источник; начало разработки; основания семантического моделирования или базовые элементы; виды и разнообразие статических отношений или структур; виды и разнообразие динамических отношений или структур; наличие закономерностей формирования структур/конструкций; наличие формального аппарата для описания отношений/ структур и для их интеграции; наличие формального аппарата для обработки моделей/ структур; методическое обеспечение; программная поддержка.

В качестве основных методов семантического моделирования для анализа были выбраны следующие представители: в рамках этапа ЭОД метод тезаурусов [4]; в рамках этапа ИТ метод Чена (ERA- подход) [5,6,7,8]; в рамках этапа НИТ – декларативные методы ИИ (семантические сети, фреймы), – процедуральные методы ИИ (логического вывода, продукции), – метод онтологий, – методы семантического моделирования в О-О подходе [9–23]; в рамках этапа КП метод концептуального моделирования в рамках методологии автоматизации интеллектуального труда (МАИТ), разработанной на кафедре ИТВС МГТУ «СТАНКИН» [1,2,31].

В табл. 1 приведены результаты сравнительного анализа методов семантического моделирования. По результатам сравнительного анализа можно сделать следующие выводы:

1. Методы этапов ЭОД и ИТ ориентированы на описание статических составляющих семантической модели. При этом методы этапов НИТ и КП ориентированы на описание и статических, и динамических составляющих семантической модели.
2. В методах этапов ЭОД, ИТ, НИТ механизмы формирования составляющих модели индивидуальны, «рецептурные». В методе этапа КП – выявлено наличие закономерностей формирования всех составляющих семантической модели.
3. В методах этапов ЭОД и ИТ отсутствует формальный аппарат описания/интеграции семантических моделей. В методе этапа НИТ – наличие формального аппарата (известного). В методе этапа КП– наличие оригинального формального аппарата для описания/интеграции концептуальных представлений, концептуальных моделей, концептуальных конструкций.
4. В методах первых трех этапов отсутствует формальный аппарат для обработки и/или оптимизации самих моделей.
5. Методическое обеспечение для трех этапов обусловлено индивидуальным опытом и квалификацией специалистов и, как правило, сопровождается графической поддержкой. Методическое обеспечение для этапа КП включает унифицированный набор процедур, правил их выполнения, правил оформления и фиксации результатов в графической и табличной форме.

Основываясь на анализе семантических методов, используемых при разработке систем автоматизации приложений, было установлено, что большая часть перечисленных методов затруднительно использовать при создании систем поддержки интеллектуального труда в машиностроении. Кроме того, в существующих программных продуктах удобно, информативно и доступно используются визуальные средства для представления информации в этих методах. Они не имеют формального описания различных моделей и их обработки.

Анализ инструментальных средств для создания автоматизированных систем показывает, что существующие инструменты часто разрабатываются и обеспечивают работу только с одним классом из существующих методов. Наличие настраиваемого программного обеспечения затрудняет его разработку, использование и значительно увеличивает его стоимость.

Проблемы, выявленные по результатам анализа, показали, что при проектировании и реализации прикладных автоматизированных систем следует использовать не только методы моделирования знаний, но требуются способы и средства поддержки обработки концептуальных представлений предметных задач, включающие оптими-

Табл.1

Результаты сравнительного анализа методов семантического моделирования

Метод / Критерий	**Тезаурусов**	**ERA-метод**	**Декларативные модели ИИ**	**Процедурные модели ИИ**	**Метод онтологий**	**Методы в О-О подходе**	**Метод КМ в МАИТ**
Этап	ЭОД (1)	ИТ (2)	НИТ (3)	НИТ 3)	НИТ (3)	НИТ (3)	КП 4)
Область деятельности – источник	Библиотечная деятельность	Информационные системы –моделирование данных. Системы организационного упр-я	Моделирование знаний	Моделирование знаний	Моделирование знаний (=концептуализация знаний)	Проектирование баз данных	Автоматизация проектной деятельности
Начало разработки	Середина 60г. 20 века	Середина 70-х г. 20 в	80-е годы 20-го века	80-е годы 20-го века	00-е годы 20 века	10-е	Середина 80-х годов 20-го века
Основания семантического моделирования / базовые элементы	Понятия, семантические отношения: род-вид; синонимия; ассоциация	Entity, Attribute, Relation	для СС – понятия и связи; для фреймов – фрейм, слот, процедура	Логический вывод; причина-следствие	Построение онтологии - субъективно; объекты, их свойства, отношения, обработка	Объекты, отношения, ограничения, отображения	Основания моделирования- методологические, теоре-тические, практические. Категории и зависимости разных уровней абстрагирования, типы и виды связей
Виды и разнообразие статических отношений	Иерархия понятий. Алфавитный перечень. Классы усл. эквивалент	Структуры сущностей на разных отношениях	для СС –сеть общих и част-ных понятий на разных связях; для фреймов-структура	Структура предикатов	Структуры на концептах	Структуры объектов	Модели разных представ-лений и разных уровней абстрагирования. Статические структуры: основные, производные
Виды и разнообразие динамических отношений	Нет	Нет	Структура процедур / вычислимых фреймов	Структура логического вывода/ продукций	Нет	Структуры отображений	Модели разных представлений и разных уровней абстрагирования. Динамические структуры: ограничения 1-го рода (на основные структуры), ограничения 2-го рода (на производные структуры)
Наличие закономерностей формирования	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет	Закономерности формирования всех концептуальных конструкций в УКП
Наличие формального аппарата для описания отношений	Нет	Нет	Теория графов.	Нет	Формальное описание структур	Частично	Оригинальный формальный аппарат для описания и интеграции всех составляющих концептуальных моделей.
Наличие формального аппарата для обработки	Нет (Запрос как логическая формула).	Нет	Нет	Математическая логика.	Частично	Реляционная алгебра	Формальное описание содержательной связности
Методическое обеспечение	Нет	Индивиду-альные методики	Индивидуальные методики.	Индивиду-альные методики.	Индивиду-альные методики	Индивидуальные методики	Методика моделирования (унифицированный набор процедур, правил выполнения, оформления и фиксации результатов)
Программная поддержка	Информационно-поиск. системы	ER Win, IDEF X1	Языки FRL, KRL	Система Пролог и др.	Имеется	В разработке	а) Concept (2003), б) Coda (2005), в) ВИС (2008), г) ИС-2 (2018)

зацию, расслоение, классификацию и поддержку связанности составляющих моделей [27].

2. Уточнение метода концептуального моделирования

В рамках методологии автоматизации интеллектуального труда концептуальное моделирование рассматривается на трех взаимосвязанных уровнях абстрагирования и для двух представлений: универсального и представления предметных задач. Наличие трех взаимосвязанных уровней абстрагирования в универсальном представлении предопределяет возможность интеграции на нижележащих уровнях, обеспечивая целостность и единство системы знаний, которые невозможны без существования определенных закономерностей формирования моделей. Соотношение концептуальных представлений можно определить как наличие ограничений, которые накладываются универсальным представлением на представления предметных задач.

Формальное описание концептуальных представлений в целом и концептуальных моделей в каждом представлении, а также наличие закономерностей формирования для всех составляющих концептуальных моделей в рамках универсального представления, обеспечивает теоретическую основу для моделирования знаний в различных предметных областях [1,24].

Прикладная часть метода концептуального моделирования связана с семантическим моделированием предметных задач, что предполагает выделение самой задачи из предметной области и моделирование ее системы знаний.

Поскольку концептуальное представление определяет совокупность моделей, то формально это можно описать (ф.1) [2,24,29]:

$$KP(n) =< KP2(n), \overline{KP3(n)}, R_{23}^{KP}(n) >, \quad (1)$$

где $KP2(n)$ – модель объектного уровня (2) для выделенной (***n***-ой) предметной задачи; $\overline{KP3(n)} = \{KP3(nm)\}$ – совокупность моделей конкретного уровня для той же задачи.

При этом уточнение модели каждого уровня абстрагирования в данном представлении включает подмодели (ф.2) соответствующего *i*-го уровня и *j*-го рода – *KPi.j* (*z*), где для *i*=2, *z*=*n*, а для *i*=3, *z*=*nm*:

$$KPi(z) =< KPi.1(z), KPi.2(z), R_i^{KP}(z) > \quad (2)$$

Уточненная структура предметного представления с учетом подмоделей приведена на рис. 1.

Формально данное уточнение можно записать (ф.3):

$$KP.1(n) =< KP2.1(n), \overline{KP3.1(n)}, R_{23}^{KP1}(n) >, (3)$$

где $KP2.1(n)$ – модель 1-го рода объектного уровня (2) для выделенной (*n*-ой) предметной задачи; $\overline{KP3.1(n)} = \{KP3.1(nm)\}$ – совокупность моделей 1-го рода конкретного уровня для той же задачи.

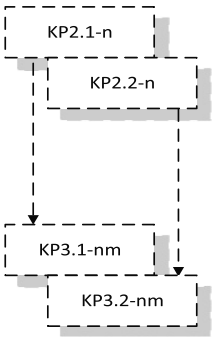


Рис.1. Уточненная структура концептуального представления предметной задачи с учетом подмоделей [24,29]

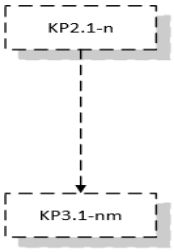


Рис.2. Уточнение структуры для КМ-1 в общем виде

Уточненная структура концептуальных моделей 1-го рода приведена на рис. 2.

Дальнейшее уточнение структуры связано с уточнением концептуальных моделей 1-го рода на объектном и конкретном уровнях и с увязкой моделей разных уровней.

Уточнение концептуальной модели 1-го рода на объектном уровне для *n*-ой предметной задачи включает (ф.4): множество предметных категорий (ПК), множество статических (структурных) отношений на ПК и множество динамических отношений на ПК [24,25,29]:

$$KP2.1(n) =< M2(n), T2(n), H2(n), \overline{F2}(n), R_2^{KP1}(n) > \quad (4)$$

Множество ПК для *n*-ой предметной задачи разбивается на множество непересекающихся подмножеств (ф.5) [2]:

$$M2(n) \equiv A(n) = \{a_{km}\},$$
$$A(n) = \bigcup_i A_i(n), A_i(n) \cap A_j(n) =$$
$$= \emptyset, A_i(n) \subset A(n), A_i(n) = \{a_{ik}\}, \quad (5)$$

а $T2(n)$ – множество бинарных отношений (ф.6) и $H2(n)$ – множество тернарных отношений на ПК (ф.7), $\overline{F2}(n)$ – множество динамических отношений 1-го рода (ф.8), $R_2^{KP1}(n)$-увязка статической и динамической составляющих:

$$T2(n) \subset A(n) \times A(n) \quad (6)$$

$$H2(n) \subset A(n) \times A(n) \times A(n) \quad (7)$$

Динамические отношения включают систему предметных зависимостей 1-го рода $\overline{F2}(n)$ [2]:

$$\overline{F2}(n) = (\overline{V2}(n), \overline{FV2}(n)), \quad (8)$$

где $\overline{V2}(n)$ – множество предметных зависимостей 1-го рода (ПЗ-1) и $\overline{FV2}(n)$-множество бинарных отношений между ПЗ-1.

Множество ПЗ-1 разбивается на множество подмножеств разных уровней разложения (декомпозиции) (ф.9,10) [2]:

$$\overline{V2}(n) \equiv \overline{W}(n), \quad (9)$$

$$\overline{W}(n) = \bigcup_s \overline{W_s}(n), \overline{W_s}(n) = \{\overline{w_{sp}}\}$$

$$\overline{FV2}(n) \subset \overline{W}(n) \times \overline{W}(n) \quad (10)$$

Так как ПЗ-1 всегда есть вариант определенного типа, то ПЗ-1 как вариант фиксируется на подмножестве множества предметных категорий (ф.11,12) [2]:

$$\overline{w_{sp}} = \overline{w_{sp}}(i, t, u_{sp}); \quad (11)$$

$$\overline{w_{sp}}(i, t, u_{sp}) = (a_{j1}, \dots, a_{jq})_{u_{sp}} \& Q_{it}^{sp}(n) \quad (12)$$

где $Q_{it}^{sp}(n)$ – описывает соотношения структурных и контекстуальных ПК и индекс u_{sp} размечает подмножество $A_i(n)$, которое характеризует *sp*- е ограничение или ПЗ-1 для выделенной предметной задачи.

Концептуальная модель конкретного уровня 1-го рода есть совокупность множества экземпляров предметных категорий (ЭПК), множества статических отношений и множества динамических отношений (ф.13) [2,29,30]:

$$KP3.1(nm) = $$

$$= < M3(nm), T3(nm), H3(nm), \overline{F3}(nm), R_3^{KP1}(nm) > \quad (13)$$

где каждое из множеств можно представить в следующем виде (ф.14-16) [7]:

$$M3(nm) \equiv B(nm), \quad (14)$$

$$B(nm) = \bigcup_{i,j} B_{ij}(nm), B_{ij}(nm) \cap B_{km}(nm) = \emptyset, \quad (15)$$

$$B_{ij}(nm) \subset B(nm), B_{ij}(nm) = \{b_r^{ij}\}, \quad (16)$$

а $T3(nm)$- множество бинарных отношений (ф.17) и $H3(nm)$- множество тернарных отношений между экземплярами ПК (ф.18), $\overline{F3}(nm)$ – динамические отношения, $R_3^{KP-1}(nm)$- увязка статической и динамической составляющих:

$$T3(nm) \subset B(nm) \times B(nm); \quad (17)$$

$$H3(nm) \subset B(nm) \times B(nm) \times B(nm). \quad (18)$$

Динамические отношения – это система экземпляров предметных зависимостей первого рода $\overline{F3}(nm)$ (ф.19) [2]:

$$\overline{F3}(nm) = (\overline{V3}(nm), \overline{FV3}(nm)), \quad (19)$$

где $\overline{V3}(nm)$ – множество экземпляров предметных зависимостей 1-го рода (ЭПЗ-1) (ф.20) и $\overline{FV3}(nm)$ -множество бинарных отношений между ЭПЗ-1 (ф.21):

$$\overline{V3}(nm) \equiv \overline{P}(nm)$$

$$\overline{P}(nm) = \bigcup_{i,p} \overline{P_{ip}}(nm), \overline{P_{ip}}(nm) \cap \overline{P_{rt}}(nm) = \varnothing,$$

$$\overline{P_{rt}}(nm) \subset \overline{P}(nm), \overline{P_{rt}}(nm) = \{p_s^{rt}\} \quad (20)$$

$$\overline{FV3}(nm) \subset \overline{P}(nm) \times \overline{P}(nm) \quad (21)$$

Так как ЭПЗ-1 всегда есть вариант определенного типа, то ЭПЗ-1 как вариант - фиксируется на подмножестве множества экземпляров предметных категорий (ф.22,23) [2,24]:

$$\overline{p_r^{sp}} = \overline{p_r^{sp}}(i, t, s, u_{spr}), \quad (22)$$

$$\overline{p_r^{sp}}(i, t, s, u_{spr}) =$$

$$= (b_x^{j1}, \dots, b_z^{jq})_{u_{spr}} \& H_{its}^{spr}(nm), \quad (23)$$

где $H_{its}^{spr}(nm)$ – условие, отражающее соотношения структурных и контекстуальных экземпляров предметных категорий и индекс u_{spr} размечает подмножество B(nm), которое характеризует *spr* -е ограничение для выделенного экземпляра предметной зависимости 1-го рода [24].

Уточнение отношений, описывающих взаимосвязи концептуальных моделей 1-го рода разных уровней абстрагирования для представления предметных задач $R_{23}^{KP1}(n)$ можно представить в следующем виде (ф.24) [2,26,29]:

$$R_{23}^{KP1}(n) \subset KP2.1(n) \times KP3.1(nm),$$

$$R_{23}^{KP1}(n) = \{r_l^{KP23} | r_l^{KP23}: KP2.1(n) \to KP3.1(nm)\} \quad (24)$$

Взаимосвязь моделей может быть представлена по-компонентно (ф.25-28):

$$KP2.1(n) \to KP3.1(nm): \quad (25)$$

$$A(n) \to B(nm); \quad (26)$$

$$T2(n) \to T3(nm), H2(n) \to H3(nm), \quad (27)$$

Табл.2

Взаимосвязи моделей 1-го рода объектного и конкретного уровней

$R_{23}^{KP1}(n)$	$B(nm)$	Т3(nm)	Н3(nm)	$\bar{P}(nm)$	$\overline{FV3}(nm)$
$A(n)$	$R_{23}^{KP1-1}(n)$	0	0	0	0
Т2(n)	0	$R_{23}^{KP1-1}(n)$	0	0	0
Н2(n)	0	0	$R_{23}^{KP1-1}(n)$	0	0
$\bar{W}(n)$	0	0	0	$R_{23}^{KP1-2}(n)$	0
$\overline{FV2}(n)$	0	0	0	0	$R_{23}^{KP1-2}(n)$

$$\overline{F2}(n) \to \overline{F3}(nm): \bar{W}(n) \to$$
$$\to \bar{P}(nm), \overline{FV2}(n) \to \overline{FV3}(nm), \qquad (28)$$

Или, по-другому, эту взаимосвязь концептуальных моделей можно представить в виде множеств и блочной матрицы (табл.2) (ф.29) [2,26,29]:

$$R_{23}^{KP1}(n) = \{R_{23}^{KP1-1}(n), R_{23}^{KP1-2}(n)\}. \qquad (29)$$

Таким образом, уточнение моделей 1-го рода позволило обосновать типологию предметных ограничений 1-го рода.

3. Формальное описание типологии предметных ограничений 1-го рода в уточненном представлении предметных задач

Типология предметных ограничений (зависимостей) обусловлена наличием увязки концептуальных представлений в методе семантического моделирования по методологии автоматизации интеллектуального труда. То есть, универсальное концептуальное представление (как фундаментальная часть теории) накладывает ограничений на предметное представление (прикладная часть теории).

Любая предметная зависимость 1-го рода (как элемент предметного представления) может быть сопоставлена с определенным типом зависимостей 1-го рода (элементом универсального представления), т.е. можно для нее определить «замыкающую» вершину или ПК определенного класса в основной концептуальной структуре. Любой тип зависимости имеет двухпозиционный код, в котором 1-я позиция характеризует уровень семантической сложности, а 2-я – определяет «замыкание» на одну или разные контекстуальные предметные категории данного уровня семантической сложности [26,29].

Классы предметных категорий определяются информационными категориями универсального представления следующих видов: Цикл (S), Процесс (P), Задача (Z), Компонент (K), Объект (O), Признак (R), Значение (C). Эти классы образуют строгую иерархию. Для уровней семантической сложности контекстуальные предметные категории определяют классы семантической сложности (1 – соответствует классу Цикл; 3 – Задача; 5 – Объект).

Исходя из вышеизложенного, можно определить совокупность правил определения типов предметных зависимостей 1-го рода:

- Тип 5.1: ограничение на взаимосвязь ПК класса «R» в рамках одной ПК класса «**O**»;
- Тип 5.2: ограничение на взаимосвязь ПК класса «R», связанных с разными, но однородными ПК класса «O», то есть принадлежащих одной ПК класса «**K**»;
- Тип 5.3 = Тип 3.1: ограничение на взаимосвязь ПК класса «R», связанных с разными и разнородными ПК класса «O», принадлежащих различным ПК класса «K», но в рамках одной ПК класса «**Z**»;
- Тип 3.2: ограничение на взаимосвязь ПК класса «R», связанных с разными и разнородными ПК класса «O», принадлежащих различным ПК класса «K» разных, но однородных ПК класса «Z», т.е. в рамках одной ПК класса «**P**»;
- Тип 3.3 = Тип 1.1: ограничение на взаимосвязь ПК класса «R», связанных с разными и разнородными ПК класса «O», принадлежащих различным ПК класса «K» разных ПК класса «Z», входящих в различные ПК класса «P» в рамках одной ПК класса «**S**»;
- Тип 1.2: ограничение на взаимосвязь ПК класса «R», связанных с разными и разнородными ПК класса «O», принадлежащих различным ПК класса «K» разных ПК класса «Z», входящих в различные ПК класса «P» в рамках разных ПК класса «S».

Таким образом, любая ПЗ-1 «замыкается» на одну ПК определенного класса в соответствии с их иерархией.

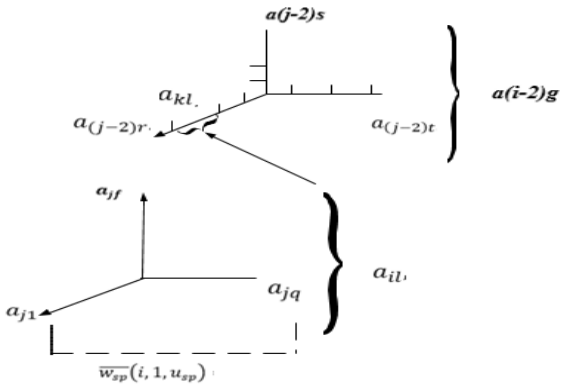


Рис.3. Геометрическая интерпретация предметной зависимости 1-го рода 1-го типа: $\overline{w_{sp}}(1,1,u$ – кривая в α-мерном пространстве, где a_{il} – определяет абстрактное пространство i-го уровня семантической сложности, a_{j1}, … , a_{jq}, $a_{(j-2)r}$, $a_{(j-2)t}$ – определяют оси пространств разного уровня сложности, a_{kl} – определяет фрагмент шкалы на оси [24,25]

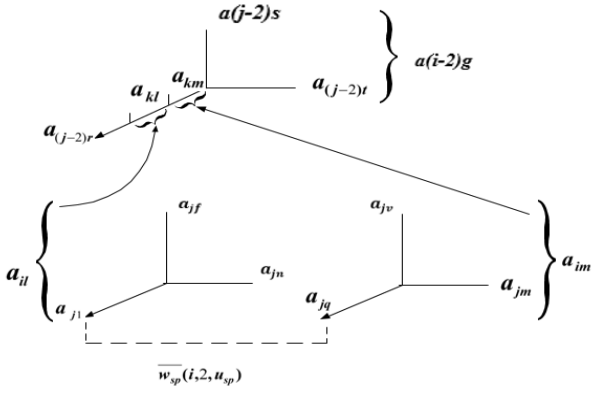


Рис.4. Геометрическая интерпретация предметной зависимости 1-го рода 2-го типа, где a_{il}, a_{im} – определяют абстрактные пространства, $a_{j1}, \dots, a_{jq}, a_{jm}, a_{(j-2)r}, a_{(j-2)t}$ – определяют оси пространств разного уровня семантической сложности, a_{kl}, a_{km} – определяют фрагменты шкал на оси [24,25]

Для геометрической интерпретации формальных описаний предметных ограничений 1-го рода можно использовать следующие понятия: абстрактное пространство, оси абстрактного пространства, метрики или шкалы осей абстрактного пространства. При этом полагается, что оси имеют «разнородные» метрики и любая ось может иметь набор «неравномерных» шкал.

На рис. 3, 4 и 5 приведена геометрическая интерпретация предметных зависимостей 1-рода от 1-го до 3-го типа для объектного уровня.

Для геометрической интерпретации ограничений 1-го рода на конкретном уровне можно использовать следующие понятия: абстрактное

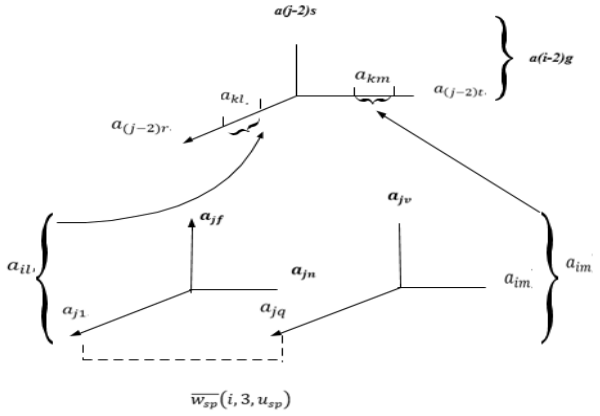


Рис.5. Геометрическая интерпретация предметной зависимости 1-го рода 3-го типа, где a_{il}, a_{im} – определяют абстрактные пространства, $a_{j1}, \dots, a_{jq}, a_{jm}, a_{(j-2)r}, a_{(j-2)t}$ – определяют оси пространств разного уровня семантической сложности, a_{kl}, a_{km} – определяют фрагменты шкал на разных осях [24,25]

пространство как совокупность точек, оси абстрактного пространства, метрики или шкалы осей абстрактного пространства и их значения.

Тогда само абстрактное пространство будет определяться контекстуальной ПК, а его точка – экземпляром этой ПК, оси пространства – определяются структурными ПК и глобальным значением на оси - экземпляром этой ПК, а метрики этих осей – набором монадических предметных категорий и их экземпляров. На конкретном уровне монадический ЭПК определяет локальную точку на фрагменте оси.

Совокупность точек на осях определяет точку в абстрактном пространстве (или контекстуальный ЭПК).

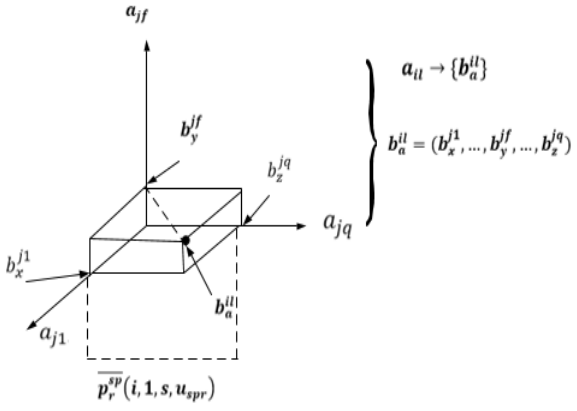


Рис.6. Геометрическая интерпретация экземпляров предметной зависимости 1-рода 1-го типа: a_{il}– пространство с осями $a_{j1}, \dots, a_{jf}, \dots, a_{jq}$, b_a^{il} – точка в пространстве a_{il} [24]

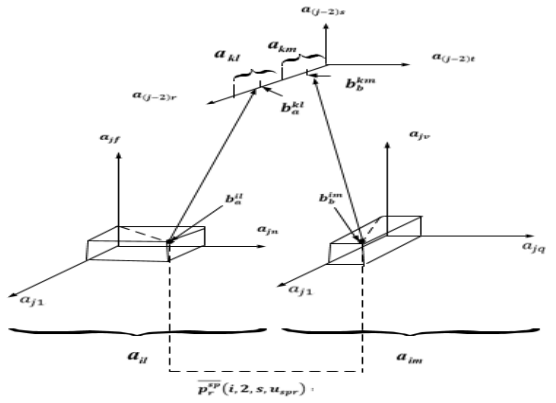


Рис.7. Геометрическая интерпретация экземпляра предметной зависимости 1-рода 2-го типа, где b_b^{km} – точка во фрагменте a_{km} оси $a_{(j-2)r}$, b_a^{kl} – точка во фрагменте a_{kl} оси $a_{(j-2)r}$, b_a^{il} – точка в пространстве a_{il}, b_b^{im} – точка в пространстве a_{im} [24]

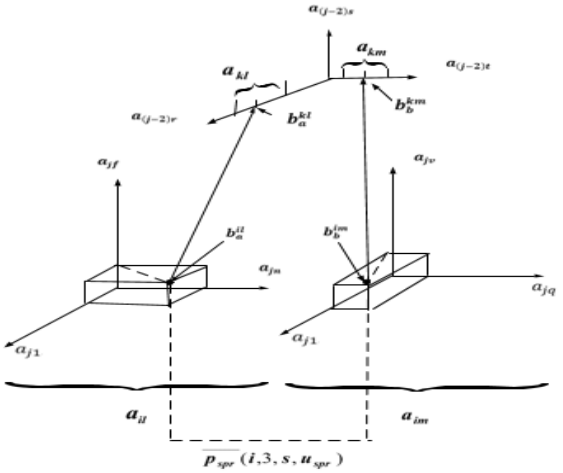


Рис.8. Геометрическая интерпретация экземпляров предметной зависимости 1-рода 3-го типа, где b_b^{km}- точка во фрагменте a_{km} оси $a_{(j-2)t}$, b_a^{kl} – точка во фрагменте a_{kl} оси $a_{(j-2)r}$, b_a^{il} – точка в пространстве a_{il}, b_b^{im}- точка в пространстве a_{im} [24]

На рис. 6,7 и 8 приведена геометрическая интерпретация экземпляров предметных зависимостей 1-рода от 1-го до 3-го типа для конкретного уровня.

4. Формальное описание статистических предметных ограничений 1-го рода

Статистические предметные зависимости 1-го рода (ПЗ-1) являются фрагментами концептуальной модели предметной задачи объектного уровня, в котором одна ПЗ-1 связана с фрагментом (подструктурой) основной концептуальной структуры.

Исходя из этого, было выполнено формальное описание процедуры расслоения концептуальной модели предметной задачи под переменную и постоянную информацию [2].

Каждая простая ПЗ-1 по степени формализации может быть аналитической, статистической и эмпирической [2].

Формальное описание концептуальных представлений позволяет рассмотреть и систематизировать все ограничения, применяемые в прикладных задачах на основе типологии ограничений в единой концептуальной структуре. Данное описание частных моделей знаний является основой для их последующей методической идентификации и выявления при выделении фрагментов под постоянную информацию из концептуальной модели 1-го рода.

Концептуальная модель 1-го рода любого уровня абстрагирования для *n*-ой предметной задачи с учетом расслоения представляется набором фрагментов модели в виде (ф.30) [2,8]:

$$KPi.1(z) =< KPi_v.1(z), \overline{KPi_c.1}(z) >, \quad (30)$$

где при *z=n* описывает набор концептуальных моделей *n*-ой предметной задачи объектного уровня (*i=2*), при *z=nm* – набор концептуальных моделей *m*-ой реализации *n*-ой предметной задачи конкретного уровня (*i=3*).

Рассмотрим эти наборы более подробно. Тогда $KP2_v.1(z)$ – фрагмент концептуальной модели под переменную информацию и $\overline{KP2_c.1}(z)$ – множество фрагментов концептуальной модели под постоянную информацию для объектного уровня (ф.31) [24,25]:

$$\overline{KP2_c.1}(n) = \{KP2_c^w.1(n)\}, \quad (31)$$

где $KP2_c^w.1(n)$ – фрагмент концептуальной модели под постоянную информацию на объектном уровне абстрагирования; индекс *w* – идентифицирует статистическую ПЗ-1 [24,29].

Для конкретного уровня $KP3_v.1(nm)$ - фрагмент концептуальной модели под переменную информацию; $\overline{KP3_c.1}(nm)$ – множество фрагментов концептуальной модели под постоянную информацию (ф.32):

$$\overline{KP3_c.1}(nm) = \{KP3_c^{wp}.1(nm)\}, \quad (32)$$

где $KP3_c^{wp}.1(nm)$ – фрагмент концептуальной модели под постоянную информацию на конкретном уровне; индекс *wp* – идентифицирует *p* – экземпляр *w*-статистической ПЗ-1 [2,25].

Расслоение ПЗ-1 на простые (*el*) и сложные (*com*) на объектном уровне формально можно представить (ф.33) [24,29]:

$$\overline{W}(n) = \overline{W^{el}}(n) \cup \overline{W^{com}}(n). \quad (33)$$

Все простые ПЗ-1 по степени формализации разделяются на: аналитические (*an*), статистические (*st*), эмпирические (*em*). Формально это можно представить (ф.34):

$$\overline{W^{el}}(n) = \overline{W^{el-an}}(n) \cup \overline{W^{el-st}}(n) \cup \overline{W^{el-em}}(n) \quad (34)$$

Поскольку типология зависимостей обусловлена уровнем семантической сложности, то необходимо для ПЗ-1 определять ее тип с учетом уровня сложности.

Статистические ПЗ-1 соответственно можно классифицировать по типам и по содержанию.

Фрагмент концептуальной модели 1-го рода под постоянную информацию для выделенной статистической ПЗ-1 на объектном уровне может быть представлен (ф.35) [24,29]:

$$KP2_c^{sp}.1(n) =$$

$$=< A^{sp}(n), T2^{sp}(n), \overline{w_{sp}}, R_2^{KP1-\overline{w_{sp}}} >,$$

$$=< A^{sp}(n), T2^{sp}(n), \overline{w_{sp}}, R_2^{KP1-\overline{w_{sp}}} >, \quad (35)$$

где $A^{sp}(n)$ – множество ПК, характеризующих *sp*-ую ПЗ 1-го рода; $T2^{sp}(n)$-множество бинарных отношений на ПК; $\overline{w_{sp}}$ – статистическая ПЗ-1, $R_2^{KP1-\overline{w_{sp}}}$ – увязка *sp*-ой ПЗ-1 и подструктурой основной концептуальной структуры.

Разделение экземпляров статистических ПЗ-1 на простые (*el*) и сложные (*com*) формально можно представить (ф.36) [24]:

$$\bar{P}(n) = \overline{P^{el}}(n) \cup \overline{P^{com}}(n). \quad (36)$$

Формально разделение ПЗ-1 по степени формализации можно представить (ф.37):

$$\overline{P^{el}}(n) = \overline{P^{el-an}}(n) \cup \overline{P^{el-st}}(n) \cup \overline{P^{el-em}}(n) \quad (37)$$

Фрагмент концептуальной модели под постоянную информацию для выделенного статистического ЭПЗ-1на конкретном уровне может быть представлен (ф.38) [24,29]:

$$KP3_c^{spl}.1(nm) =$$

$$=< B^{spl}(nm), T3^{spl}(nm), \overline{p_l^{sp}}, R_3^{KP2-\overline{p_l^{sp}}} > \quad (38)$$

где $B^{spl}(nm)$ – множество ЭПК, характеризующих *spl* –ый ЭПЗ 1-го рода; $T3^{spl}(\underline{nm})$ – множество бинарных отношений на ЭПК; p_l^{sp} – экземпляр ПЗ-1 $R_3^{KP2-\overline{p_l^{sp}}}$ – увязка *s*-ого ЭПЗ-1 и подструктуры основной концептуальной структуры [24,29].

Увязка фрагментов концептуальной модели под постоянную информацию для выделенной статистической ПЗ-1 (*sp*) и для множества ее экземпляров (ф.39) [24]:

$$KP2_c^{sp}.1(n) \to \{KP3_c^{spl}.1(nm)\}. \quad (39)$$

Таким образом, каждой модели для статистической ПЗ-1 на объектном уровне соответствует множество моделей для той же ПЗ-1 на конкретном уровне.

Заключение

Уточнение формального описания концептуальных представлений прикладных инженерных задач позволяет учесть и систематизировать все многообразие ограничений, применяемых в этих задачах, в соответствии с типологией ограничений на единой концептуальной структуре.

Это является основой для последующего их методического выявления и описания при разработке методики выделения фрагментов концептуальной модели под постоянную информацию для предметных задач и методики определения типологии предметных зависимостей 1-го рода.

Литература

1. *Волкова Г.Д.* Методология автоматизации интеллектуального труда. М.: Янус-К. 2013. 104 с.
2. *Волкова Г.Д.* Концептуальное моделирование проектных задач: учеб. Пособие М.: ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН». 2016. 117 с.
3. *Лаврёнова О.А.* Моделирование семантики научно-технических текстов для АИС и его теоретические основы // Труды 8-ой Всероссийской научной конференции «Электронные библиотеки: перспективные методы и технологии, электронные коллекции» RCDL’ 2006. Суздаль. Россия. 2006.
4. *Лукашевич Н.В.* Тезаурусы в задачах информационного поиска // М.: МГУ. 2011. 495 с.
5. *Кара-Ушанов В.Ю.* Модель «Сущность – Связь»: учеб. пособие //Екб.: Электронное текстовое издание. 2017. 64 с.
6. *Пинягина О.В.* Лекции «Базы Данных»: ER-модель (entity–relationship) // [Электронный ресурс]. URL: http://kek.ksu.ru/EOS/BD/ER_model.html/ (доступ 12.10.2019).
7. Методология IDEF1X // [Электронный ресурс]. URL: https://www.idef.com/idef1x-data-modeling-method/ . (доступ 12.09.2019).
8. *Марка Д., МакГоуэн К.* Методология структурного анализа и проектирования SADT // М.: Метатехнология. 1993. 240 с.
9. *Симаков К.В.* Модели и методы извлечения знаний из текстов на естественном языке/ Диссертации на соискание ученой степени кандидата

технических наук. Специальность 05.13.17. Москва. 2008.
10. *Норман Д.* Семантические сети // Психология памяти. М.: Че Ро. 2000. С. 350-356.
11. *Соломатин Н.М.* Информационно-семантические системы // М.: Высшая школа. 1989. 127 с.
12. Prolog [Электронный ресурс]. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Prolog/ (доступ 01.04.2021).
13. *Кузин Е.С.* Информационные технологии и проектирование прикладных программных систем // Информационные технологии и вычислительные системы РАН. 1996. № 3.
14. *Кузин Е.С.* Концепции информационной технологии функционально-ориентированного проектирования прикладных информационных систем. // Информационные технологии. 2000. № 1.
15. *Вагин В.Н., Михайлов И.С.* Обеспечение интероперабельности информационных систем на основе подхода метамоделирования и онтологии предметной области // Труды Второй Международной конференции «Системный анализ и информационные технологии». САИТ-2007. Обнинск. Россия. С. 149-152.
16. *Сидорова Е.А.* Подход к моделированию процесса извлечения информации из текста на основе онтологий // Онтология проектирования. 2018. Т.8. №1(27). С. 134-151.
17. Описание метода Онтология // [Электронный ресурс]. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Онтология_(информатика)/ (доступ 18.03.2021).
18. *Гладун А.Я.* Онтологии в корпоративных системах // Корпоративные системы. М.: Комиздат. 2006. С. 13-26.
19. *Кузнецов О.П., Суховеров В.С.* Онтологический подход к оценке тематики научного текста // Онтология проектирования. 2016. Т. 6. №1(19). С. 55-66.
20. *Бабанов А.М.* Два современных подхода к семантическому моделированию – ORM и ERMM // Вестник Томского Государственного университета. 2014. №3(28). С. 46-56.
21. Object Oriented Approach // [Электронный ресурс]. URL: https://www.tutorialspoint.com/system_analysis_and_design/system_analyss_and_design_object_oriented_approach.html/ (доступ 18.03.2021).
22. *Грэхем И.* Объектно-ориентированные методы. Принципы и практика. М.: Вильяме. 2004. 880 с.
23. *Леоненков А.В.* Объектно-ориентированный анализ и проектирование с использованием UML и IBM Rational Rose. М.: Бином. Лаборатория знаний. 2006. 320 с.
24. *Ньи Ньи Хтве, Волкова Г.Д.* Разработка формального описания типологии статистических предметных ограничений при концептуальном моделировании прикладных задач // Вестник МГТУ «Станкин». 2021. №2(57). С. 13-19.
25. *Ньи Ньи Хтве, Волкова Г.Д., Тюрбеева Т.Б.* Формальное описание классификации и обработки концептуальной модели объектного уровня для предметной задачи // В сборнике: Цифровая экономика: технологии, управление, человеческий капитал. Материалы III всероссийской научно-практической конференции. 2020. С. 73-78.
26. *Волкова Г.Д, Ньи Ньи Хтве.* Формальное описание процедуры обработки концептуальной модели // Материалы XIII всероссийской конференции с международным участием «Машиностроение: традиции и инновации (МТИ – 2020)». Сборник докладов. М.: ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН». 2020. С. 298-305.
27. *Волкова Г.Д.* Философские аспекты моделирования конструкторско-технологических знаний при создании систем автоматизации проектирования в машиностроении // Вестник МГТУ Станкин. 2012. № 1 (19). С. 141-144.
28. *Тюрбеева Т.Б., Волкова Г.Д., Семячкова Е.Г., Винарская Г.А.* Исследование методов классификации и представления знаний в научно-технических публикациях и технической документации // Вестник МГТУ «СТАНКИН». 2018. № 4 (47). С. 168-171.
29. *Nyi Nyi Htwe, Galina D. Volkova, Tatyana B. Tyurbeeva, Khant Ko Zan.* Processing Of Conceptual Models Of Subject Problems For Extracting Knowledge From Technical Documentation // 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus), IEEE. 2021. P. 2185-2189.
30. *Волкова Г.Д, Ньи Ньи Хтве.* Формальное описание классификации и обработки концептуальной модели конкретного уровня для предметной задачи // XXVIII конференция «Математика. Компьютер. Образование. 2021» МКО-2021, 25-30 января 2021 г.: Тезисы докладов. М. 2021. 212. С. 48.
31. *Волкова Г.Д.* Методология автоматизации проектно-конструкторской деятельности в машиностроении // Учебное пособие. М.: МГТУ «Станкин». 2000. 81 с.

Ньи Ньи Хтве. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», г. Москва. Аспирант. Область научных интересов: информационные технологии, автоматизация интеллектуальных процессов. E-mail: sawnyinyi90@yandex.ru.

Волкова Галина Дмитриевна. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», г. Москва. Заведующий кафедрой. Доктор технических наук, профессор. Область научных интересов: информационные технологии, автоматизация интеллектуальных процессов., концептуальное проектирование техники и технологий. E-mail: cog-par@yandex.ru. (ответственный за переписку).

Григорьев Олег Георгиевич. Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» РАН, г. Москва. Главный научный сотрудник. Доктор технических наук. Область научных интересов: информационные технологии, методы искусственного интеллекта. E-mail: oleggpolikvart@yandex.ru

Development of a formal apparatus for the description and processing of conceptual models

Nyi Nyi Htwe[I], G.D. Volkova[I], O.G.Grigoriev[II]

[I] Moscow State Technological University "Stankin", Moscow, Russia,

[II] Federal Research Center "Computer Science and Control" of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Abstract. This article presents a formal description of the conceptual model of the 1st kind at the object and specific levels for the subject task, which represents documented technical knowledge, taking into account the varying degree of their formalization and stratification of the conceptual model into constant information.

Keywords: conceptual model of the 1st kind of object, statistical constraints of the 1st kind, typology of constraints of the 1st kind.

DOI: 10.14357/20790279230305

References

1. *Volkova G.D.* Methodology of automation of intellectual work – Moscow.: Janus-K, 2013. P.104.
2. Volkova G.D. Conceptual modeling of project tasks: textbook. Manual. Moscow. "MSTU "STANKIN", 2016. P. 117.
3. *Lavrenova O.A.* Modeling the semantics of scientific and technical texts for AIS and its theoretical foundations // Proceedings of the 8th All-Russian Scientific Conference "Digital Libraries: Advanced Methods and Technologies, Digital Collections" – RCDL' 2006. Suzdal. Russia. 2006.
4. *Lukashevich N.V.* Thesaurus in the problems of information retrieval // M.: Izdvo MSU. 2011. P. 495.
5. *Kara-Ushanov V.Yu.* Model "Entity-Relationship": textbook. allowance // Ekb.: Electronic text edition, 2017. P. 64.
6. *Pinyagina O.V.* Lectures "Databases": ER-model (entity-relationship) // [Electronic resource]. URL: http://kek.ksu.ru/EOS/BD/ER_model.html/ (accessed 10.12.2019).
7. IDEF1X methodology [Electronic resource]: URL: https://www.idef.com/idef1x-data-modeling-method/ (accessed 09.12.2019).
8. *Mark D., McGowan K.* Methodology of structural analysis and design SADT // M.: Metatechnology, 1993. P. 240
9. *Simakov K.V.* Models and methods for extracting knowledge from texts in natural language / Dissertations for the degree of candidate of technical sciences. Specialty 05.13.17. Moscow. 2008.
10. *Norman D.* Semantic networks // Psychology of memory. – M.: Che Ro. 2000. P. 350-356.
11. *Solomatin N.M.* Information-semantic systems // M.: Higher school. 1989. P. 127.
12. Prolog // [Electronic resource]. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Prolog/ (accessed 04.01.2021).
13. *Kuzin E.S.* Information technology and design of applied software systems. // Information technologies and computer systems of the Russian Academy of Sciences No. 3. 1996.
14. *Kuzin E.S.* Concepts of information technology of functionally oriented design of applied information systems. // Information technologies No. 1, 2000.
15. *Vagin V.N., Mikhailov I.S.* Ensuring the interoperability of information systems based on

the metamodeling approach and domain ontology // Proceedings of the Second International Conference "System Analysis and Information Technologies" – SAIT. 2007. Obninsk. Russia. P. 149-152.
16. *Sidorova E.A.* ontology-based approach to modeling the process of extracting information from text // Ontology of design. 2018. V.8. No. 1 (27). P. 134-151.
17. Description of the ontology method // [Electronic resource]. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Ontology_(computer science)/ (accessed 03.18.2021).
18. *Gladun A.Ya.* Ontologies in corporate systems // Corporate systems: zhurn. M.: Komizdat. 2006. P. 13-26.
19. *Kuznetsov O.P., Sukhoverov V.S.* Ontological approach to assessing the subject of a scientific text // Ontology of design. 2016. V. 6. No. 1 (19). P. 55-66.
20. *Babanov A.M.* Two modern approaches to semantic modeling – ORM and ERMM // Tomsk State University Bulletin. 2014. №3(28). P. 46-56.
21. Object Oriented Approach // [Electronic resource]. URL: https://www.tutorialspoint.com/system_analysis_ and_design/system_analyss_ and_design_object_oriented_approach.html/ (accessed 03.18.2021).
22. *Graham I.* Object-Oriented Methods. Principles and practice. M.: William. 2004. P. 880.
23. *Leonenkov A.V.* Object-oriented analysis and design using UML and IBM Rational Rose. M.: Binom. Knowledge Laboratory. 2006. P. 320.
24. *Nyi Nyi Htwe, Volkova G.D.* Development of a formal description of the typology of statistical subject constraints in the conceptual modeling of applied problems. Vestnik MSTU Stankin. 2021. No. 2 (57). P. 13-19.
25. *Nyi Nyi Htwe, Volkova G.D., Turbeeva T.B.* Formal description of the classification and treatment of the conceptual model of the object-level substantive tasks. In the collection, the Digital economy: technology, governance, human capital. Materials of the III All-Russian Scientific and Practical Conference. 2020. P. 73-78.
26. *Volkova G.D., Nyi Nyi Htve.* Formal description of the procedure for processing a conceptual model. Materials of the XIII All-Russian Conference with international participation Mechanical Engineering: traditions and innovations (MIT-2020), Collection of reports. Moscow, "MSTU "STANKIN". 2020. 444. P. 298-305.
27. *Volkova G.D.* Philosophical aspects of simulation design and technological knowledge to create systems of design automation in engineering. Vestnik of MSTU Stankin. 2012. No. 1 (19). P. 141-144.
28. *Tyurbeeva T.B., Volkova G.D., Semyachkova E.G., Vinarskaya G.A*. Research of methods of classification and representation of knowledge in scientific and technical publications and technical documentation. Vestnik MSTU Stankin. 2018. No. 4 (47). P. 168-171.
29. *Nyi Nyi Htwe, Galina D. Volkova, Tatyana B. Tyurbeeva, Khant Ko Zan.* Processing Of Conceptual Models Of Subject Problems For Extracting Knowledge From Technical Documentation // 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus). IEEE. 2021. P. 2185-2189.
30. *Volkova G.D., Nyi Nyi Htwe.* Formal description of the classification and processing of a conceptual model of a specific level for an objective problem // XXVIII Conference "Mathematics. Computing. Education – 2021" MKO-2021. January 25-30. 2021: Abstracts., M.: 2021. 212. P. 48.
31. *Volkova G.D.* Methodology of automation of design and engineering activities in mechanical engineering / G.D. Volkova // Textbook. M.: MSTU "Stankin". 2000. P. 81.

Nyi Nyi Htwe. Moscow State Technological University "Stankin", Moscow, Russia. Postgraduate student. E-mail: sawnyinyi90@yandex.ru.

Volkova Galina Dmitrievna. Moscow State Technological University "Stankin", Moscow, Russia. Head of Department, Doctor of technical sciences, Professor. E-mail: cog-par@yandex.ru.

Grigoriev Oleg Georgievich. Federal Research Center "Computer Science and Control" of Russian Academy of Science. Chief Researcher , Doctor of technical sciences. E-mail: oleggpolikvart@yandex.ru

Информационная система поддержки аудиторской деятельности

Г.П. Акимова, А.Ю. Даниленко, Е.В. Пашкина, М.А. Пашкин,
А.А. Подрабинович, И.В. Туманова

Федеральное государственное учреждение «Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук», г. Москва, Россия

Аннотация. В статье рассмотрены особенности создания и внедрения автоматизированных информационных систем для аудиторских организаций. Приведено описание деловой логики таких организаций. Описаны особенности реализации систем, связанные с автоматизируемыми деловыми процессами. Сделан вывод о возможности замещения программного обеспечения в рассматриваемой сфере деятельности отечественными аналогами. Учтен опыт разработки АИС для ряда аудиторских организаций.

Ключевые слова: *автоматизированные информационные системы, информационная безопасность, аудиторская деятельность, аудиторские организации, цифровизация; импортозамещение.*
DOI: 10.14357/20790279230306

Введение

Широкое внедрение информационных технологий во все сферы жизни общества, именуемое в последнее время цифровизацией, требует создания все большего числа автоматизированных информационных систем (АИС) различного назначения [1]. Эти системы, предназначенные для автоматизации деловых процессов организаций всех форм собственности, существенно ускоряют работу и предоставляют возможность гибкого управления организациями их руководителям. Одной из сфер, в которых внедрение АИС приносит существенные преимущества, является аудиторская деятельность.

Правовые основы регулирования аудиторской деятельности определены Законом [2]. Согласно этому закону «Аудиторская деятельность (аудиторские услуги) – деятельность по проведению аудита и оказанию сопутствующих аудиту услуг, осуществляемая аудиторскими организациями, индивидуальными аудиторами». Закон устанавливает, что аудиторская деятельность осуществляется в соответствии со стандартами и иными требованиями, установленными Банком России, саморегулируемой организацией аудиторов. И далее «Аудит – независимая проверка бухгалтерской (финансовой) отчетности аудируемого лица в целях выражения мнения о достоверности такой отчетности».

Поскольку упомянутым законом установлено требование обязательного ежегодного аудита для широкого круга организаций (участники рынка ценных бумаг, различные фонды, акционерные общества, акции которых находятся в собственности Российской Федерации или муниципальных образований и т.д.), спрос на услуги по проведению аудиторских проверок большой. Организаций, оказывающих такие услуги, более 3000, в каждой из них трудится не менее 5 аудиторов [3]. Ряд российских фирм входит в международные сети аудиторских организаций. При этом все аудиторские организации России должны работать в соответствии с международными стандартами аудита (часть 2 статьи 1 Закона [2]).

Следствием такого широкого международного сотрудничества неизбежно стало внедрение программного обеспечения иностранного производства для автоматизации деловых процессов российских аудиторских организаций. В последнее время международные связи в сфере аудиторской деятельности стали разрушаться. Это привело, в частности, к сложностям использования информационных систем зарубежного производства, многие из которых хранят и обрабатывают информацию на серверах, размещенных в иностранных государствах. Следствием этих процессов неизбежно становится потребность в импортозамещении программного обеспечения и технических средств.

1. Деловая логика аудиторских организаций

Аудит выполняется по запросу организации-клиента и включает в себя изучение полученных документов с подготовкой мотивированного заключения. При взаимодействии аудиторской организации и организации-клиента используются различные каналы связи. Помимо обычной пересылки бумажных документов почтой в последнее время все шире применяются современные технологии. Для обмена небольшими объемами данных используется электронная почта, а полноценное взаимодействие выполняется с помощью специально разработанных автоматизированных информационных систем.

Важной особенностью аудиторской деятельности является необходимость сохранения аудиторской тайны. Согласно статья 9 Закона [2] «Аудиторскую тайну составляют любые сведения и документы, полученные и (или) составленные аудиторской организацией и ее работниками, а также индивидуальным аудитором и работниками, с которыми им заключены трудовые договоры, при оказании услуг, предусмотренных настоящим Федеральным законом». И далее «Аудиторская организация и ее работники, индивидуальный аудитор и работники, с которыми им заключены трудовые договоры, обязаны соблюдать требование об обеспечении конфиденциальности информации, составляющей аудиторскую тайну».

Отметим, что в [2] не предусмотрены меры по сохранению конфиденциальности аудиторской тайны, как это оговаривается, например, в случае персональных данных [4, 5] (сертификация информационных систем, применение специально разработанных средств защиты информации, жесткие требования к этим средствам и т.д.). Единственное требование [2] в этой части гласит: «Аудиторская организация, индивидуальный аудитор не вправе передавать сведения и документы, составляющие аудиторскую тайну, третьим лицам либо разглашать эти сведения и содержание документов» и далее «В случае разглашения аудиторской тайны аудиторской организацией, индивидуальным аудитором,… Банком России… лицо, которому оказывались услуги, предусмотренные настоящим Федеральным законом, вправе потребовать от виновного лица возмещения причиненных убытков».

Это означает, что для данных, обрабатываемых и передаваемых в ходе аудиторской деятельности не предусмотрены никакие меры по обеспечению информационной безопасности (которая включает обеспечение конфиденциальности, целостности и доступности информации), в случае нарушения конфиденциальности возможна только финансовая ответственность, а доступность и целостность не рассматриваются. Безусловно, данные, циркулирующие в ходе аудиторской проверки, могут содержать коммерческую тайну [6], персональные данные и другую информацию, защита которой предусмотрена законодательством России, поэтому в большинстве случаев АИС, обрабатывающие такие данные, должны быть надежно защищены.

Внутренними регламентами некоторых аудиторских организаций предусматривается уничтожение всей информации, связанной с завершенными проверками, в базах данных (БД) АИС. Это требование не содержится в Законе, но такая логика работы позволяет существенно уменьшить возможность утечки конфиденциальной информации.

Деловой процесс аудиторской проверки, подлежащий автоматизации с помощью АИС, можно представить следующим образом:

1. Заключение договора на оказание услуг. Отношения аудиторской организации с организацией-клиентом, как правило, долгосрочные. Договор может заключаться на несколько лет.
2. Организация-клиент отправляет запрос в аудиторскую организацию на выполнение работ по аудиту.
3. Назначаются сотрудники, которые будут работать по данному запросу.
4. В организацию-клиент направляется запрос с перечислением документов, которые должны быть предоставлены.
5. Происходит обмен данными между организацией-клиентом и аудиторской организацией, в ходе которого формируется набор документов, устраивающий аудиторов.
6. Выполняется экспертиза полученных материалов сотрудниками аудиторской организации.
7. Готовится заключение по результатам экспертизы.

Таким образом, автоматизированная система должна обеспечивать выполнение обмена документами между обеими организациями, участвующими в процессе. При этом количество документов и их объем могут быть весьма значительными, общий объем данных может составлять сотни гигабайт.

2. Учет особенностей деловой логики при реализации АИС

2.1. База данных пользователей

Если аудиторская организация работает много лет, имеет хорошую репутацию, то у нее, как правило, широкий круг заказчиков, с которыми идет постоянное сотрудничество. Тем самым у корпора-

тивной АИС будет большое количество пользователей, что может оказать существенное влияние на ее архитектуру и реализацию.

Большое количество учетных записей в БД пользователей (свыше 5000) предъявляет повышенные требования к АИС в части реализации алгоритмов авторизации пользователей в системе и управления доступом. Одним из решений, позволяющих упростить работу в этой части, может служить уничтожение учетных записей неактивных пользователей, а именно уволенных сотрудников организации и сотрудников организаций-клиентов, работа с которыми завершена. С другой стороны, последний вариант может оказаться нецелесообразным, поскольку отношения аудиторской организации с организациями-клиентами часто бывают долгосрочными в виду того, что аудиторские проверки выполняются регулярно, а для многих организаций ежегодно.

2.2. Авторизация в АИС

При создании АИС аудиторской организации, как и в случае любой АИС, требуется выбрать алгоритмы идентификации и аутентификации, позволяющие идентифицировать пользователя и проверить его полномочия с целью дальнейшей авторизации пользователя, т.е. предоставления ему полномочий для работы в системе. Применение аппаратных средств или биометрии для внешних пользователей и сотрудников организации-клиента, практически нереально, поэтому используется традиционная схема с вводом логина (системного имени) и пароля. Поскольку для внешних пользователей личное получение этих атрибутов невозможно, то требуется разработка схемы их получения в удаленном режиме. При этом само создание учетной записи для внешнего пользователя выполняет сотрудник аудиторской организации, основные данные сотрудников организации-клиента передаются в аудиторскую организацию по электронной почте. В состав этих данных входят фамилия, имя, отчество, почтовый адрес на сервере корпоративной электронной почты, предпочтительный вариант написания системного имени. При создании учетной записи для нее задаются системное имя (оно может отличаться от предложенного, поскольку именно такое написание может уже использоваться для другого пользователя АИС) и временный (или одноразовый) пароль. Эта информация отправляется внешнему пользователю на предоставленный электронный адрес, далее он средствами АИС при первом соединении с сервером должен установить для себя постоянный пароль. С этой целью возможна реализация отдельной страницы для первого входа, на которой не будет возможности никаких действий, кроме смены пароля.

Для внутренних пользователей, сотрудников аудиторской организации возможно использование парольной аутентификации, при этом создание учетных записей существенно проще, чем в случае внешних пользователей. Если все сотрудники аудиторской организации зарегистрированы в домене корпоративной вычислительной сети, то возможно использование доменной идентификации и аутентификации. В этом случае вся информация о пользователе извлекается из БД домена.

2.3. Применение облачных технологий

Существенным вопросом при заказе, разработке и внедрении АИС в любой организации является выбор вычислительных мощностей для сервера АИС. Возможные варианты: самостоятельная закупка оборудования и аренда вычислительных ресурсов у сторонней организации. В последнее время появилась новая возможность, точнее модификация второго варианта, использование облачных сервисов. Этот вариант отличается от традиционной аренды вычислительных ресурсов тем, что арендодатель предоставляет достаточно широкий набор дополнительных услуг.

Самое главное достоинство применения облачных сервисов для решения своих бизнес-задач состоит в существенном сокращении расходов на вычислительные ресурсы. При этом необходимо учесть, что помимо прямых расходов на закупку оборудования затраты на собственные хранилища данных включают расходы, связанные с обслуживанием всего программно-аппаратного комплекса, в частности на его квалифицированное администрирование. Следует также учесть, что в случае применения облачных технологий потребитель получает готовые решения, которые прошли апробацию большим числом пользователей. При этом основное отличие от покупаемых отдельно программных продуктов состоит в том, что провайдер облака обеспечивает совместимость различных компонент, наличие необходимых драйверов, а также своевременное и качественное обновление версий всех используемых программных продуктов. То же самое относится и к антивирусной защите, обеспечиваемой централизованно во всем облаке, что позволяет наиболее эффективно использовать все возможности антивирусных программных продуктов с регулярным обновлением их собственных баз данных и программных модулей.

2.4. Архитектура информационной системы

С точки зрения архитектуры АИС для аудиторской организации предпочтителен вариант тонкого клиента, когда в качестве клиентского приложения

используется стандартный интернет-браузер в отличие от архитектуры с использованием толстого клиента, при котором на клиентское место устанавливается отдельное специально разработанное приложение. Фактически вариант тонкого клиента оказывается безальтернативным вследствие большого числа пользователей, не являющихся сотрудниками аудиторской организации, поскольку установка своих программ в организациях-клиентах сложна технически и организационно.

2.5. Информационные объекты и права доступа

При проведении конкретной аудиторской проверки обычно занято несколько человек со стороны организации-клиента и несколько сотрудников аудиторской организации. Работа ведется в рамках проекта, соответственно имеется возможность образовать команду проекта, в которую входят сотрудники обеих организаций. С точки зрения АИС проект описывается отдельным информационным объектом, реквизитами которого должны быть название, краткое описание, даты открытия и завершения работ, состав команды проекта. При этом для команды проекта целесообразно создать группу в БД пользователей АИС для задания прав доступа на информационные объекты в проекте, назначить руководителя проекта и менеджера из числа сотрудников аудиторской организации.

Все передаваемые между организацией-клиентом и аудиторской организацией данные циркулируют в виде файлов, в БД АИС для каждого из них создается отдельный информационный объект, связываемый с объектом, описывающим проект. Создание объектов для файлов позволяет выполнять все действия стандартным для АИС образом: выполнять поиск, открывать файл для просмотра, задавать права доступа, экспортировать информацию из БД в виде файла.

Права доступа к информационным объектам должны задаваться с учетом деловой логики, реализуемой в рамках АИС и определяемой Законом. Вся информация доступна только членам команды проекта, это требование прямо следует из Закона. Права могут задаваться следующим образом:

– создание файлов в проекте доступно только членам команды проекта;
– чтение доступно всем членам команды. Это право может быть ограничено создателем объекта, менеджером или руководителем проекта. Ограничение может касаться запрета чтения для всех сотрудников организации-клиента, кроме создателя файла. Такой запрет обычно связан с финансовыми документами, в первую очередь с данными о зарплатах, премиях и других выплатах;
– права на редактирование определяются деловой логикой конкретной аудиторской организации: оно может быть полностью запрещено для файлов, уже находящихся в БД АИС или разрешено создателю этого информационного объекта. Разрешено редактирование реквизитов информационного объекта создателю в части описания файла, сотрудникам аудиторской организации для служебных пометок и системным учетным записям для ведения протокола работы, т.е. записей о чтении файла, редактировании реквизитов и других подобных действиях;
– уничтожение информационных объектов членам проектной команды обычно запрещено, в случае обнаружения ошибок в представленных данных создатель файла может подготовить его новую версию или объекта (возможен вариант включения новой версии в существующий объект). Регламентом работы аудиторской организации может быть предусмотрено уничтожение всей информации по завершенной проверке. Это действие подразумевает уничтожение файлов и должно выполняться автоматически по отдельной команде руководителя или менеджера проекта, но описывающие файл информационные объекты, могут сохраняться для формирования различных отчетов (необходимость их уничтожения определяется логикой работы аудиторской организации);
– изменение прав доступа к информационным объектам для АИС, работающих в аудиторских организациях, в большинстве случаев не требуется. Исключением может быть установка запрета на чтение, описанного ранее. Тем не менее, само наличие такой возможности требует предусмотреть при разработке АИС возможность изменения прав доступа для создателей информационных объектов, менеджеров и руководителей проектов.

2.6. Особенности проектов как информационных объектов

Отдельно следует рассмотреть процедуры создания, редактирования и уничтожения проектов. При работе с проектами неминуемо приходится вносить изменения в БД пользователей АИС, а именно создавать новые учетные записи и включать их в группу, соответствующую команде проекта. В норме такие действия должны выполняться администратором безопасности АИС, однако в случае аудиторских организаций количество проектов и членов их команд столь велико, что один или два человека просто физически не могут выполнять такой объем работ. В связи с этим в АИС может быть создана отдельная группа пользовате-

лей, члены которой будут исполнять обязанности руководителей и менеджеров проектов (группа руководителей). Члены этой группы наделяются правом создавать учетные записи пользователей (это право может быть ограничено требованием создавать учетные записи только для внешних пользователей, не сотрудников аудиторской организации) и создавать новые проекты, причем в момент создания проекта необходимо указать свою роль в проекте – руководитель или менеджер.

Руководитель или менеджер может назначить сотрудника организации на роль менеджера или руководителя, включить сотрудников своей и внешней организаций в команду проекта. В ряде случаев выдвигается требование реализовать в АИС возможность назначения менеджером или руководителем проекта сотрудника аудиторской организации, не входящего в группу руководителей. В таком случае требуется исключить возможность включения этого пользователя в группу руководителей, т.е. исполнять обязанности руководителя или менеджера он может только для своего проекта.

2.7. Другие особенности АИС для аудиторской организации

В некоторых случаях для повышения уровня конфиденциальности аудиторской информации выдвигается требование запрета получения файлов на рабочих местах пользователей. Этот режим подразумевает просмотр данных на экране без получения исходного файла. Для реализации этой технологии требуется преобразовать файл на сервере АИС в формат, который может быть просмотрен средствами интернет-браузера, например, jpeg или pdf.

Как и в любой АИС, существенной частью функциональных возможностей системы в рассматриваемом случае является формирование различных уведомлений пользователям. Уведомления могут быть связаны как с какими-либо запланированными событиями (приближение срока сдачи документов или завершения работ), так и с событиями в АИС (получение заказанных данных и т.д.).

Применение средств формирования различных отчетов при автоматизации деловых процессов аудиторской организации позволяет отслеживать загрузку сотрудников, сроки выполнения работ, получение и отправку документов. Все перечисленные действия существенно облегчают работу сотрудников и руководителей.

Заключение

Приведенные в статье особенности деловой логики аудиторских организаций (большой объем БД пользователей системы, особенности администрирования и своеобразные алгоритмы назначения прав доступа к информационным объектам) не препятствуют разработке АИС для автоматизации их работы. Отказ от ПО иностранного производства в данной сфере деятельности не должен приводить к критическим последствиям для отрасли в целом, создание российских аналогов зарубежных АИС для поддержки аудиторской деятельности не только возможно, но и не является сложной технически и затратной по ресурсам задачей.

Литература

1. Программа «Цифровая экономика Российской Федерации» http://static.government.ru/media/files/9gFM4FHj4PsB79I5v7yLVuPgu4bvR7M0.pdf.
2. Федеральный закон «Об аудиторской деятельности» от 30.12.2008 № 307-ФЗ с изменениями и дополнениями. https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_83311/
3. *Архипова Т.О., Зверев А.А.* Современные тенденции развития аудиторских услуг в России // Молодой ученый. 2021. № 24 (366). С. 212–215. https://moluch.ru/archive/366/82317/ (дата обращения: 10.04.2023).
4. Федеральный закон «О персональных данных» от 27.07.2006 № 152-ФЗ http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_61801
5. Об утверждении требований к защите персональных данных при их обработке в информационных системах персональных данных. Постановление Правительства Российской Федерации от 1 ноября 2012 г. № 1119.
6. Федеральный закон о коммерческой тайне №98-ФЗ от 29 июля 2004 г.

Акимова Галина Павловна. Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» РАН, г. Москва. Ведущий научный сотрудник, кандидат технических наук. Область научных интересов: системное программирование, системный анализ, информационные технологии, влияние человеческого фактора, информационно-аналитические системы, электронный документооборот, электронный архив. E-mail: akimova@isa.ru

Даниленко Андрей Юрьевич. Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» РАН, г. Москва. Старший научный сотрудник, кандидат физико-математических наук. Область научных интересов: системное программирование, системный анализ, информационные технологии, электронный документооборот, информационная безопасность, защита данных. E-mail: danilenko@isa.ru (ответственный за переписку).

Пашкина Елена Владимировна. Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» РАН, г. Москва. Ведущий программист. Область научных интересов: системное программирование, информационные технологии, электронный документооборот, электронный архив. E-mail: pashkina@isa.ru

Пашкин Матвей Александрович. Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» РАН, г. Москва. Ведущий программист. Область научных интересов: системное программирование, информационные технологии, информационно-аналитические системы, электронный архив. E-mail: pashkin@isa.ru

Подрабинович Андрей Александрович. Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» РАН, г. Москва. Ведущий программист. Область научных интересов: системное программирование, проектирование и создание методов и программных средств управления электронными документами, защита информации в документооборотных системах. E-mail: podrabinovich@isa.ru

Туманова Ирина Владимировна. Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» РАН, г. Москва. Ведущий программист. Область научных интересов: системное программирование, информационные технологии, электронный документооборот, электронный архив. E-mail: tumanova-irin@mail.ru

Audit Support Information System

Akimova G.P., Danilenko A.Yu., Pashkina E.V., Pashkin M.A., Podrabinovich A.A., Tumanova I.V.
Federal Research Center “Computer Science and Control” of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Abstract. The article discusses the features of the creation and implementation of automated information systems for audit organizations. The description of the business logic of such organizations is given. The features of the implementation of systems associated with automated business processes are described. The conclusion is made about the possibility of replacing software in the considered field of activity with domestic analogues. In preparing the article, the experience of developing AIS for a number of audit organizations was taken into account.

Keywords: *automated information systems; information security; audit activity; audit organizations; digitalization; import substitution*.
DOI: 10.14357/20790279230306

References

1. Programma “Tsifrovaya ekonomika Rossiyskoy Federatsii” [Program “Digital Economy of the Russian Federation”]. http://static.government.ru/media/files/9gFM4FHj4PsB79I5v7yLVuPgu4bvR7M0.pdf.
2. Federal’nyy zakon «Ob auditorskoy deyatel’nosti» ot 30.12.2008 № 307-FZ. [Federal Law “On Auditing” dated December 30, 2008 No 307-FZ]. https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_83311/.
3. *Arkhipova T.O., Zverev A.A.* Sovremennyye tendentsii razvitiya auditorskikh uslug v Rossii // Molodoy uchenyy. 2021. № 24 (366). S. 212–215. [Arkhipova T. O., Zverev A. A. Modern trends in the development of audit services in Russia // Young scientist. 2021. No. 24 (366). pp. 212–215]. https://moluch.ru/archive/366/82317.
4. Federal’nyy zakon “O personal’nykh dannykh” ot 27.07.2006 № 152-FZ. [Federal Law “On Personal Data” of July 27, 2006 No 152-FZ]. http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_61801.
5. Ob utverzhdenii trebovaniy k zashchite personal’nykh dannykh pri ikh obrabotke v informatsionnykh sistemakh personal’nykh dannykh. Postanovleniye Pravitel’stva Rossiyskoy Federatsii ot 1 noyabrya 2012 g. № 1119. [On the approval of requirements for the protection of personal data during their processing in personal data information systems. Resolution of the Government of the Russian Federation of November 1, 2012 No 1119].

6. Federal'nyy zakon o kommercheskoy tayne № 98-FZ ot 29 iyulya 2004 g. [Federal Law on Trade Secrets No. 98-FZ of July 29, 2004].

Akimova G.P. Ph.D.(Eng.), Leading Research Scientist, Federal Research Center "Computer Science and Control" of Russian Academy of Sciences, 44/2 Vavilova str., Moscow, 119333, Russia, author of more than 50 printed works, research interests: system programming, system analysis, information technology, the influence of the human factor, information and analytical systems, electronic document management, electronic archive. E-mail: akimova@isa.ru

Danilenko A.Yu. Ph.D.(Phys.-Math.), Senior Research Scientist, Federal Research Center "Computer Science and Control" of Russian Academy of Sciences, 44/2 Vavilova str., Moscow, 119333, Russia, author more than 40 publications (1 monograph), research interests: system programming, system analysis, information technology, electronic document management, information security, data protection. E-mail: danilenko@isa.ru

Pashkina E.V. Leading Programmer, Federal Research Center "Computer Science and Control" of Russian Academy of Sciences, 44/2 Vavilova str., Moscow, 119333, Russia, author of more than 15 publications, research interests: system programming, information technology, electronic document management, electronic archive. E-mail: pashkina@isa.ru

Pashkin M.A. Research Scientist, Federal Research Center "Computer Science and Control" of Russian Academy of Sciences, 44/2 Vavilova str., Moscow, 119333, Russia, author of more than 15 publications, research interests: system programming, information technology, information and analytical systems, electronic archive. E-mail: pashkin@isa.ru

Podrabinovich A.A. Leading Programmer, Federal Research Center "Computer Science and Control" of Russian Academy of Sciences, 44/2 Vavilova str., Moscow, 119333, Russia, author of more than 15 publications, research interests: system programming, design and creation of methods and software for managing electronic documents, protection of information in document circulation systems. E-mail: podrabinovich@isa.ru

Tumanova I.V. Leading Programmer, Federal Research Center "Computer Science and Control" of Russian Academy of Sciences, 44/2 Vavilova str., Moscow, 119333, Russia, author of more than 5 publications, research interests: system programming, information technology, electronic document management, electronic archive. E-mail: tumanova-irin@mail.ru

Критерии ранжирования накопителей информации в data-центрах по надежности

И.Н. Насыров[I], И.И. Насыров[II], Р.И. Насыров[III]

[I] Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Казанский (Приволжский) федеральный университет», г. Казань, Россия
[II] ООО «Телеком Интеграция», г. Казань, Россия
[III] ООО «Газпромнефть – Цифровые решения», г. Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Подобраны критерии в виде границ диапазонов ранжирования накопителей информации по надежности на основе их распределения по значениям SMART-параметров, представленных в открытом доступе data-центрами компании Backblaze за длительный период. В результате определены следующие критерии: 0 – для точечного диапазона накопителей с нулевыми значениями показателей надежности; 1 – для еще одного точечного диапазона накопителей, у которых хоть один показатель надежности имеет значение, равное единице; 2-8 – для накопителей, у которых значение хоть одного показателя надежности больше одного, но не превышает восьми, т.е. одну дорожку секторов записи/считывания; >8 – полуоткрытый диапазон накопителей со значениями хотя бы одного показателя надежности, превышающего восемь единиц.

Ключевые слова: *большие данные, показатель, критерий, накопитель информации, data-центр, надежность, ранжирование.*

DOI: 10.14357/20790279230307

Введение

Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения эффективности деятельности data-центров – систем централизованного хранения генерируемых в цифровой экономике больших данных. Для этого надо уменьшить расходы на заменяемые накопители информации и повысить доходы за счет расширения круга клиентов. Соответственно нужно исключить досрочное снятие высоконадежных накопителей, применять накопители со сниженной надежностью для хранения некритической информации по низким ценам, и в конце концов не приобретать накопители с заведомо плохими характеристиками надежности.

Исходя из этого, предлагается использовать сортировку накопителей по риску отказа на базе выявленных универсальных показателей надежности [1]. Термин введен в данной работе для обозначения параметров, имеющих непустые значения и одинаковую интерпретацию для всех моделей накопителей.

Для накопителей на жестких дисках HDD (hard disk drive) это: 1 Read error rate (частота ошибок при чтении данных с диска, происхождение которых обусловлено аппаратной частью диска); 5 Reallocated sectors count (число операций переназначения секторов); 7 Seek error rate (частота ошибок при позиционировании блока магнитных головок); 10 Spin retry count (число повторных попыток раскрутки дисков до рабочей скорости в случае, если первая попытка была неудачной); 196 Reallocation event count (число успешных и неуспешных операций переназначения); 197 Current pending sector count (число секторов, являющихся кандидатами на замену); 198 Uncorrectable sector count (число некорректируемых средствами диска секторов). Указанные параметры характеризуют состояние поверхности дисков (1, 5, 196, 197, 198), магнитных головок (7) и электродвигателя (10).

Для твердотельных накопителей SSD (solid state drive) рассматривались параметры: 177 Wear leveling count (максимальное количество операций стирания, выполняемых для одного блока флэш-памяти или разница между максимально изношенными (больше всего раз записанными) и минимально изношенными (записанными наименьшее число раз) блоками); 198 Uncorrectable sector count (общее количество неисправимых ошибок при чтении/записи сектора); 199 R-errors error count (число оши-

бок при приеме и передаче данных по интерфейсу); 232 Available reserved space (количество оставшихся резервных служебных блоков); 235 Power fail backup health (возможность сохранить данные из кэша в микросхемы флэш после внезапного отключения питания); 241 Lifetime writes from host system (объем записанного за все время жизни накопителя, в гигабайтах); 245 Timed workload media wear (временной износ носителя рабочей нагрузки). Следует отметить, что статистика по SSD-накопителям пока мала и не по всем указанным параметрам она имеется в полном объеме, другими словами, они – не универсальны.

Научной проблемой является отсутствие обоснования для выбора подходящих критериев в виде границ диапазонов ранжирования. Цель исследования состоит в подборе теоретически обоснованных и практически подтвержденных критериев ранжирования накопителей информации в data-центрах по надежности.

1. Методы

Информационной базой исследования послужили ежедневно записываемые SMART-данные (self-monitoring, analysis and reporting technology – технология самоконтроля, анализа и отчетности) накопителей, находящиеся в свободном доступе на сайте одной из крупнейших в мире групп коммерческих data-центров компании Backblaze (https://www.backblaze.com/b2/hard-drive-test-data.html). Они удовлетворяют всем требованиям для оценки надежности [2], в связи с чем исследователи со всего мира активно используют их в своей работе в самых разных областях [3]. В качестве методов исследования выбраны группировка, сортировка и визуализация распределения по значениям параметров продолжающих функционировать, снятых досрочно и отказавших накопителей информации за период с 10.04.2013 по 30.06.2022. Исходя из имеющего место различия по торговым маркам распределение по значениям параметров изучалось дифференцированно. Число накопителей рассматривалось в процентах к общему числу по каждой торговой марке отдельно. Использовались «сырые» данные, без нормирования производителями. Отсутствующие данные в расчетах не учитывались.

Сначала подбирались критерии в виде границ диапазонов показателей надежности. Потом производилась группировка продолжающих функционировать, снятых досрочно и отказавших накопителей отдельно согласно этим критериям. Затем сравнивалось количество накопителей в каждой группе.

2. Результаты

Число продолжающих функционировать, снятых досрочно и отказавших накопителей каждой

Табл. 1

Число накопителей в штуках и номера показателей надежности, значения которых есть в наличии

Торговая марка	Всего	Работа	Досрочно	Отказ	Показатели надежности
HDD:					
00MD00	2	0	2	0	1, 7
HGST	53405	44224	8352	829	1, 5, 7, 10, 196, 197, 198
Hitachi	13246	6	12699	541	1, 5, 7, 10, 196, 197, 198
Samsung	18	0	17	1	1, 197
ST	179810	108261	59451	12098	1, 5, 7, 10, 196, 197, 198
Toshiba	53230	51828	277	1125	1, 5, 10, 196, 197, 198
WDC	16419	12608	3279	532	1, 5, 7, 196, 197, 198
Всего	**316130**	**216927**	**84077**	**15126**	
SSD:					
CT	294	272	21	1	199
DELLBOSS	351	351	0	0	
HP	110	0	2	108	198, 199, 232, 241, 245
MTFDDAV	99	89	1	9	235, 241, 245
Samsung	10	0	0	10	177, 235, 241
Seagate	1828	1804	3	21	177, 232, 235, 241
SSDSCKKB	4	0	4	0	235, 241, 245
Всего	**2696**	**2516**	**31**	**149**	

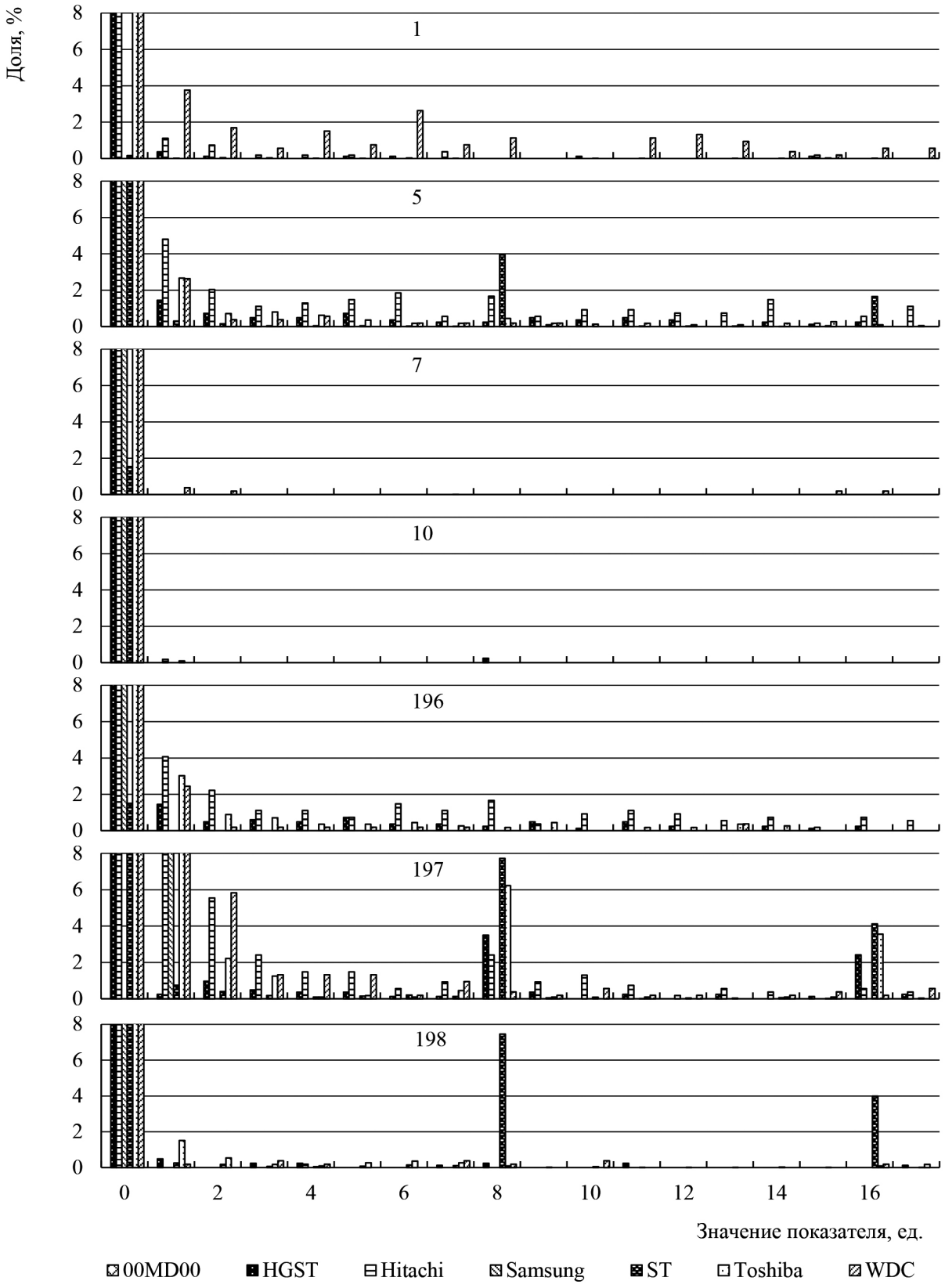


Рис. 1. Распределение отказавших HDD-накопителей различных торговых марок по значениям показателей надежности в %: 1, 5, 7, 10, 196, 197, 198

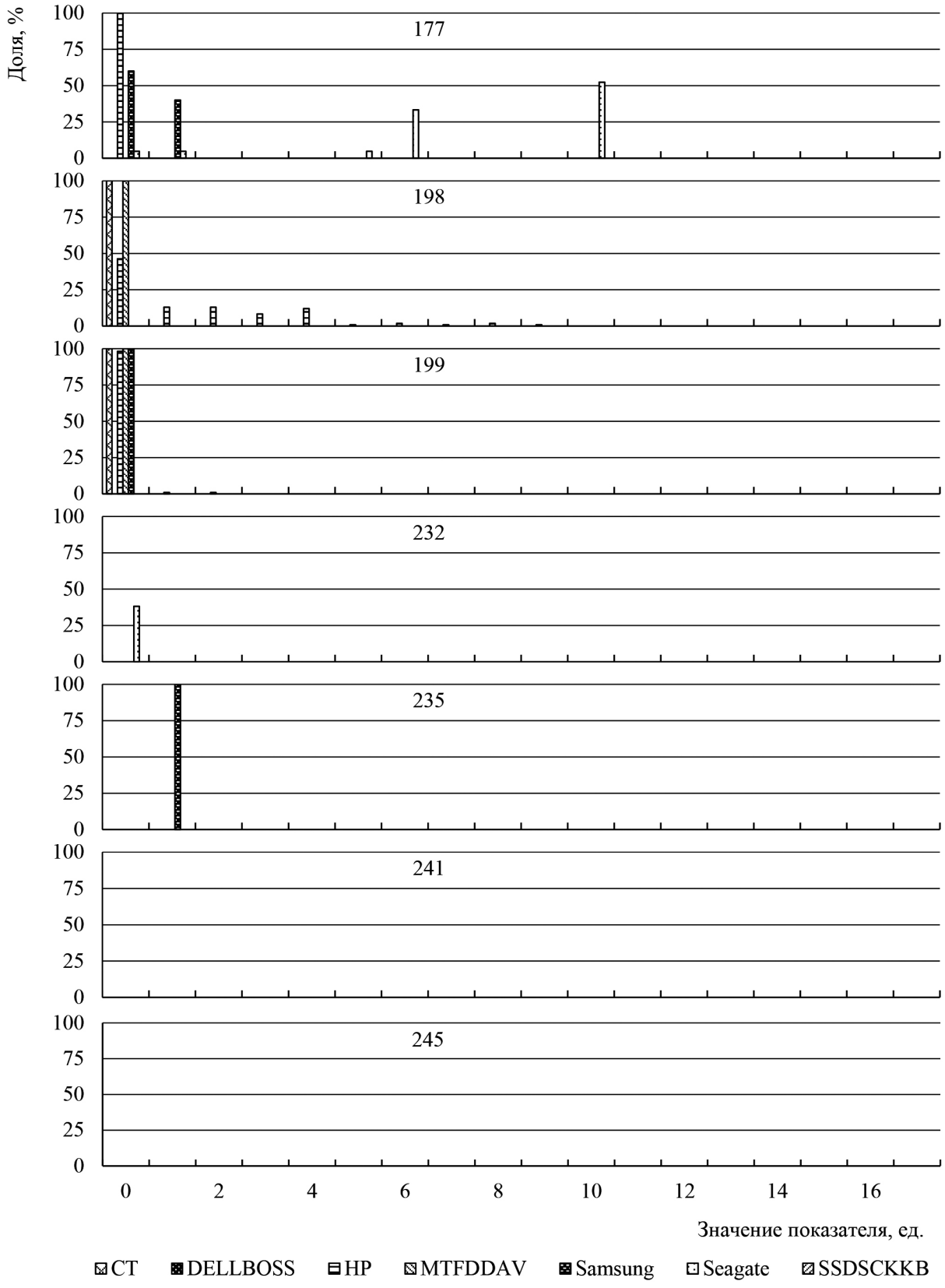


Рис. 2. Распределение отказавших SSD-накопителей различных торговых марок по значениям показателей надежности в %: 177, 198, 199, 232, 235, 241, 245

торговой марки и номера параметров – показателей надежности, значения которых есть в наличии, приведены в табл. 1.

Получено, что в распределении вышедших из строя HDD-накопителей по величине таких показателей надежности, как 5, 197 и 198, имеются особенности, состоящие в повышенном количестве накопителей у значений, кратных 8 – числу секторов на одной дорожке (рис. 1). Необходимо обратить внимание, что для наглядности вертикальная ось усечена. У SSD накопителей таких особенностей нет (рис. 2).

Отказавшие SSD-накопители имеют большие значения по показателям надежности 241 и 245 и поэтому вышли за пределы отображаемого диапазона оси абсцисс.

Исходя из приведенных результатов наиболее приемлемыми критериями в виде границ диапазонов являются 0 (большинство отказавших HDD накопителей сосредоточено в указанном точечном диапазоне), 1 (следующий по концентрации точечный диапазон), 8 (обнаруженный максимум, совпадающий с числом секторов на дорожке, придающий физический смысл для фиксации его в качестве границы диапазона). Остальные границы, в том числе кратные 8, не вводились, чтобы не усложнять систему градации.

На рис. 3 приведено распределение отказавших, снятых досрочно (рис. 4) и продолжающих функционировать (рис. 5) HDD-накопителей различных торговых марок по диапазонам 0, 1, 2-8, >8 значений показателей надежности с номерами 1, 5, 7, 10, 196, 197, 198.

Отсутствие по-настоящему универсальных показателей надежности для SSD-накопителей, т.е. имеющихся в наличии для всех торговых марок и одинаково интерпретируемых производителями, обуславливает недостаток каких-либо внятных визуально наблюдаемых общих закономерностей.

В качестве наглядного примера на рис. 6 приведено распределение отказавших, снятых досрочно

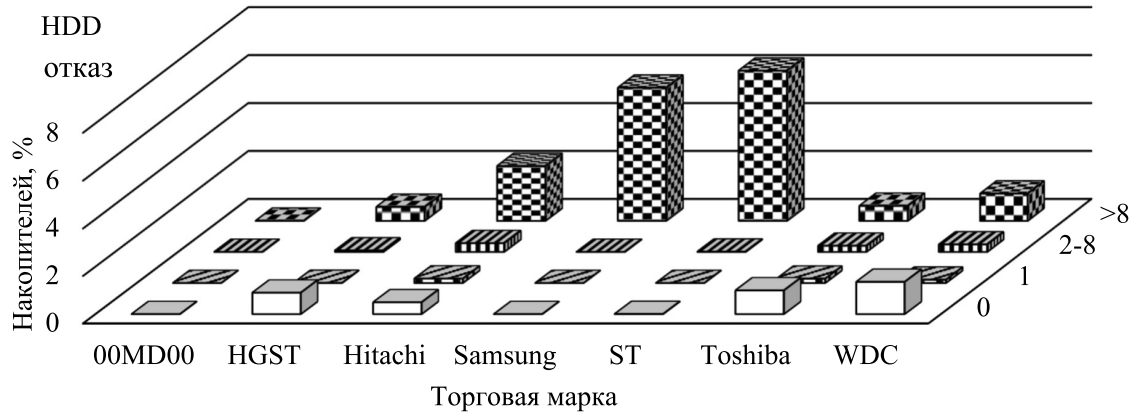


Рис. 3. Распределение отказавших HDD-накопителей по диапазонам 0, 1, 2-8, >8 значений показателей надежности в %: 1, 5, 7, 10, 196, 197, 198

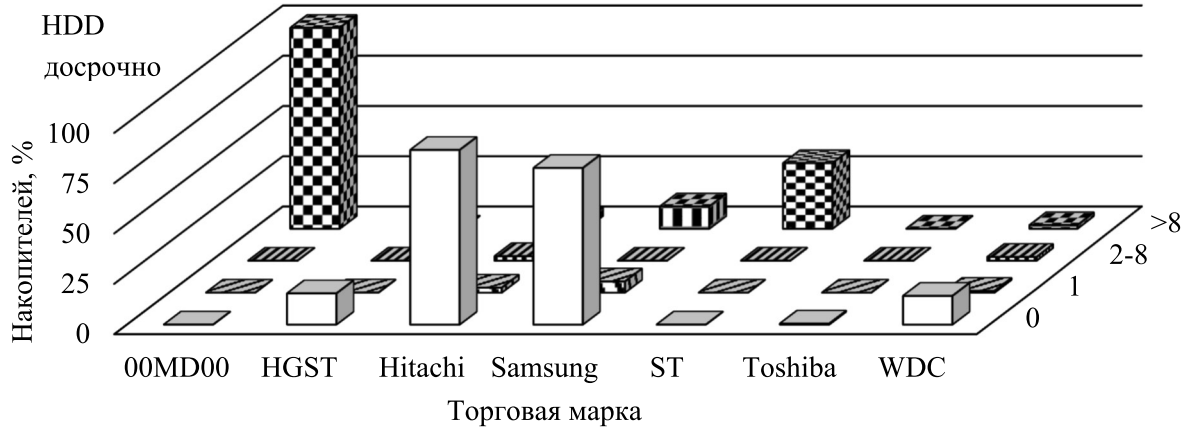


Рис. 4. Распределение снятых досрочно HDD-накопителей по диапазонам 0, 1, 2-8, >8 значений показателей надежности в %: 1, 5, 7, 10, 196, 197, 198

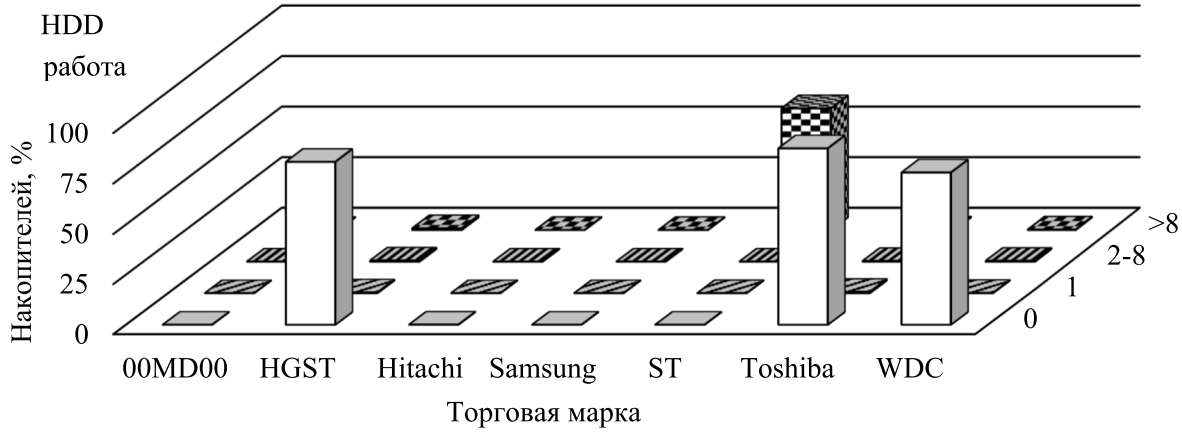


Рис. 5. Распределение продолжающих работать HDD-накопителей по диапазонам 0, 1, 2-8, >8 значений показателей надежности в %: 1, 5, 7, 10, 196, 197, 198

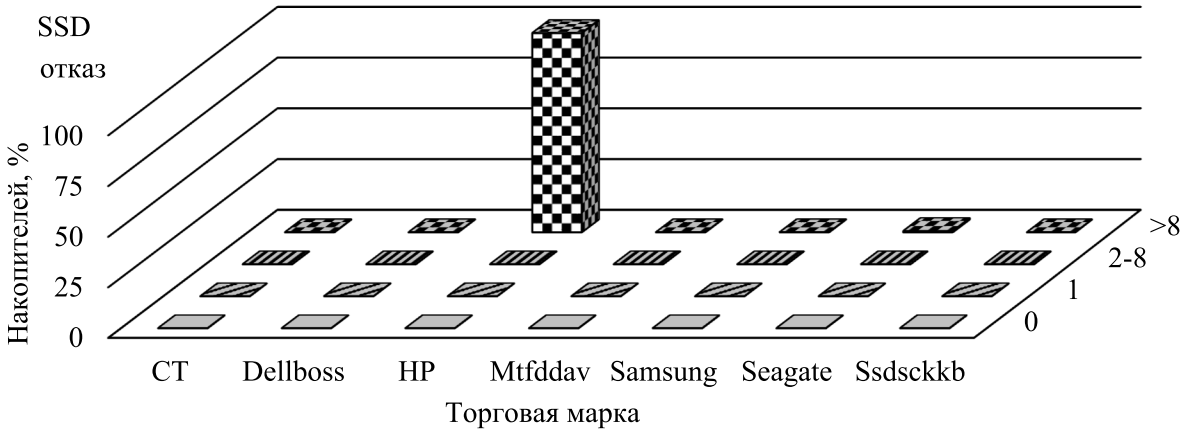


Рис. 6. Распределение отказавших SSD-накопителей по диапазонам 0, 1, 2-8, >8 значений показателей надежности в %: 177, 198, 199, 232, 235, 241, 245

(рис. 7) и продолжающих функционировать (рис. 8) SSD-накопителей различных торговых марок по диапазонам 0, 1, 2-8, >8 значений показателей надежности с номерами 177, 198, 199, 232, 235, 241, 245.

Пустые значения показателей надежности, не учтенные при анализе данных, составили 1,98% от полного числа HDD накопителей и 57,20% от полного числа SSD накопителей. Если для HDD точность вполне приемлемая, то для SSD нужны дополнительные исследования по мере накопления данных по надежности.

3. Обсуждение и выводы

Информация и знания превратились в стратегические ресурсы современной экономической системы, в результате чего можно наблюдать сужение материального производства при одновременном стремительном росте «информационной индустрии» [4]. Для хранения информации используются HDD и SSD-накопители большой емкости. При этом существует риск значительных экономических потерь вследствие выхода их из строя. Для диагностики состояния накопителей предлагается классифицировать их на основе показателей надежности на две или три группы [5,6]. Однако подобные классификации ограничены в использовании только для конкретных частных случаев.

Многие производители оборудования с 2007 года рекомендуют не использовать массивы RAID5 (Redundant Array of Independent Disks – избыточный массив независимых дисков) при создании отказоустойчивых систем хранения данных, а вместо них применять RAID6 [7]. Методы диагностики неисправностей основаны на важном предположении, что показатели надежности разных накопите-

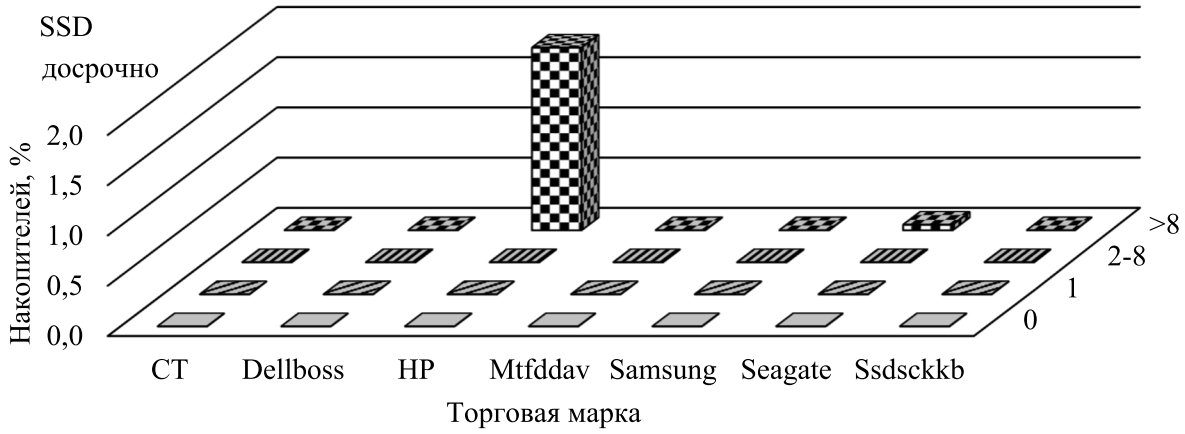


Рис. 7. Распределение снятых досрочно SSD-накопителей по диапазонам 0, 1, 2-8, >8 значений показателей надежности в %: 177, 198, 199, 232, 235, 241, 245

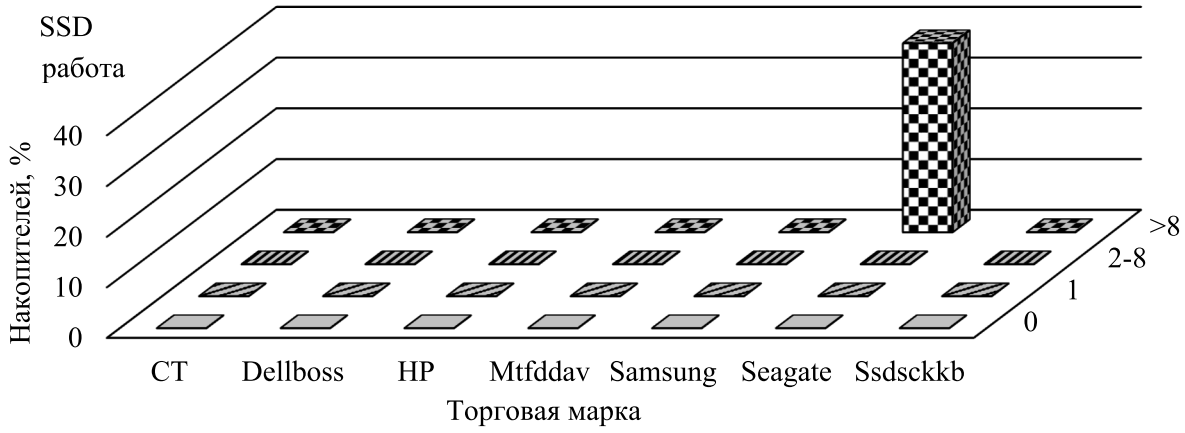


Рис. 8. Распределение продолжающих работать SSD-накопителей по диапазонам 0, 1, 2-8, >8 значений показателей надежности в %: 177, 198, 199, 232, 235, 241, 245

лей подлежат одинаковому распределению, хотя в реальности они различные у разных производителей [8]. Исходя из этого представленное исследование обладает научной новизной, заключающейся в получении теоретического обоснования и практического подтверждения критериев, отличающихся наличием физического смысла границ диапазонов показателей, позволяющих единообразно ранжировать накопители информации по надежности для всех моделей любых производителей.

Визуализация распределения накопителей по значениям показателей надежности позволяет сделать следующие, вполне определенные выводы.

Во-первых, хотя точечный диапазон 0 и ранее выбирался исследователями как основной [9], но следующие критерии в виде границ уже не были такими однозначными. Мы брали их из соображений эргономики, чтобы распределение накопителей по диапазонам было более-менее равномерным [10]. Однако, как видно из рис. 1, в представленном распределении HDD накопителей есть следующие по интенсивности скопления в точечном диапазоне 1 и хорошо наблюдаемые максимумы у значений, кратных 8 – числу секторов на дорожке. Соответственно у SSD-накопителей (рис. 2) подобных максимумов нет, т.к. нет движущихся частей. Следовательно, для HDD-накопителей такие критерии в виде границ диапазонов ранжирования по надежности являются вполне обоснованными.

Во-вторых, малое количество данных и отсутствие выявленных по-настоящему универсальных показателей надежности для SSD-накопителей не позволяют проводить полноценный анализ. Поэтому на этом этапе исследований будем пока придерживаться тех же критериев в виде границ диапазонов, что и для HDD-накопителей.

В-третьих, для отказавших HDD-накопителей (рис. 3) наблюдается относительно низкое их число с нулевыми показателями надежности и плавное увеличение их числа с ростом этих значений. Так теоретически и должно быть, что подтверждает, что критерии для диапазонов ранжирования оказались очень даже приемлемыми для анализа. В связи с тем, что относительная доля отказавших накопителей мала, то масштаб по оси ординат показан растянутым.

В-четвертых, в HDD-накопителях, снятых с эксплуатации досрочно (рис. 4), у некоторых торговых марок их доля с нулевыми значениями показателей надежности весьма заметна (HGST, Hitachi, Samsung, WDC). То есть вполне надежные накопители, которые и дальше могли бы успешно работать, заменяются. Очевидно, что такие накопители являются первоочередным резервом для повышения эффективности деятельности data-центров за счет снижения потребности в заменах.

В-пятых, у накопителей торговой марки ST, хотя относительная доля с опасно высокими значениями показателей надежности превалирует, однако они продолжают эксплуатироваться (рис. 5). Понятно, что это может быть вынужденной мерой. В таком случае предлагаем на них размещать некритическую информацию и соответственно брать за это меньшую плату. Это позволит уменьшить ущерб от возможной потери данных и одновременно расширить круг пользователей за счет низкой цены за услуги хранения.

В-шестых, анализ значений показателей надежности HDD-накопителей торговой марки ST показывает, что основные ошибки наблюдаются по показателю 7 Seek error rate (частота ошибок при позиционировании блока магнитных головок). Ясно, что причиной этого является их конструктивный недостаток. В таком случае надо воздержаться от приобретения накопителей указанной торговой марки, чтобы избежать возможного экономического ущерба.

В-седьмых, если по SSD-накопителям торговых марок HP и Seagate показатели надежности достаточно заметно отображают те из них, которые вышли из строя (рис. 6), сняты с эксплуатации досрочно (рис. 7), продолжающие работать (рис. 8), то по другим маркам этого нет. Но главная неприятность состоит в том, что среди работающих нет накопителей, у которых значения всех показателей были бы нулевые. Это означает, что или сами показатели надежности для SSD-накопителей подобраны неправильно или надо еще каким-то образом учитывать и пустые значения. А скорее всего по мере набора статистики в перспективе надо сделать и то и другое.

В итоге можно сделать общий вывод о существовании набора мероприятий, пригодных для практического применения в качестве инструментов по повышению эффективности деятельности data-центров.

Заключение

В результате исследования выявлены три инструмента по повышению эффективности деятельности data-центров:

1) для снижения потребности в заменах не снимать досрочно, а оставлять для дальнейшей эксплуатации накопители с нулевыми значениями показателей надежности: количественная экономия в рассматриваемом конкретном случае составит 7,1% для HDD и 0,7% для SSD от общего числа;
2) для уменьшения риска потери данных и одновременного расширения круга пользователей за счет низкой цены за услуги хранения размещать на накопителях с ненулевыми значениями показателей надежности некритическую информацию: прибыль зависит от стоимости накопителей;
3) для предотвращения возможного экономического ущерба воздержаться от приобретения накопителей определенных торговых марок, у которых обнаружены конструктивные недостатки: среди продолжающих работать накопителей доля таковых от общего числа составляет 34,4% для HDD и 70,2% для SSD.

При этом для SSD-накопителей требуются дополнительные исследования.

Литература

1. *Nasyrov I.N., Nasyrov I.I., Nasyrov R.I., Khairullin B.A.* Parameters selection for information storage reliability assessment and prediction by absolute values // Journal of Advanced Research in Dynamical and Control Systems. 2018. Vol. 10, Is. 2 Special Issue. P. 2248-2254. https://kpfu.ru//staff_files/F810852973/Parameters_Selection_for_Information_Storage_Reliability_Assessment_and_Prediction_by_Abs_Val.pdf.
2. *Diallo M.S., Mokeddem S.A., Braud A., Frey G., Lachiche N.* Identifying benchmarks for failure prediction in industry 4.0 // Informatics. 2021. 8 (4). P. 68. https://doi.org/10.3390/informatics8040068.
3. *Насыров И.Н., Насыров И.И., Насыров Р.И.* Большие данные по надежности накопителей информации в data-центрах // Цифровая экономика. 2022. № 2 (18). С. 33-37. https://doi.org/10.34706/DE-2022-02-04.
4. *Асташова Н.Д., Бобкова Т.В.* «Неэкономические» модели цифровой экономики // Вестник

Томского гос. ун-та. 2021. № 470. С. 72-79. https://doi.org/10.17223/15617793/470/8.
5. *Демидова Л.А., Филатов А.В.* Разработка модели классификации состояния жестких дисков на основе LSTM-нейронных сетей // Высокопроизводительные вычислительные системы и технологии. 2021. Т. 5. № 1. С. 37-42. https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46592613.
6. *Filatov A., Demidova L.* Application of Recurrent Networks to Develop Models for Hard Disk State Classification // Communications in Computer and Information Science. 2022. Vol. 1526. P. 380-390. https://doi.org/10.1007/978-3-030-94141-3_30.
7. *Bezrukov I.A., Salnikov A.I., Yakovlev V.A., Vylegzhanin A.V.* An Analysis of the Reliability of a Software Failure-Safe Array in the Organization of Long-Term Storage of Radio Interferometry Data with Ultra-Long Bases // Instruments and Experimental Techniques. 2022. Vol. 65. P. 232-237. https://doi.org/10.1134/S0020441222020105.
8. *Chang Shi, Zhenyu Wu, Xiaomeng Lv, Yang Ji.* DGTL-Net: A Deep Generative Transfer Learning Network for Fault Diagnostics on New Hard Disks // Expert Systems with Applications. 2021. Vol. 169. 114379. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2020.114379.
9. *Pinheiro E., Weber W.D., Barroso L.A.* Failure trends in a large disk drive population // Proceedings of the 5th USENIX Conference on File and Storage Technologies (FAST'07). San Jose, California, USA, 13-16 February. 2007. P. 17-28. https://www.usenix.org/legacy/events/fast07/tech/full_papers/pinheiro/pinheiro.pdf.
10. *Насыров Р.И.* Критерии и показатели ранжирования накопителей информации по степени надежности // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2016. № 10 (148). С. 30-35. https://doi.org/10.14489/vkit.2016.10.P. 030-035.

Насыров Искандар Наилович. Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Казанский (Приволжский) федеральный университет», г. Казань. Профессор, доктор экономических наук. Область научных интересов: налогообложение предпринимательской деятельности, надежность накопителей информации. E-mail: ecoseti@yandex.ru (Ответственный за переписку).

Насыров Ильдар Искандарович. ООО «Телеком Интеграция», г. Казань. Ведущий сервис-менеджер. Кандидат технических наук. Область научных интересов: информационная безопасность, надежность накопителей информации. E-mail: ildarec@mail.ru

Насыров Рустам Искандарович. ООО «Газпромнефть – Цифровые решения», г. Санкт-Петербург. Руководитель портфеля проектов. Область научных интересов: информационные системы, надежность накопителей информации. E-mail: rinasyrov@gmail.com

Criteria for ranking information storage devices in data centers by reliability

I.N. Nasyrov[I], I.I. Nasyrov[II], R.I. Nasyrov[III]

[I] Kazan (Volga Region) Federal University, Kazan, Russia

[II] Telecom Integration LLC, Kazan, Russia

[III] Gazpromneft – Digital Solutions LLC, St. Petersburg, Russia

Abstract. Criteria have been selected in the form of ranges boundaries for ranking information storage devices by reliability based on their distribution by SMART parameters values presented in the public domain by Backblaze data centers over a long period. As a result, the following criteria were determined: 0 – for a point range of drives with zero values of reliability indicators; 1 – for another point range of drives with at least one reliability indicator having a value equal to one; 2-8 – for drives whose value of at least one reliability indicator is greater than one, but does not exceed eight, i.e. one track of write/read sectors; >8 – a semi-open range of drives with values of at least one reliability indicator exceeding eight units.

Keywords: *big data, indicator, criterion, information storage, data center, reliability, ranking.*
DOI: 10.14357/20790279230307

References

1. *Nasyrov I.N., Nasyrov I.I., Nasyrov R.I., Khairullin B.A.* 2018. Parameters selection for information storage reliability assessment and prediction by absolute values. Journal of Advanced Research in Dynamical and Control Systems. 10(2 Special Issue):2248–2254. https://kpfu.ru//staff_files/F810852973/Parameters_Selection_for_Information_Storage_Reliability_Assessment_and_Prediction_by_Abs_Val.pdf
2. *Diallo M.S., Mokeddem S.A., Braud A., Frey G., Lachiche N.* 2021. Identifying benchmarks for failure prediction in industry 4.0. Informatics. 8(4):68. https://doi.org/10.3390/informatics8040068
3. *Nasyrov I.N., Nasyrov I.I., Nasyrov R.I.* 2022. Bol'shie dannye po nadezhnosti nakopitelej informacii v data-centrakh [Big data on storage devices reliability in data centers] // Cifrovaya ehkonomika [Digital Economy]. 2(18):33–37. https://doi.org/10.34706/DE-2022-02-04
4. *Astashova N.D., Bobkova T.V.* 2021. «Neehkonomicheskie» modeli cifrovoj ehkonomiki ["Non-Classical" Models of the Digital Economy]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta [Tomsk State University Journal]. 470:72–79. https://doi.org/10.17223/15617793/470/8
5. *Demidova L.A., Filatov A.V.* 2021. Razrabotka modeli klassifikacii sostoyaniya zhestkikh diskov na osnove LSTM-nejronnykh setej [Development of a hard disk state classification model based on the LSTM architecture of recurrent neural networks]. Vysokoproizvoditel'nye vychislitel'nye sistemy i tekhnologii [High-performance Computing Systems and Technologies]. 5(1):37–42. https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46592613
6. *Filatov A., Demidova L.* 2022. Application of Recurrent Networks to Develop Models for Hard Disk State Classification. Communications in Computer and Information Science. 1526:380–390. https://doi.org/10.1007/978-3-030-94141-3_30
7. *Bezrukov I.A., Salnikov A.I., Yakovlev V.A., Vylegzhanin A.V.* 2022. An Analysis of the Reliability of a Software Failure-Safe Array in the Organization of Long-Term Storage of Radio Interferometry Data with Ultra-Long Bases. Instruments and Experimental Techniques. 65:232–237. https://doi.org/10.1134/S0020441222020105
8. *Chang Shi, Zhenyu Wu, Xiaomeng Lv, Yang Ji.* 2021. DGTL-Net: A Deep Generative Transfer Learning Network for Fault Diagnostics on New Hard Disks. Expert Systems with Applications. 169. 114379. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2020.114379
9. *Pinheiro E., Weber W.D., Barroso L.A.* 2007. Failure trends in a large disk drive population. 5th USENIX Conference on File and Storage Technologies (FAST'07) Proceedings. San Jose, California, USA, 13-16 February 2007. 17–28. https://www.usenix.org/legacy/events/fast07/tech/full_papers/pinheiro/pinheiro.pdf
10. *Nasyrov R.I.* 2016. Kriterii i pokazateli ranzhirovaniya nakopitelej informacii po stepeni nadezhnosti [Criteria and Indicators for Ranking the Data Storage Devices According to the Degree of Reliability]. Vestnik komp'yuternykh i informacionnykh tekhnologij [Herald of Computer and Information Technologies]. 10(148):30–35. https://doi.org/10.14489/vkit.2016.10.pp.030-035

Nasyrov I.N. Doctor of Economics, associate professor, Kazan (Volga Region) Federal University, 18 Kremlevskaya str., Kazan, 420008, Republic of Tatarstan, Russia. E-mail: ecoseti@yandex.ru

Nasyrov I.I. Candidate of Technical Sciences, Telecom Integration LLC, 60 Podluzhnaya str., Kazan, 420015, Republic of Tatarstan, Russia. E-mail: ildarec@mail.ru

Nasyrov R.I. Gazpromneft – Digital Solutions LLC, 5 Kievskaya str., St. Petersburg, 190013, Russia. E-mail: rinasyrov@gmail.com

Математические модели социально-экономических процессов

Моделирование оценки системной эффективности развития сетевой транспортной инфраструктуры

Н.И. Белоусова[I], С.П.Бушанский[II], Е.М.Васильева[I], В.Н.Лившиц[I], И.А.Миронова[I]

[I] Федеральное государственное учреждение «Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук», г. Москва, Россия
[II] Федеральное государственное бюджетное учреждение «Центральный экономико-математический институт Российской академии наук», г. Москва, Россия

Аннотация. Исследован спектр моделей выявления естественно-монопольных свойств сетевой транспортной инфраструктуры, отвечающий изменениям параметров функций совокупных издержек. Применительно к моделированию развития фрагментов региональной транспортной сети разработаны расчетные конструкции оценки системной эффективности, позволяющие уточнить влияние на нее эффекта естественно-монопольной синергии, соответствующего области положительных значений технологического детерминанта экономии от структуры и приближенно измеряющего величину запаса субаддитивности издержек. Представлены результаты расчетов, связанных как с уточнениями методического характера в постановках и методах решения задач диагностики естественно-монопольных свойств (прежде всего, с использованием специальных расширений алгоритмов поиска оптимальной технологии перевозок), так и с модификациями вычислительных экспериментов в части анализа количественных оценок при вариации учитываемых факторов.

Ключевые слова: *сетевая транспортная инфраструктура, системная эффективность, естественно-монопольные индикаторы, постановки задач диагностики, тестирование субаддитивности функции издержек, технологические детерминанты, внегородская сеть дорог, системное и пользовательское равновесие, варьирование нормы дисконта, затратная эластичность.*
DOI: 10.14357/20790279230308

Введение

Данная статья является продолжением обсуждения вопросов, связанных с переходом от теоретических моделей диагностики естественно-монопольных свойств сетевой транспортной инфраструктуры к их прикладным аналогам, предназначенным для получения соответствующих количественных оценок [1,2].

В качестве ключевой проблемы моделирования оценки системной эффективности развития

сетевых инфраструктурных подсистем рассматривается проблема выявления их естественно-монопольных свойств. Такой подход актуален с точки зрения эффективного государственного управления функционированием и развитием естественных монополий. Основное внимание уделяется формируемым моделям диагностики естественно-монопольных свойств сетевых инфраструктурных технологий, включая развитие подходов к системной (нормативной и поведенческой) идентификации естественных монополий.

Предлагаемая методология опирается на рациональное сочетание модельных конструкций, принятых в современной теории естественной монополии, методов оптимизации/субоптимизации развития нелинейных пространственных сетей, допускающих гибкое представление инфраструктурных технологий, с методами инвестиционного проектирования, предусматривающими учет взаимосвязей параметров технологий в сфере естественных монополий и оценок эффективности при выборе и обосновании сетевых транспортных проектов.

Работоспособность предлагаемых подходов обоснована теоретически и подтверждена эмпирической проверкой конструируемых прикладных моделей оценки инвестиций в инфраструктурные объекты при различных постановках задач нормативной идентификации транспортной сети как естественной монополии, допускающей генерацию недостающих исходных данных за счет освоенных в ЦЭМИ РАН и ФИЦ ИУ РАН специальных приемов моделирования нелинейных затратных характеристик [3,4].

1. Элементы теории для решения задачи нормативной идентификации естественной монополии

Исходя из современной теории естественной монополии (прежде всего, см. [5-9]), возможно проведение ее системной идентификации, которая включает технологический аспект (нормативную идентификацию) и поведенческий (поведенческую идентификацию). В обоих случаях используются модели функции издержек, что предполагает наличие данных об оптимальных технологиях выпуска продукции при удовлетворении спроса на услуги транспортной сети. При этом предусматривается учет условий субоптимизации распределения по сети моделируемых корреспонденций и развития звеньев сети. В настоящей статье преимущественно рассматриваются возможности нормативной идентификации для целей диагностики естественно-монопольных свойств транспортных сетей.

Перевод содержательного определения естественной монополии (когда одной фирмой дешевле производить те же объемы выпусков, чем несколькими) в формальное может приводить к математическому выражению субаддитивности многопродуктовой функции издержек. Для общего случая анализа деятельности многопродуктовых объектов инфраструктуры в теории доступно не строгое аналитическое доказательство свойства субаддитивности функции совокупных издержек производства, а лишь доказательство на основе совокупности необходимых и достаточных условий, в том числе, с использованием системы специальных тестов.

Для выявления свойств субаддитивности функции совокупных издержек производства предлагаются следующие виды тестов:

– прямой на подтверждение естественной монополии – непосредственная количественная оценка соотношений субаддитивности издержек на специально конструируемой вычислительной сетке в ходе экспериментальных проверок этого свойства (без привлечения оценок по моделям технологических детерминант);
– прямой на отрицание естественной монополии – с оценкой одного технологического детерминанта – экономии от структуры (***SC***);
– косвенный на подтверждение естественной монополии – с оценками системы технологических детерминант (включая экономию от структуры – ***SC***, средние приростные издержки – ***AIC***, экономию от масштаба – ***S***), рассчитываемыми по функции издержек [5,6][1].

Для учета сетевых, прежде всего, топологических особенностей транспортных сетей мезоуровня вводится сетевая концепция субаддитивности издержек [2,6]. В соответствии с этой концепцией нарушение свойств естественной монополии для сети интерпретируется, прежде всего, как следствие ее перегруженности. Это определяет целесо-

[1] Индикатор экономии от структуры (***SC***) обеспечивает сравнение по издержкам гипотетических вариантов форм организации производства через ортогональные расщепления; включаются в рассмотрение варианты совместного производства всех видов продукции и варианты организации производств, которые полностью специализированы по одному или нескольким видам деятельности, суммарно обеспечивающих одинаковый объем спроса.
Оценка индикатора средних приростных издержек (***AIC***) связана с началом/ прекращением выпуска какого-то одного продукта; в расчет эффективности включается прирост издержек/ их экономия на единицу объема выпуска этого продукта.
Индикатор экономии от масштаба (***S***) – обратная величина к затратной эластичности, результат оценки сравнительной динамики: темпов прироста совокупных издержек и объемов выпуска продукции/услуг.

образность формирования управленческих решений о проведении соответствующих структурных и организационных преобразований, например, речь может идти о снижении нагрузки посредством передачи части ее на конкурирующие сети или о корректировке сложившейся структуры территориального развития.

При решении задачи автономной нормативной идентификации, т.е. без анализа взаимосвязей с характеристиками сетевого проекта, оцениваются значения естественно-монопольных индикаторов деятельности/технологических детерминант для различных уровней выпуска/спроса и проверяются необходимые и достаточные условия существования естественной монополии, разработанные в [5]. Необходимым условием субаддитивности является наличие экономии от структуры (***SC>0***). Достаточные условия субаддитивности определяются соблюдением совокупности двух следующих требований: а) снижение во всей допустимой области выпуска средних приростных издержек (***AIC***) по всем наборам продуктов/ услуг; б) наличие экономии от структуры.

В [5] также доказано, что условие ***SC>0*** является и необходимым, и достаточным только при моделировании отраслевой технологии как однопродуктовой. Но при однопродуктовом представлении отрасли имеет место излишняя агрегация, которая может приводить к неверным выводам относительно эффективности деятельности и не позволяет давать оценки по структурным преобразованиям в сферах естественных монополий [3,5].

Кроме того, корректная идентификация естественной монополии не предполагает использование индикатора экономии от масштаба ***(S***), но этот индикатор, как обратная величина к показателю затратной эластичности по выпуску, может оказаться полезным при анализе эффективности/ неэффективности деятельности в рамках той или иной организационной структуры.

2. Построение компьютерных экспериментов тестирования естественно-монопольных свойств сетевых инфраструктурных технологий

Применительно к фрагменту сети внегородских дорог строится многопродуктовая функция издержек, на ее основе рассчитываются технологические детерминанты - ключевые индикаторы (***SC, AIC, S***). По ним проводится тестирование функции издержек на субаддитивность и выявляется наличие (или отсутствие) свойств естественной монополии при производстве двух видов продукции (услуг): выполнении грузовых и пассажирских перевозок.

Эконометрическим способом с использованием пакета EViews (версия 11.0) по 625 точкам для объемов спроса на грузовые перевозки (в пределах от 0 до 30,5 млрд поездок в год) и на пассажирские перевозки (от 0 до 79,9 млрд поездок в год) моделируется общесетевая функция совокупных издержек для двухпродуктового случая.

В качестве исходных при построении процедур диагностики и анализе результатов расчетов, представляемых далее в Разделе 3 настоящей статьи, принимаются следующие положения. Задаются объемы нагрузки на сеть с разделением спроса на грузовые и пассажирские перевозки. Структура объемов корреспонденций задана и постоянна. Соответственно, «шахматка» корреспонденций не зависит от затрат на поездки, что отвечает предположению об экзогенном спросе. Учитываются соответствующие параметры фиксированной топологии сети или переменной, когда допускаются изменения технических состояний звеньев, причем как существующих, так и потенциальных, т.е. в алгоритмах оптимизации предусматриваются возможности изменений в структуре и конфигурации (начертании) сети. Моделирование функций издержек проводится в предположении, что цены на используемые ресурсы фиксированы (как, например, норма дисконта, назначаемая по вариантам) и/или постоянны. При эконометрическом моделировании квази-функции издержек для оценки субаддитивности, чтобы избежать априорной предсказуемости значений параметров, применяется квадратичная форма [5,7,8].

Посредством серий экспериментальных расчетов анализируется влияние способа выбора маршрутов (в соответствии с условиями пользовательского или системного равновесия) на естественно-монопольные свойства автодорожной сети. При этом имеют место различия, связанные с использованием для поиска оптимальных (или приближенных к ним) технологий двух следующих разных типов процедур субоптимизации при выборе кратчайших маршрутов следования корреспонденций: по средним издержкам пользователей или по предельным системным издержкам с учетом внетранспортных экстерналий.

Системное равновесие достигается, когда любое изменение выбора маршрутов не может улучшить системный критерий. При пользовательском равновесии ни один пользователь не может снизить свои издержки, изменив свой выбор, если другие своего выбора не меняют.

В большинстве случаев в теории оптимизации распределения потоков на транспортных сетях принято в зависимости от выбираемого критерия маршрутизации называть модели и методы, используемые при распределении потоков по критерию пользовательского равновесия, процедурами «по средним издержкам» и, напротив, модели и методы, используемые при распределении потоков по критерию системного равновесия – процедурами «по предельным издержкам». Как доказано в теории (см., например, [10-13]), причем не только при моделировании для случая линейных, но и нелинейных издержек сетевых транспортных технологий [13-16], системное равновесие обеспечивается, когда все требуемые перевозки направляются по кратчайшим, в смысле дифференциальных (предельных) затрат, маршрутам от пункта отправления к пункту прибытия.

При моделировании должны быть учтены разные типы основных внетранспортных экстерналий: как негативные (ущерб от ДТП и экологический ущерб), так и позитивные (внетранспортный эффект от снижения затрат пользователей). С позиции базовых положений теории естественной монополии, проверка свойств субаддитивности должна выполняться для оптимальных технологий: это требование строго соответствует выбору маршрутов по предельным системным издержкам. Но маршруты выбирают пользователи; их выбор, в первом приближении, моделируется условиями равновесия Нэша. Вместе с тем, практически трудно осуществить эффективное управление поведением пользователей так, чтобы эффективно сблизить расхождение общественного и пользовательского равновесий [17]. Тем не менее, принимаем допущение, что такая успешная система мер (возможно, на основе стимулирования более выгодного, для сети в целом, выбора маршрутов, а не взимания платы за «неправильный» выбор) может быть разработана и реализована. Эта гипотеза обеспечивает правомерность сопоставительного анализа оценок естественно-монопольных индикаторов.

В анализируемых расчетах предполагается возможность учета четырех видов внешних эффектов, зависящих от интенсивности движения автомобилей: внетранспортный эффект (порожденные выгоды от непосредственного снижения затрат пользователей автодорог), ущерб от загрязнения воздуха, шума автотранспорта и от дорожно-транспортных происшествий. Далее в расчетах внетранспортный эффект оценивается примерно в 30% от снижения затрат пользователей. Расчет ущерба от загрязнения воздуха проводится на основании Методики, утвержденной приказом Госкомэкологии России,[2] исходя из пробеговых выбросов загрязняющих веществ по видам в зависимости от скорости движения автомобиля.

Экономический ущерб от выбросов загрязняющих веществ рассчитывается на основе Временной методики 1999 года.[3] Так как экономическая оценка экологического ущерба зависит от уровня жизни, показатель эколого-экономической оценки удельного ущерба корректируется с учетом роста душевых доходов населения.

Оценка ущерба здоровью населения от шума автотранспорта на внегородских трассах принимается равной 0,15 руб. на 1 км пробега приведенной единицы транспорта.

Ущерб от дорожно-транспортных происшествий, как это принято в советских и российских нормативных указаниях и рекомендациях, зависит от расчетного количества ДТП на 1 млн авт.-км. Согласно рекомендациям Федерального дорожного агентства,[4] количество ДТП должно определяться в соответствии с Инструкцией по учету потерь народного хозяйства от дорожно-транспортных происшествий при проектировании автомобильных дорог[5]. Однако в сравнении с 80-ми годами прошлого века уровень ДТП на 1 млн авт.-км снизился, поэтому в расчетах целесообразно применять понижающий коэффициент. При определении количества ДТП на 1 млн авт.-км учитываются различные факторы, прежде всего, количество полос движения и ширина проезжей части дорог, ширина обочин, скорость движения.

3. Анализ результатов экспериментальных расчетов естественно-монопольных индикаторов применительно к фрагменту региональной сети дорог

Результаты расчетов при разных нормах дисконта, представленные в табл. 1-4, позволяют увидеть количественные оценки различий, связанных с применением двух типов процедур субоптимизации выбора кратчайших маршрутов: по средним издержкам пользователей или по предельным системным издержкам с учетом внетранспортных экстерналий.

---

[2] «Методика определения выбросов автотранспорта для проведения сводных расчетов загрязнения атмосферы городов»., утв. приказом Госкомэкологии России №66 от 16 февраля 1999 г.

[3] «Временная методика определения предотвращенного экологического ущерба», утв. Госкомэкологией РФ 09.03.1999.

[4] «Рекомендации по обеспечению безопасности движения на автомобильных дорогах» (ОДМ 218.4.005-2010), утв. распоряжением Федерального дорожного агентства от 12.01.2011 №13-р.

[5] «Инструкция по учету потерь народного хозяйства от дорожно-транспортных происшествий при проектировании автомобильных дорог» (ВСН 3- 81), утв. Минавтодором РСФСР 17.04.1981.

Табл. 1

Средние значения естественно-монопольных технологических индикаторов (при норме дисконта 10% и распределении потоков по критерию системного равновесия)*

Диапазоны объемов спроса – *x1, x2* (кол-во поездок в год, млрд)		**Экономия от структуры *SC (x1, x2)***	**Приростные средние издержки *AIC(x1)***	**Приростные средние издержки *AIC(x2)***	**Экономия от масштаба *S (x1, x2)***
груз. - *x1*	**пас. - *x2***				
0,0 - 0,3	0,0 - 0,8	0,177	0,45493	0,17517	1,280
0,3 - 0,6	0,8 - 1,6	0,157	0,45499	0,17519	1,225
0,6 - 0,9	1,6 - 2,4	0,142	0,45504	0,17522	1,193
6,1 - 7,6	16,0 - 20,0	0,055	0,45624	0,17567	1,062
7,6 - 9,1	20,0 - 24,0	0,049	0,45652	0,17578	1,055
9,1 - 10,7	24,0 - 28,0	0,045	0,45679	0,17588	1,048
18,3 - 19,8	48,0 - 51,9	0,028	0,45842	0,17650	1,026
19,8 - 21,3	51,9 - 55,9	0,027	0,45870	0,17661	1,023
21,3 - 22,9	55,9 - 59,9	0,025	0,45897	0,17671	1,021
24,4 - 25,9	63,9 - 67,9	0,023	0,45951	0,17692	1,017
25,9 - 27,4	67,9 - 71,9	0,022	0,45979	0,17702	1,015
27,4 - 29,0	71,9 - 75,9	0,021	0,46006	0,17713	1,013
29,0 - 30,5	75,9 - 79,9	0,020	0,46033	0,17723	1,011

*По расчетам авторов – с использованием процедур «по предельным издержкам»

Табл. 2

Средние значения естественно-монопольных технологических индикаторов (при норме дисконта 10% и распределении потоков по критерию пользовательского равновесия)*

Диапазоны объемов спроса – *x1, x2* (кол-во поездок в год, млрд)		**Экономия от структуры *SC (x1, x2)***	**Приростные средние издержки *AIC(x1)***	**Приростные средние издержки *AIC(x2)***	**Экономия от масштаба *S (x1, x2)***
груз. - *x1*	**пас. - *x2***				
0,0 - 0,3	0,0 - 0,8	0,179	0,45535	0,17621	1,283
0,3 - 0,6	0,8 - 1,6	0,159	0,45540	0,17623	1,227
0,6 - 0,9	1,6 - 2,4	0,144	0,45546	0,17625	1,194
6,1 - 7,6	16,0 - 20,0	0,056	0,45663	0,17670	1,061
7,6 - 9,1	20,0 - 24,0	0,050	0,45690	0,17680	1,054
9,1 - 10,7	24,0 - 28,0	0,045	0,45716	0,17690	1,047
18,3 - 19,8	48,0 - 51,9	0,029	0,45877	0,17751	1,023
19,8 - 21,3	51,9 - 55,9	0,027	0,45903	0,17762	1,021
21,3 - 22,9	55,9 - 59,9	0,026	0,45930	0,17772	1,018
24,4 - 25,9	63,9 - 67,9	0,023	0,45983	0,17792	1,013
25,9 - 27,4	67,9 - 71,9	0,022	0,46010	0,17802	1,011
27,4 - 29,0	71,9 - 75,9	0,021	0,46037	0,17812	1,009
29,0 - 30,5	75,9 - 79,9	0,020	0,46063	0,17823	1,007

*По расчетам авторов – с использованием процедур «по средним издержкам»

Из табл. 1,2 видно, что что при норме дисконта 10% значения всех анализируемых индикаторов по процедурам указанных типов различаются незначительно, во втором или в третьем знаке после запятой. Усредненные результаты расчетов при норме дисконта 10% для системы анализируемых индикаторов и выделенных диапазонов объемов спроса проявляют однотипный характер динамики характеристик по мере роста спроса. Имеет место положительная экономия от структуры, монотонно снижающаяся в целом по всей рассматриваемой области анализа спросовых переменных (примерно на порядок), которая демонстрирует наличие эффекта естественно-монопольной синергии.

Отсутствие монотонного снижения средних приростных издержек и по грузовым, и по пассажирским перевозкам а, напротив, определенный, хотя и незначительный, их монотонный рост позволяет, исходя из выбранного способа тестирования, фиксировать факт отсутствия свойства субаддитивности общесетевых совокупных издержек, т.е. рассматриваемая транспортная сеть не является естественной монополией на рассмотренной области спроса.

Важно подчеркнуть, что во всей области анализа приводимые в табл.1,2 значения индикатора экономии от масштаба остаются больше единицы и проявляют заметное (более, чем на порядок), причем монотонное, снижение. При монотонном

Табл. 3

Средние значения естественно-монопольных технологических индикаторов (при норме дисконта 50% и распределении потоков по критерию системного равновесия)*

Диапазоны объемов спроса – *x1, x2* (кол-во поездок в год, млрд)		**Экономия от структуры *SC (x1, x2)***	**Приростные средние издержки *AIC(x1)***	**Приростные средние издержки *AIC(x2)***	**Экономия от масштаба *S (x1, x2)***
груз. - *x1*	**пас. - *x2***				
0,0 - 0,3	0,0 - 0,8	0,106	0,70634	0,28687	1,154
0,3 - 0,6	0,8 - 1,6	0,088	0,70666	0,28700	1,120
0,6 - 0,9	1,6 - 2,4	0,076	0,70699	0,28712	1,102
6,1 - 7,6	16,0 - 20,0	0,021	0,71414	0,28985	1,028
7,6 - 9,1	20,0 - 24,0	0,017	0,71577	0,29047	1,022
9,1 - 10,7	24,0 - 28,0	0,014	0,71740	0,29109	1,018
18,3 - 19,8	48,0 - 51,9	0,004	0,72716	0,29481	0,999
19,8 - 21,3	51,9 - 55,9	0,003	0,72878	0,29543	0,997
21,3 - 22,9	55,9 - 59,9	0,002	0,73041	0,29605	0,994
24,4 - 25,9	63,9 - 67,9	0,001	0,73366	0,29729	0,990
25,9 - 27,4	67,9 - 71,9	0,000	0,73529	0,29791	0,988
27,4 - 29,0	71,9 - 75,9	-0,001	0,73691	0,29853	0,986
29,0 - 30,5	75,9 - 79,9	-0,001	0,73854	0,29915	0,984

*По расчетам авторов-– с использованием процедур «по предельным издержкам»

Табл. 4

Средние значения естественно-монопольных технологических индикаторов (при норме дисконта 50% и распределении потоков по критерию пользовательского равновесия)*

Диапазоны объемов спроса – *x1, x2* (кол-во поездок в год, млрд)		**Экономия от структуры *SC (x1, x2)***	**Приростные средние издержки *AIC(x1)***	**Приростные средние издержки *AIC(x2)***	**Экономия от масштаба *S (x1, x2)***
груз. - *x1*	**пас. - *x2***				
0,0 - 0,3	0,0 - 0,8	0,114	0,71280	0,28783	1,172
0,3 - 0,6	0,8 - 1,6	0,096	0,71309	0,28794	1,136
0,6 - 0,9	1,6 - 2,4	0,083	0,71338	0,28805	1,116
6,1 - 7,6	16,0 - 20,0	0,025	0,71979	0,29050	1,034
7,6 - 9,1	20,0 - 24,0	0,021	0,72124	0,29105	1,029
9,1 - 10,7	24,0 - 28,0	0,018	0,72270	0,29161	1,024
18,3 - 19,8	48,0 - 51,9	0,007	0,73143	0,29494	1,004
19,8 - 21,3	51,9 - 55,9	0,006	0,73289	0,29549	1,001
21,3 - 22,9	55,9 - 59,9	0,005	0,73434	0,29605	0,999
24,4 - 25,9	63,9 - 67,9	0,003	0,73725	0,29716	0,995
25,9 - 27,4	67,9 - 71,9	0,002	0,73871	0,29771	0,992
27,4 - 29,0	71,9 - 75,9	0,002	0,74016	0,29827	0,990
29,0 - 30,5	75,9 - 79,9	0,001	0,74162	0,29882	0,988

*По расчетам авторов – с использованием процедур «по средним издержкам»

снижении оценки экономии от масштаба и приближении ее величины к единице сверху оно свидетельствует об эффективности производства услуг в той мере, в какой характеристикой эффективности, точнее, ее динамики в относительных единицах, могут служить затратные показатели эластичности по выпуску. По определению, индикатор экономии от масштаба соответствует обратной величине затратной эластичности по выпуску, для которой ее меньшее единицы значение указывает, что темп прироста издержек по мере роста загрузки сети отстает от динамики роста спроса.

В табл. 3,4 представлены результаты расчетов для случая существенной дефицитности инвестиций в развитие сети (норма дисконта увеличена до 50%), что может быть вызвано как недостаточным бюджетом инвестиций, так и ошибками в формировании потенциального множества проектов на предпроектных этапах. В явном виде ограничения на бюджет инвестиций не фигурируют в модели, но косвенно учтены увеличением нормы дисконта.

Проведем краткий анализ оценок в табл. 3,4, аналогичный тому, который был выполнен для расчетных индикаторов в табл.1,2. Как и следовало ожидать, увеличение нормы дисконта, интерпретируемое при моделировании как усиление дефицитности инвестиций, приводит к заметному сужению области субаддитивности и/или к сужению области с потерей эффекта естественно-монопольной синер-

гии. Факт наличия этого эффекта идентифицируется с помощью положительных значений экономии от структуры. Напротив, исключение такого явления наблюдается в виде усредненного отрицательного значения этого индикатора в нижних строках табл. 3, при увеличении загрузки сети. Оно также могло бы свидетельствовать об уменьшении запаса субаддитивности, которое оказалось возможным увидеть при моделировании оптимальной технологии в рамках поиска системного равновесия.

Из табл. 3,4 видно, что количественные значения рассматриваемых естественно-монопольных индикаторов существенно уменьшаются по мере роста спроса (хотя и неравномерно). Визуально это можно наблюдать, например, на диаграммах поверхностей, технологических детерминант ***S*** и ***SC*** или на графиках затратных эластичностей. Причем смещения проявляются отчетливей при усилении загрузки сети (см. рис. 1 для иллюстрации изменений оценок ***SC*** при норме дисконта 50%). Эти смещения наиболее заметны для индикаторов, обладающих определенными пороговыми значениями (дополнительно к свойствам монотонности/немонотонности изменений в рассматриваемой области анализа).

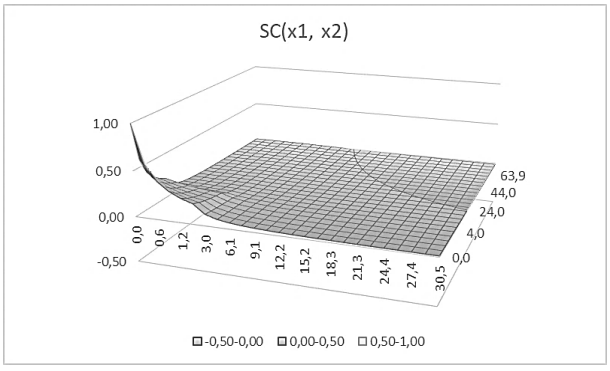


Рис. 1. Диаграмма значений экономии от структуры SC в области анализа субаддитивности общесетевой двухпродуктовой функции совокупных издержек варианта развития сети при использовании процедуры поиска системного равновесия и норме дисконта 50%

Эта особенность, относящаяся к пороговым значениям индикаторов экономии от структуры и масштаба (ноль для экономии от структуры и единица для экономии от масштаба), тоже допускает интерпретацию усиления дефицита дорогостоящих вложений в развитие сети и связана при нарушениях пороговых значений, прежде всего, с указанным выше исчерпанием запаса субаддитивности и переходом в область отрицательных значений для экономии от структуры. Последний факт указывает на нарушение необходимого условия существования естественной монополии, что может свидетельствовать как о целесообразности – для сокращения издержек – переключения части потоков на железнодорожный транспорт, более рационального использования парка грузовых автомобилей, поиска управленческих решений за пределами сферы естественной монополии и т.п., так и необходимости пересмотра инвестиционной политики и уточнения вариантов развития полигона сети.

Заслуживают внимания и факты, связанные с появлением ряда значений, меньших единицы для количественных оценок индикатора экономии от масштаба применительно к фрагментам региональной транспортной сети с высоким уровнем загрузки. В терминах затратной эластичности подобные оценки указывают на потерю эффективности при расходовании дефицитных и дорогостоящих ресурсов: подобные оценки иллюстрируют возможность возникновения ситуаций на сети при росте спроса, в которых издержки на оптимальных технологиях начинают расти быстрее, чем объемы выпуска.

Однако было бы ошибочным делать вывод, что в таком случае дальнейшее развитие сетевой транспортной инфраструктуры необоснованно. Ведь снижение бюджета инвестиций приведет к большей их дефицитности и еще худшим значениям индикатора экономии от масштаба. Требуется дополнительный анализ не учтенных при моделировании возможностей дублирования наиболее загруженных звеньев сети, более рационального размещения предприятий и организаций, а также перераспределения бюджетных ресурсов и расширения источников финансирования.

Представляет интерес также сопоставительный анализ оценок моделируемых характеристик при выделенных значениях норм дисконта 0,1 и 0,5 (табл. 5).

Для удобства сопоставлений и усиления четкости визуализации полученных оценок представленные данные в табл. 5 сгруппированы следующим образом. В верхней половине таблицы размещаются фрагменты сравниваемых количественных оценок, которые при норме дисконта 10 и 50% выбраны последовательно для ряда небольших значений объемов спроса. Соответственно, в нижней половине таблицы представлены фрагменты сравниваемых количественных оценок, которые при норме дисконта 10 и 50% выбраны последовательно для ряда значений объемов спроса, отвечающих высокому уровню загрузки сети.

Наиболее интересными результатами расчетов представляются следующие оценки и выводы.

Табл. 5.

Сопоставление естественно-монопольных характеристик при норме дисконта 10 и 50% и распределении потоков по критерию системного равновесия*

Диапазоны объемов спроса – *x1, x2* (кол-во поездок в год, млрд)		**Экономия от структуры *SC (x1, x2)***	**Приростные средние издержки *AIC(x1)***	**Приростные средние издержки *AIC(x2)***	**Экономия от масштаба *S (x1, x2)***
груз. - *x1*	**пас. - *x2***				
При норме дисконта 10%					
0,0 - 0,3	0,0 - 0,8	0,177	0,45493	0,17517	1,280
0,3 - 0,6	0,8 - 1,6	0,157	0,45499	0,17519	1,225
0,6 - 0,9	1,6 - 2,4	0,142	0,45504	0,17522	1,193
0,9 - 1,2	2,4 - 3,2	0,130	0,45510	0,17524	1,171
При норме дисконта 50%					
0,0 - 0,3	0,0 - 0,8	0,106	0,70634	0,28687	1,154
0,3 - 0,6	0,8 - 1,6	0,088	0,70666	0,28700	1,120
0,6 - 0,9	1,6 - 2,4	0,076	0,70699	0,28712	1,102
0,9 - 1,2	2,4 - 3,2	0,067	0,70731	0,28724	1,089
При норме дисконта 10%					
22,9 - 24,4	59,9 - 63,9	0,024	0,45924	0,17682	1,019
24,4 - 25,9	63,9 - 67,9	0,023	0,45951	0,17692	1,017
25,9 - 27,4	67,9 - 71,9	0,022	0,45979	0,17702	1,015
27,4 - 29,0	71,9 - 75,9	0,021	0,46006	0,17713	1,013
29,0 - 30,5	75,9 - 79,9	0,020	0,46033	0,17723	1,011
При норме дисконта 50%					
22,9 - 24,4	59,9 - 63,9	0,002	0,73203	0,29667	0,992
24,4 - 25,9	63,9 - 67,9	0,001	0,73366	0,29729	0,990
25,9 - 27,4	67,9 - 71,9	0,000	0,73529	0,29791	0,988
27,4 - 29,0	71,9 - 75,9	-0,001	0,73691	0,29853	0,986
29,0 - 30,5	75,9 - 79,9	-0,001	0,73854	0,29915	0,984

*По расчетам авторов

Судя по значениям полученной системы оценок технологических детерминант, сохраняется вывод (как и по данным табл. 1,4) об отсутствии факта естественной монополии во всей области анализа. Свойство субаддитивности общесетевой функции издержек не подтверждается на анализируемом множестве переменных, поскольку не выполняется система необходимых и достаточных условий, принятых для выбранного способа тестирования. Выявляются диапазоны спросовых переменных, для которых положительные значения индикатора экономии от структуры не только монотонно убывают до своего порогового значения, т.е. до нуля, но и становятся отрицательными. Нарушение необходимого условия субаддитивности улавливается только при норме дисконта 50%, причем лишь при высоком уровне загрузки сети, в завершающей области анализа.

Относительно характера изменений средних приростных издержек выявляется нарушение достаточных условий всюду в области анализа: индикаторы по каждому из двух, принятых в экспериментах, переменных демонстрируют монотонный рост вместо требуемого снижения. Факт одинакового характера динамики при количественно разных значениях моделируемых оценок имеет место при любой норме дисконта для любого внутреннего фрагмента области анализа спросовых переменных. Но этот вывод не сохраняется при переходе из области с начальным, низким уровнем загрузки сети к граничной, завершающей области значений исходных спросовых переменных, в которой наблюдается высокий уровень загрузки сети. При этом количественно значения оценок приростных средних издержек практически совпадают при норме дисконта 10% и для начального, и для завершающего фрагментов области анализа, но существенно различаются и становятся примерно в 1,5 раза выше при переходе от начальной области к области с высоким уровнем загрузки. Представляется интересным выделить (по данным табл. 5) момент, иллюстрирующий проявления изменчивости взаимосвязей оценок экономии от масштаба и экономии от структуры, а также выявить сферы изменения значений индикатора экономии от масштаба, формально не связанного, как показано в теории, с установлением наличия свойства субаддитивности многопродуктовой общесетевой функции издержек.

Присущим сетевой транспортной инфраструктуре свойством зачастую считается наличие растущей экономии от масштаба ($\boldsymbol{S}>1$). Более того, не принимается во внимание доказанный в теории факт, что естественно-монопольные свойства не должны быть связаны со снижением количественных оценок экономии от масштаба, а переход за границу значений, меньших единицы, не обязательно соответствует потере статуса естественной монополии, т.е. отрицательным значениям экономии от структуры. В действительности такие представления являются ошибочными. Они опровергаются в теории в общем виде, и приводимые в статье примеры конкретных вычислительных экспериментов подтверждают несостоятельность подобных суждений.

При этом еще раз отметим, что количественные оценки, заметно превышающие единицу в начале области анализа и соответствующие сфере эффективной работы и развития сети, когда рост издержек отстает от динамики выпуска, выражаются через значения растущей экономии от масштаба, только когда всюду в области анализа этот индикатор, оставаясь больше единицы, монотонно снижается, приближаясь к своему пороговому значению, т.е. к единице, сверху.

Расчеты показывают, что такие результаты могут иметь место и при разных значениях нормы дисконта, и в различных фрагментах области анализа. Однако результаты, приведенные в нижней части табл.5, отвечающие фрагменту с высоким уровнем загрузки сети при норме дисконта 50%, иллюстрируют ситуацию, для которой характерны меньшие единицы значения падающей экономии от масштаба ($\boldsymbol{S}$<1) в сочетании как с неотрицательными (положительными и нулевыми), так и отрицательными значениями экономии от структуры. Этот момент особенно интересен тем, что неотрицательные значения экономии от структуры, свидетельствующие о наличии эффекта естественно-монопольной синергии, и, возможно, о наличии факта естественной монополии, имеют место не только при растущей экономии от масштаба, но и при падающей.

Другими словами, область потенциальной субаддитивности может быть объемнее по исходным спросовым характеристикам, чем область растущей экономии от масштаба, и содержать фрагменты с падающей экономией. Аналитически этот факт проявляется четко лишь для однопродуктового случая, в котором полное тестирование на субаддитивность, например, простейшей квадратичной функции издержек (со свободным членом, имитирующем условно-постоянные составляющие издержек для краткосрочной функции) в точности совпадает с проверкой положительных значений экономии от структуры.

В целом данные табл. 1-5 иллюстрируют возможность появления отрицательного значения индикатора экономии от структуры при решении задачи диагностики, т.е. показывают, что рассматриваемая транспортная сеть региона, отвечающая условиям соответствующей постановки, не всегда обладает свойствами естественной монополии. С ростом нагрузки на сеть запас субаддитивности исчерпывается, и экономия от структуры, постепенно снижаясь, становится меньше нуля. Такое нарушение необходимого условия субаддитивности общесетевой функции издержек свидетельствует о целесообразности структурных и организационных преобразований по ослаблению режимов перегруженности сети (например, снятие части нагрузки и передаче ее конкурирующим перевозчикам, поиск неучтенных возможностей изменения конфигурации сети). Также наблюдается рост средних приростных издержек и заметное снижение экономии от масштаба. Этим примером экспериментально подтверждается указанный в теории естественной монополии, но малоизвестный в управленческой практике факт, что сетевые транспортные подсистемы с естественно-монопольным компонентом могут характеризоваться не только растущей, но и постоянной или даже падающей экономией от масштаба.

Заключение

Полученные результаты могут рассматриваться как развитие методологии моделирования оценки системной эффективности сетевой транспортной инфраструктуры [16,18]. Применительно к фрагменту региональной транспортной сети формируется современный теоретико-прикладной подход к выявлению ее естественно-монопольных свойств посредством расчетных конструкций, специально разрабатываемых для оценки эффекта естественно-монопольной синергии. Представленные примеры построения прикладных моделей и анализ получаемых количественных оценок показывают возможности предлагаемой методологии, которая аккумулирует и развивает накопленный в теории и частично освоенный мировой практикой опыт решения задач нормативной идентификации при различных их постановках. Эти результаты могут быть использованы в целях развития российской системы госрегулирования в рассматриваемой сфере и повышения обоснованности принимаемых управленческих решений по структурным преобразованиям. Итоги представленных исследований и разработок могут стать основой для формирования пакета предложений по использованию создаваемого теоретико-прикладного модельного инструментария в современных информационно-аналитических системах обоснования и поддержки принимаемых управленческих решений по развитию сетевых инфраструктурных объектов.

Литература

1. *Белоусова Н.И., Бушанский С.П., Васильева Е.М.* Моделирование оценок перегруженности транспортной сети и вариантов ее развития // Экономический анализ: теория и практика. 2013. № 48 (351). С. 16-23.
2. *Белоусова Н.И., Васильева Е.М.* Диагностика свойств сетевых инфраструктурных технологий

в реформируемой системе госрегулирования российских естественных монополий // Российский экономический журнал. 2019. № 3. С.25-35. doi: 10.33983/0130-9757-2019-3-25-35.
3. *Белоусова Н.И., Бушанский С.П., Васильева Е.М., Васильев В.Б.* Естественно-монопольные свойства транспортных сетей: многопродуктовые модели диагностики // Аудит и финансовый анализ. 2018. № 2. С.129–147.
4. *Виленский П.Л., Лившиц В.Н., Смоляк С.А.* Оценка эффективности инвестиционных проектов: Теория и практика. 5-ое изд. перераб. и доп. М.: Поли Принт Сервис. 2015. С.1300.
5. *Baumol W.J., Panzar J.C., Willig R.D.* Contestable Markets and the Theory of Industry Structure. N.Y.: HBJ. 1982. 497 p.
6. *Белоусова Н.И., Васильева Е.М., Лившиц В.Н.* Модели идентификации естественных монополий и государственного управления ими (возможности расширения классической теории) // Экономика и математические методы. 2012. № 48(3). С. 64-78.
7. *Pulley L.B.* A composite cost function for multiproduct firms with an application to economies of scope in banking // The Review of Economics and Statistics. 1992. V. 74. P. 221-230.
8. *Roller L.H.* Proper quadratic cost functions with an application to the Bell System // The Review of Economics and Statistics. 1990. V. 72. P. 202-210.
9. *Gasmi F., Laffont J.-J., Sharkey W.* The natural monopoly test reconsidered: an engineering process – based approach to empirical analysis in telecommunications // International J. of Industrial Organization. 2002. V. 20. P. 435–459.
10. *Kantorovich L.V.* (1939). Mathematical methods in the organization and planning of production. Publication house of the Leningrad University; Translated in: Management Science. 1960. N 6. P. 366-422.
11. Введение в математическое моделирование транспортных потоков: учебное пособие / А.В. Гасников и др. Под ред. А.В. Гасникова. М.: МЦНМО. 2013.
12. *Steenbrink Peter A.* Optimization of Transport Networks. L., N.Y., Sydney, Toronto/ Ed. JohnWiley&Sons, 1974 (Стенбринк П. Оптимизация транспортных сетей. Пер. с англ. М.: Транспорт, 1981).
13. *Bushansky S.P., Vasilieva E.M., Livchits V.N.* Optimization Transport Computations. In: Advances in Economics and Optimization: collected scientific studies dedicated to the memory of L.V.Kantorovich/ David Wing-kay Yeung ed. N.Y.: Nova Science Publishers Inc. 2014. P.19-36.
14. *Левит Б.Ю., Лившиц В.Н.* Нелинейные сетевые транспортные задачи. М.: Транспорт. 1972. С.144.
15. *Лившиц В.Н.* О применении математических методов при выборе оптимальной схемы развития транспортной сети. Труды Первой Всесоюзной конференции по оптимизации и моделированию транспортных сетей. Киев: Изд-во Института кибернетики АН УССР. 1967. С. 45-64.
16. *Белоусова Н.И., Васильева Е.М., Лившиц В.Н., Миронова И.А.* Концептуальные основы моделирования оценки системной эффективности развития сетевой транспортной инфраструктуры // Труды ИСА РАН. 2021. № 71(1). С. 10–21. doi: 10.14357/20790279210102.
17. *Бушанский С.П.* Неэффективность дорожных концессий в России: исключение и правило // Журнал Новой экономической ассоциации. 2021. № 2(50). С. 97-118.
18. *Белоусова Н.И., Бушанский С.П., Васильева Е.М.* О направлениях вариативного анализа нормативной идентификации естественно-монопольных свойств региональной транспортной сети / Стратегическое планирование и развитие предприятий: материалы XXIV Всероссийского симпозиума. Москва, 11–12 апреля 2023 г. / под ред. чл.-корр. РАН Г.Б. Клейнера. М.: ЦЭМИ РАН. 2023. С.304-309. doi: 10.34706/978-5-8211-0814-2-s2-09. EDN: UCZPRR.

Белоусова Наталия Ивановна. Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» РАН, г. Москва. Ведущий научный сотрудник. Доктор экономических наук. Область научных интересов: естественные монополии, методология системной оценки. E-mail: natabel.52@mail.ru; belousova@isa.ru

Васильева Елена Михайловна. Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» РАН, г. Москва. Ведущий научный сотрудник. Доктор экономических наук. Область научных интересов: оптимизация транспортной сети, идентификация естественной монополии. E-mail: vas10081946@gmail.com; vasileva@isa.ru (Ответственный за переписку).

Лившиц Вениамин Наумович. Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» РАН, г. Москва. Главный научный сотрудник. Доктор экономических наук, профессор. Область научных интересов: анализ и оценка эффективности инвестиционных проектов. E-mail: livchits@isa.ru

Миронова Инна Алексеевна. Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» РАН, г. Москва. Главный специалист. Кандидат экономических наук. Область научных интересов: теория и практика оценки эффективности инвестиционных проектов. E-mail: makbat@mail.ru

Бушанский Сергей Петрович. Центральный экономико-математический институт РАН, г. Москва. Старший научный сотрудник. Кандидат экономических наук. Область научных интересов: разработка методов построения оптимальных транспортных сетей, исследование проблем обоснования крупных инфраструктурных проектов, моделирование процессов принятия решений в системе государственного проектирования. E-mail: ergr190@rambler.ru

Modeling the efficiency system assessment for the development of network transport infrastructure

N.I. Belousova[I], S.P. Bushansky[II], E.M. Vasilieva[I], V.N. Livchits[I], I.A. Mironova[I]

[I] Federal Research Center “Computer Science and Control” of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

[II] Central Economics and Mathematics Institute of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Abstract. The purpose of the article is modeling the efficiency system assessment of network infrastructure subsystems development and identifying their natural monopoly properties. Methods and models of natural monopoly theory, nonlinear network transport projection and variation analysis are used. The spectrum of models for identifying the natural monopoly properties of the network transport infrastructure, corresponding to changes in the parameters of the total cost functions, has been researched. Applying to modeling the development of fragments of regional transport network, computational algorithms for efficiency system assessment have been elaborated. The influence of the effect of natural monopoly synergy as the sphere of positive values of the economy of scope based on subadditivity testing for cost function has been specified. The results of calculations are presented related both specifying the assessment methodology under diagnostics of natural monopoly properties (primarily using special extensions of algorithms for finding the optimal transportation technology), and with modifications of computational experiments and quantitative assessment with variations of the factors.
Keywords: *network transport infrastructure, system efficiency, natural monopoly indicators/ technology determinants, formulation of the diagnostics problem, testing the subadditivity of cost function, extra-urban road network, system and user equilibrium, variation of rate of return, cost elasticity*
DOI: 10.14357/20790279230308

References

1. *Belousova N.I., Bushansky S.P., Vasilieva E.M.* Modeling assessment of transport network congestion and options for its development. Ekonomicheskij analiz: teoriya i praktika. 2013; 48 (351):16-23 (In Russ).
2. *Belousova N.I., Vasilieva E.M.* Diagnostics of network infrastructure technologies properties under reforming the system of Russian natural monopolies state regulation. Rossijskij ekonomicheskij zhurnal. 2019; 3: 25-35. (In Russ.). doi: 10.33983/0130-9757-2019-3-25-35.
3. *Belousova N.I., Bushansky S.P., Vasilieva E.M., Vasiliev V.B.* Natural monopoly properties of transport networks: multiproduct models of diagnostics. Audit i finansovyj analiz. 2018; 2:129–147. (In Russ.).
4. *Vilensky P.L., Livchits V.N., Smoljak S.A.* Efficiency Assessment of Investment P4rojects: Theory and Practice. 5th ed. Moscow: Poly Print Service; 2015. 1300 p. (In Russ.).
5. *Baumol W.J., Panzar J.C., Willig R.D.* Contestable Markets and the Theory of Industry Structure. N.Y.: HBJ; 1982. 497 p.
6. *Belousova N.I., Vasilieva E.M., Livchits V.N.* The models of natural monopolies identification and state regulation (possibilities of extension of classical theory). Ekonomika i matematicheskie metody. 2012; 48. (3):64-78 (In Russ.).
7. *Pulley L.B.* A composite cost function for multiproduct firms with an application to economies of

scope in banking. The Review of Economics and Statistics. 1992; 74: 221-230.
8. *Roller L.H.* Proper quadratic cost functions with an application to the Bell System. The Review of Economics and Statistics. 1990: 72: 202-210.
9. *Gasmi F., Laffont J.-J., Sharkey W.* The natural monopoly test reconsidered: an engineering process – based approach to empirical analysis in telecommunications. International J. of Industrial Organization. 2002; 20: 435–459.
10. *Kantorovich L.V.* (1939). Mathematical methods in the organization and planning of production. Publication house of the Leningrad University; Translated in: Management Science. 1960; 6: 366-422.
11. Introduction to Mathematical Modeling of Traffic Flows / A.V.Gasnikov etc. / Gasnikov A.V. (ed.). Moscow: MCNMO; 2013. (In Russ.).
12. *Steenbrink Peter A.* Optimization of Transport Networks. L., N.Y., Sydney, Toronto/ Ed. JohnWiley&Sons, 1974.
13. *Bushansky S.P., Vasilieva E.M., Livchits V.N.* Optimization Transport Computations. In: Advances in Economics and Optimization: collected scientific studies dedicated to the memory of L.V.Kantorovich/ David Wing-kay Yeung ed. (Economic issues, problems and perspectives). Nova Science Publishers Inc. N.Y. 2014. P.19-36.
14. *Levit B.U., Livchits V.N.* Nonlinear Network Transport Problems. Moscow: Transport; 1972. 144 c. (In Russ.).
15. *Livchits V.N.* On the application of mathematical methods under choosing the optimal scheme for transport network development. In: Proceedings of the First All-Union Conference on optimization and modeling of transport networks. Kiev: Publishing House of the Institute of Cybernetics of AC USSR. 1967. P. 45-64. (in Russ.).
16. *Belousova N.I., Vasilieva E.M., Livchits V.N., Mironova I.A.* Conceptual basis of modeling the system efficiency for network transport infrastructure development. Trudy Instituta Sistemnogo Analiza Rossiyskoy Akademii Nauk (ISA RAN). 2021; 71(1):10–21 (In Russ.). doi: 10.14357/20790279210102.
17. *Bushansky S.P.* Inefficiency of road concessions in Russia: exceptions and rules ZHurnal Novoj ekonomicheskoj associacii.2021; 2(50): 97-118. (In Russ.).
18. *Belousova N.I., Bushansky S.P., Vasilieva E.M.* On the directions of normative identification of natural monopoly properties of regional transport network. In: Kleiner G.B. (ed.). Strategy planning and development of enterprises. Proceedings of the XXIV All-Union Symposium. 11-12 April 2023. Moscow: CEMI RAS. 2023. P.304-309. (in Russ.). doi: 10.34706/978-5-8211-0814-2-s2-09. EDN: UCZPRR.

Belousova N. Leading Researcher, Doctor (Economy), Federal Research Center "Computer Science and Control" of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia. E-mail: natabel.52@mail.ru; belousova@isa.ru

Vasilieva E. Leading Researcher, Doctor (Economy), Federal Research Center "Computer Science and Control" of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia. E-mail: vas10081946@gmail.com; vasileva@isa.ru

Livchits V. Chief Research Officer, Doctor (Economy), Professor, Federal Research Center "Computer Science and Control" of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia. E-mail: livchits@isa.ru

Mironova I. Chief Specialist, PhD in Economics, Federal Research Center "Computer Science and Control" of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia. E-mail: makbat@mail.ru

Bushansky S. Phd (Economics), Senior Researcher, Central Economics and Mathematics Institute of Russian Academy of Sciences,, Moscow, Russia. E-mail: dbd-s@yandex.ru

Неопределенность и риски реализации управленческих решений в условиях латентности и лоббизма*

В.Н. Лексин

Федеральное государственное учреждение «Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук», г. Москва, Россия

Аннотация. Исследованы причины и следствия роста распространенности латентных технологий и лоббирования как типичных компонентов современного государственного и корпоративного управления. Показано, что оперативно решая насущные проблемы политики и бизнеса, латентность и лоббизм способствуют формированию новых временно скрытных подсистем со своими элементами и связями, способных существенно изменить публично обоснованные приоритеты и ресурсные возможности принятия решений. Рассмотрены типы воздействий латентности и лоббизма на управленческие решения, в том числе в чрезвычайных ситуациях.

Ключевые слова: *неопределенность, риски, латентность, лоббизм.*

DOI: 10.14357/20790279230309

Введение

В предыдущих публикациях о проблематике неопределенности и рисков показано, что последние, являясь имманентными свойствами любых систем и управленческих решений, стимулируются множеством внутрисистемных и внешних обстоятельств [1,2]. К числу таких обстоятельств следует отнести латентные механизмы и лоббизм, поскольку любые решения (от индивидуально-бытовых и корпоративно-хозяйственных до государственных) есть совокупный результат как нескрываемых (публично обоснованных и воспринимаемых предсказуемыми) действий, так и по разным причинам скрытных (латентных) или относительно откровенных (лоббистских) продвижений частных и иных намерений или интересов. Эта до поры (а иногда и навсегда) невидимая часть управления многократно увеличивает неопределенность и риски в реализации конкретных решений , особенно долгосрочных стратегий и политик корпораций и государств.

Латентные воздействия и лоббизм известны давно, а в наше время они фактически стали нормой хозяйственной и политической жизни и одним из популярных сюжетов публицистики. И для этого есть множество поводов. Они будут далее рассмотрены в статье, а здесь назову лишь легитимную деятельность специально уполномоченных сотрудников крупных коммерческих структур для взаимодействия с властью[1], вбросы в публичное пространство компроматов, различные виды коррупции, узаконенное и негласное лоббирование, использование «мягкой силы» для неявных воздействий на объекты своих потенциальных интересов и т.п. И каждое из таких действий вносит свою долю неопределенности и рисков в и без того переполненную ими действительность.

Исследования сути латентных технологий и лоббирования в аспекте связанных с ними роста неопределенности и рисков проводятся крайне редко. Не претендуя на всестороннее раскрытие этой темы, в предлагаемой читателю статье поставлена задача системного осмысления феноменальной распространенности латентных технологий и лоббирования. Для этого исследована сущность латентности как доминирующей составляющей современной управленческой практики, охарактеризована роль лоббизма в усилении ее неопределенности и рисков, представлено обоснование допустимости латентности и лоббизма в чрезвычайных обстоятельствах и показана естественность использования латентности и лоббизма в обстановке тотальной турбулентности политической и экономической жизни.

* Исследование выполнено по проекту «Развитие методов и информационных технологий системного анализа и управления в условиях неопределенности и риска»; научный руководитель д.т.н., академик РАН Ю.С. Попков.

[1] Они разрабатывают и реализуют так называемые GR-технологии (Government Relations, дословно: взаимодействие с государственной властью).

1. Латентная составляющая современной управленческой практики

Латентные (тайные, скрытные, неафишированные) воздействия на управленческие решения в общем случае есть часто используемый путь выхода выразителей конкретных интересов на тех, кто принимает такие решения и обладает для этого соответствующими властными полномочиями и ресурсами. При этом латентность, выделяя такое продвижение интересов из многих других, не жестко их разграничивает, а в ряде случаев (например, при использовании лоббизма) является их спутником, своего рода «активной тенью». Изучение латентности весьма специфично, поскольку скрытые намерения можно установить (исключая соблазны и терминологию конспирологии) лишь приблизительно и вариативно, и это же относится к оценке каждого их результата. Использование латентных технологий резко активизирует и расширяет имманентный потенциал неопределенности и рисков в предмете управления и в принимаемых решениях в целом, поскольку временно скрытые новые подсистемы (со своими элементами и связями) способны существенно изменить публично обоснованные приоритеты принятия решений. В то же время, использование латентных технологий менее всего следует считать чем-то абсолютно неприемлемым, а в ряде случаев латентность просто необходима. Так, значительная часть системы управления и принимаемых решений становится вычлененной из публичного пространства по причинам государственной или корпоративной тайны (конфиденциальные переговоры, подготавливаемые военно-оборонные действия, защита разрабатываемых объектов интеллектуальной собственности, организация разведывательной и контрразведывательной деятельности и т.п.).

В последние годы о латентности как типичном условии разработки и принятия управленческих решений (в первую очередь, политического характера) пишут известные отечественные ученые. Они представляют суть латентных воздействий на управление как «игру теней на лике власти», успешно преодолевают расхождения в методологии познания политики в эпоху неопределенности, анализируют коррупцию как фактор развития латентных конфликтов, обращают внимание на феномен латентных технологий информационных войн и двойных стандартов в контексте социокультурных угроз и рисков в современной России и реалий нового облика мирового порядка [3-10]. Латентные технологии, как уже отмечалось, присущи управлению как таковому, и в этом отношении показательна работа Т.А.Журавлёвой, исследовавшей практику функционирования латентных политико-административных сетей на региональном уровне и выявившей постоянное возрастание их роли, формирующее иллюзию «захвата власти». Одновременно доказано, что «при корректном определении границ и структуры такой сети существует возможность отделить публичное функционирование от латентного, а также сформулировать предпочтительные направления для коррекции текущей стратегии деятельности как отдельных акторов, так и сети в целом»[11]. Из новейших публикаций особый интерес представляют работы А.Е. Конькова, – научного сотрудника и преподавателя факультета политологии МГУ им. М.В. Ломоносова, в которых представлен аргументированный анализ генезиса и последствий «симбиоза публичных и латентных» явлений в государственном управлении России и зарубежных стран [12, 13].

Известнейшим видом латентных технологий в управлении является коррупция. В России в состав этого понятия в соответствии с Федеральным законом от 25.12.2008 № 273-ФЗ (ред. от 29.12.2022) «О противодействии коррупции» включены «злоупотребление служебным положением и полномочиями, дача и получение взятки, коммерческий подкуп либо иное незаконное использование физическим лицом своего должностного положения вопреки законным интересам общества и государства в целях получения выгоды в виде денег, ценностей, иного имущества или услуг имущественного характера, иных имущественных прав для себя или для третьих лиц либо незаконное предоставление такой выгоды указанному лицу другими физическими лицами, а так же совершение перечисленных деяний от имени или в интересах юридического лица». Определение – практически исчерпывающее суть того, что можно назвать противозаконной «приватизаций общественной или корпоративной политики». Латентность коррупции – обязательное ее свойство: ведь обнаружение коррупции как явного рычага управления может привести к обвинительному приговору.

В реальной жизни коррупцию оправдывают тем, что она часто становится единственным способом скорейшего и гарантированного решения насущных хозяйственных проблем, большинство которых можно было бы реализовать по закону; управляющие же органы с этим медлят либо сознательно, либо по невниманию к таким проблемам. Коррупция становится мультипликатором экономического развития и, одновременно, его фактическим искривлением, естественной базой рисков и неопределенностей. Действительно, обеспечивая

преференции взяткодателю, коррупция делает неопределенным и рискованным решение других, публично обоснованных корпоративных или административно-политических задач. Массовый характер коррупции приводит к тому же к повышенной рискованности отечественных и зарубежных инвестиций в потенциально выгодные проекты.

Очевидные признаки латентности присущи технологиям так называемой «мягкой силы», – особой формы скрываемого влияния на принимаемые решения с помощью долгосрочных и весьма изощренных воздействий, основанных на манипулировании общественным сознанием неявно управляемой системы без ее явного принуждения («жесткой силы») к реализации чуждых интересов. Понятие «мягкая сила» (soft power), предложенное в 90-х годах XX века американским политологом Джозефом Наем, можно перевести и как «гибкая власть» [18]. Одним из каналов воздействия этой «силы» на управляемую систему (или на лиц, принимающих решение) является пропаганда, чаще всего имеющая негативную коннотацию, но не становящаяся при этом менее действенной. Примером может служить использование пропагандистских технологий «мягкой силы» в организации «цветных революций» и иных политических конфликтов [19].Опасности такого рода зафиксированы в утвержденных Президентом РФ в 2013 г. и в 2016 г. Концепциях внешней политики Российской Федерации, и в выступлениях политических лидеров разных стран, оценивающих «гибкую силу» как сложившийся латентный механизм невоенных воздействий, эффективность которых неимоверно возросла в связи с развитием информационно-коммуникативных возможностей[20]. Практически все испытывающие воздействия сторонней «мягкой силы» отмечают в числе ее результатов усиление неопределенности и рисков в проведении государственной политики.

2. Лоббизм: неопределенность и риски управления

Лоббизм, вклад которого в массив неопределенностей и рисков управления не менее весом, чем только что рассмотренные латентные воздействия , по сравнению с ними изучен и описан намного детальней. Среди сотен книг и статей по проблемам лоббизма, изданных в России и за рубежом за последние 30 лет, представляются наиболее отвечающими спектру различных взглядов на суть и национальные особенности этого явления следующие публикации. Это, прежде всего труды о лоббизме как об устойчивом механизме политической культуры [21-25], об американском лоббизме образца XXI в. [26-29], о специфике лоббистских практик в странах ЕС [30-32] и, наконец, об особенностях взаимодействий бизнеса в власти в современной России [33-36]. Подробно «лоббизм по-русски» и связанные с этим коллизии, возникающие «между бизнесом и властью», изложены в книге И.В. Толмачевой, основу которой составили беседы с успешными отечественными бизнесменами о механизмах реализации экономических проектов [37]. Особый интерес представляют обсуждения научно-практических аспектов лоббизма в ходе защит многочисленных диссертаций по юридическим и политологическим наукам. Просмотренные в ходе подготовки этой статьи диссертационные исследования служат примером изучения внутренне противоречивых феноменов узаконенного и латентного лоббизма. Таковы докторские диссертации А.Э.Бинецкого, Л.Е. Ильичевой и И.С. Семененко, кандидатские диссертации Е.В.Бердниковой А.С.Бобровского, Е.В.Зверева, А.А.Сучковой, А.Н.Тимченко, П.П.Шелища и др. В большинстве из них рассматриваются риски лоббирования , а диссертация Д.С.Белова полностью посвящена политическим рискам лоббирования деятельности крупных российских корпораций в органах власти.

Актуализация проблем лоббирования стала наиболее очевидной в период усиления зависимости государственных политических решений от интересов крупных транснациональных и системообразующих национальных корпораций, а власти как таковой – от интересов бизнеса. Именно лоббизм превращает любую власть в средство реализации таких интересов. Наличие множества заинтересованных сторон в разного рода преференциях или в ограничительных мерах (по отношению к конкурентам) создают, с одной стороны, возникновение новых неопределенностей и рисков управления, и, с другой, появление внешне случайных управленческих решений. Исследователи неизменно фиксируют рост потенциала возникновения рисков, как для объектов лоббистской деятельности, так и для субъектов ее воздействия. Это и определяет необходимость управления самой лоббистской деятельностью в целях минимизации таких неопределенностей и рисков в политической, финансово-экономической, социальной, инфраструктурной и природоохранной сферах. Бесспорной задачей такого управления становится трудно достижимое очищение лоббизма от свойственной ему коррупционно-криминальной составляющей.

Масштабность и конкретные проявления триады «лоббизм-неопределенность-риски» столь велики, а механизмы ее функционирования настоль-

ко латентны, что их количественное выражение становится особой методологической и информационной проблемой. Некоторое представление об этом могут дать диссертационное исследование П.А. Толстых « Лоббизм в Государственной Думе Федерального Собрания Российской Федерации: структура, технологии, перспективы легитимации: структура, технологии, перспективы легитимации» и исследование почти такого же названия, проведенное «Трансперенси Интернешнл – Р» по данным на 1 января 2019 г.. В диссертации П.А.Толстых [38] назван основной круг лоббистов, сохраняющих свои позиции до настоящего времени. Это представители отраслевых лобби (на примере аграрного), естественные монополии (на примере РАО «ЕЭС России»), финансово-промышленные группы (на примере некогда крупнейшей корпорации «Юкос»), деловые союзы и ассоциации (на примере Союза пивоваров России), религиозные организации (на примере Русской Православной Церкви), представители общественно-политического лоббизма (на примере общественных и прочих некоммерческих организаций, созданных для защиты интересов общественности, в том числе общества инвалидов, ветеранов и пр.), профсоюзы, отстаивающие интересы наемного труда, экологические организации, представители регионального лобби и иностранного лобби[2]. Рассмотрен и лоббизм государственных органов власти (на примере лоббизма бывшего Министерства РФ по атомной энергетике с целью принятия законов о ввозе в Россию из иностранных государств отработанного ядерного топлива), лоббизм ассоциаций, деловых клубов и отраслевых союзов (на примере ведущих деловых ассоциаций России). Основной задачей деятельности всех этих лоббистских групп становится принятие нужного законодательства или поправок к нему (включая федеральный бюджет РФ) и использование ресурсных возможностей федеральных целевых программ. Используются и такие непрямые формы лоббирования как способствование появлению различных постановлений или заявлений, организация депутатского, фракционного или парламентского запроса, парламентских слушаний, конференций, пресс-конференций с выступлением депутатов в поддержку интересов лоббиста и т.п.

В докладе «Трансперенси Интернешнл – Р» [39], российская практика лоббирования сравнивается с организацией этой деятельности в странах, где она осуществляется в рамках специального законодательства и соответствующей правовой традиции. В мире существует несколько практик законодательного регулирования лоббистской деятельности, из которых наиболее полно описана ситуация в США, где соответствующий федеральный закон «Federal Regulation of Lobbying Act (FRLA)» был принят в 1946 г., а в 1995 г. – закон о раскрытии лоббистской деятельности «Lobbying Disclosure Act (LDA)». Кроме того в США лоббизм на федеральном уровне регулируется Налоговым кодексом, «Законом о регистрации иностранных агентов Foreign Agents Registration Act (FARA)» и федеральным законом о прозрачности и отчетности при осуществлении лоббистской деятельности» (2006 г.). Нормативные акты о лоббизме существуют на уровне штатов, а иногда и на уровне крупных городов. Все они предписывают обязательную регистрацию лоббистов в особом реестре, который на федеральном уровне ведет Министерство юстиции. Лоббист также обязан встать на учет у секретаря Сената и клерка Палаты представителей США. Лоббистом в США может быть как физическое, так и юридическое лицо, а организация признается лоббистской, если намерена тратить ежеквартально более 10 тыс. долл. на продвижение интересов своих клиентов. Сами же лоббисты обязаны регулярно подавать отчет с указанием объекта и предмета лоббирования, вознаграждения, финансовых показателей, заказчика лоббирования (если это компания, то раскрываются данные об акционерах).

Авторы доклада подчеркивают, что в связи с отсутствием в России правового регулирования лоббизма, различные группы влияния используют технологии продвижения на ключевые позиции своих представителей в те органы власти (в том числе, в нижнюю палату Федерального собрания), где принимаются значимые для них решения. При этом депутаты Государственной Думы часто выступают одновременно как объектами, так и субъектами лоббирования, они зачастую связаны с конкретными коммерческими или некоммерческими организациями, финансово-промышленными группами, государственными или муниципальными органами власти, чьи интересы затрагивают вносимые ими законопроекты. «Трансперенси Интернешнл – Р» приводит данные о том, что в 2017 г. кампания по принятию нужного закона при наличии противников оценивалась в 1 млн долларов США и выше, а в случае легализации лоббизма рынок, по мнению экспертов, мог бы составить 10-20 млрд руб. в год. В том же документе приводится мнение одного из видных депутатов Государственной Думы о том, что повлиять на принятие того или иного решения после поступления нор-

[2] П.А.Толстых проанализирован страновый и корпоративный иностранный лоббизм.

мативно-правового акта в этот орган невозможно, поскольку все необходимые коммуникации совершаются до появления документа. Это еще одно авторитетное свидетельство о связи лоббизма с неопределенностями и рисками в управлении.

3. Допустимость латентности и лоббизма в чрезвычайных обстоятельствах

Наряду с усилением неопределенности и рисков управления в условиях латентности и лоббизма, эти явления в ряде случаев могут стать необходимыми или, по крайней мере, приемлемыми. Ранее указывалось, что, например, латентность является обязательным условием управления в организации разведывательной и контрразведывательной деятельности. Однако наиболее полно (практически по всем предметам государственного и муниципального управления) технологии латентности и лоббизма задействуются в так называемых чрезвычайных обстоятельствах – форс-мажорных ситуациях, по определению связанных (и генетически, и по мере развития) с максимальными неопределенностями и рисками. В России законодательно закреплен и перечень таких ситуаций, и типовые требования к организации адекватного им управления.

Практически всем гражданам России знакомо (чаще всего на бытовом уровне) понятие «чрезвычайная ситуация», которое имеет нормативное содержание, зафиксированное в федеральном законе от 21.12.1994 г. № 68-ФЗ «О защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера»[3].В соответствии с ним «чрезвычайная ситуация – это обстановка на определенной территории, сложившаяся в результате аварии, опасного природного явления, катастрофы, распространения заболевания, представляющего опасность для окружающих, стихийного или иного бедствия, которые могут повлечь или повлекли за собой человеческие жертвы, ущерб здоровью людей или окружающей среде, значительные материальные потери и нарушение условий жизнедеятельности людей». Предотвращение таких ситуаций трактуется в том же законе как– «комплекс мероприятий, проводимых заблаговременно и направленных на максимально возможное уменьшение риска возникновения чрезвычайных ситуаций, а также на сохранение здоровья людей, снижение размеров ущерба окружающей среде и материальных потерь в случае их возникновения», а ликвидация чрезвычайных ситуаций – как «аварийно-спасательные и другие неотложные работы, проводимые при возникновении чрезвычайных ситуаций и направленные, в том числе, на локализацию зон чрезвычайных ситуаций и прекращение действия характерных для них опасных факторов».

Чрезвычайные ситуации, связанные с проявлением стихийных сил природы (землетрясения, вулканы, цунами, бури и т.д.), с авариями на технических объектах (пожары, взрывы, обрушение зданий, выброс радиоактивных веществ и т.д.), с аномальными изменениями биосферы и природной среды, с распространением инфекционных заболеваний людей, животных и поражением сельскохозяйственных растений (эпидемии, эпизоотии, эпифитотии и т.д.) и другие согласно классификациям, утверждаемым постановлениями Правительства РФ, насчитывают сотни наименований. Это отражает реалии современной повседневности, когда люди на тех или иных территориях и объектах практически постоянно находятся в обстановке чрезвычайных ситуаций. Таковы, например, катастрофы и аварии товарных и пассажирских поездов (в том числе, метрополитенов), речных и морских грузовых и пассажирских судов, авиакатастрофы, аварии на автодорогах, на мостах, железнодорожных переездах и в тоннелях; аварии на магистральных трубопроводах. Исключительно разнообразны чрезвычайные ситуации, сопровождающихся выбросами опасных веществ в окружающую среду. Это, например, аварии на атомных электростанциях, утечки радиоактивных газов на предприятиях ядерно-топливного цикла за пределы санитарно-защитной зоны, аварии на атомных судах с радиоактивным загрязнением акватории порта и прибрежной территории, аварии на ядерных установках научно-исследовательских центров с радиоактивным загрязнением территории, аварийные ситуации во время промышленных и испытательных ядерных взрывов, падение летательных аппаратов с ядерными энергетическими устройствами на борту с последующим радиоактивным загрязнением местности, аварии на транспорте, перевозящем радиоактивные препараты, аварии на химически опасных объектах с выбросом (утечкой) в окружающую среду сильнодействующих ядовитых веществ и бактериологических средств и биологических веществ в концентрациях, превышающих допустимые значения и многие другие. И каждая чрезвычайная ситуация сопряжена с массой неопределенностей и рисков, требует специально разработанной технологии управленческого и материально-технического ре-

[3] Редакция от 04.11.2022 г. учитывает дополнения и изменения, в разное время внесенные тридцатью федеральными законами, в том числе, от 04.12.2006 г. № 206-ФЗ, от 30.12.2008г. № 309-ФЗ, от 01.04.2012г. № 23-ФЗ от 02.07.2013г. №158-ФЗ, от 01.04.2020 г. № 98-ФЗ и от 04.11.2022 г. № 417-ФЗ.

агирования[4]. Неожиданность возникновения большинства таких ситуаций и срочность всех связанных с ними работ предопределяют такое сочетание неопределенностей и рисков, что помимо навыков стандартных действий по всему перечню предписанных инструкциями работ, неизбежно возникает необходимость в инициативных, зачастую особо рискованных решениях.

Наиболее сложным и связанным с массой неопределенности и рисков является управление в ситуации военного положения, которое в соответствии с Федеральным конституционным законом от 30 января 2002 г. № 1-ФКЗ «О военном положении» (в редакции Федеральных конституционных законов от 03.11.2010г. №6-ФКЗ, от 28.12.2010г. №8-ФКЗ и от 12.03.2014г. № 5-ФКЗ) определяется как особый правовой режим, вводимый Президентом РФ в соответствии с Конституцией РФ на территории России или в отдельных ее местностях в случае агрессии против государства или непосредственной угрозы агрессии для создания условий для ее отражения или предотвращения. Этим же федеральным законом агрессией признается применение вооруженной силы иностранным государством (группой государств) против суверенитета, политической независимости и территориальной целостности государства или каким-либо иным образом, несовместимым с Уставом ООН[5].

Специфику управления в условиях военного положения определяет его режим – комплекс экономических, политических, административных, военных и иных мер, направленных на создание условий для отражения или предотвращения агрессии. Это, прежде всего, меры военно-оборонительного характера по организации производства продукции (выполнения работ, оказания услуг) для государственных нужд, обеспечения Вооруженных Сил, других войск, воинских формирований и органов, специальных формирований, создаваемых на военное время, и для нужд населения. На территории, где введено военное положение, должно быть организовано: 1) усиление охраны общественного порядка и обеспечение общественной безопасности, охраны военных, важных государственных и специальных объектов, в т.ч. обеспечивающих жизнедеятельность населения, функционирование транспорта, коммуникаций и связи, объектов энергетики, а также объектов, представляющих повышенную опасность для жизни и здоровья людей и для окружающей природной среды с введением особого режима работы этих объектов; 2) эвакуация объектов хозяйственного, социального и культурного назначения, а также временное отселение жителей в безопасные районы с обязательным предоставлением таким жителям стационарных или временных жилых помещений; 3) введение и обеспечение особого режима въезда на территорию, на которой введено военное положение, и выезда с нее, а также ограничение свободы передвижения по ней.

Второй блок мер военного положения ограничивает некоторые декларированные в Конституции РФ права и свободы. Это, например: 1) запрещение или ограничение выбора места пребывания либо места жительства, а так же запрещение или ограничение выезда граждан за пределы России; 2) приостановление деятельности политических партий, других общественных объединений, религиозных объединений, ведущих пропаганду и (или) агитацию, а равно иную деятельность, подрывающую в условиях военного положения оборону и безопасность страны; 3) запрещение проведения референдумов и выборов, запрещение или ограничение проведения собраний, митингов и демонстраций, шествий и пикетирования, а также иных массовых мероприятий; запрещение забастовок и иных способов приостановления или прекращения деятельности организаций; 4) запрещение нахождения граждан на улицах и в иных общественных местах в определенное время суток и предоставление органам исполнительной власти и военного управления права осуществлять проверку документов, удостоверяющих личность граждан, личный досмотр, досмотр их вещей, жилища и транспортных средств, а по основаниям, установленным федеральным законом, – задержание граждан и транспортных средств; 5) привлечение граждан к выполнению работ для нужд обороны, ликвидации последствий применения противником оружия,

[4] Примерами новейших регламентаций соответствующих действий могут служить приказы МЧС России № 631 от 01.09.2020г. «Об утверждении Методики оценки ущерба от чрезвычайных ситуаций» и от 05.07.2021г. № 429, установивший критерии отнесения события к чрезвычайной ситуации природного или техногенного характера.

[5] Актами агрессии считаются: 1) вторжение или нападение вооруженных сил иностранного государства (группы государств) на территорию России, любая военная оккупация территории страны, либо любая ее аннексия с применением вооруженной силы; 2) бомбардировка вооруженными силами иностранного государства (группы государств) территории России или применение против неё любого оружия; 3) блокада портов или берегов России вооруженными силами иностранного государства (группы государств); 4) нападение вооруженных сил иностранного государства (группы государств) на Вооруженные Силы России или другие войска независимо от места их дислокации; 5) действия иностранного государства (группы государств), позволяющего (позволяющих) использовать свою территорию другому государству (группе государств) для совершения акта агрессии против Российской Федерации и 6) засылка иностранным государством (группой государств) или от имени иностранного государства (группы государств) вооруженных банд, групп, иррегулярных сил или наемников, которые осуществляют акты применения вооруженной силы против Российской Федерации, равносильные указанным актам агрессии.

восстановлению поврежденных (разрушенных) объектов экономики, систем жизнеобеспечения и военных объектов, а также к участию в борьбе с пожарами, эпидемиями и эпизоотиями; 6) изъятие в соответствии с федеральными законами необходимого для нужд обороны имущества у организаций и граждан с последующей выплатой государством стоимости изъятого имущества; 7) запрещение продажи (и изъятие наличного) оружия, боеприпасов, взрывчатых и ядовитых веществ, установление особого режима оборота лекарственных средств и препаратов, содержащих наркотические и иные сильнодействующие вещества, спиртных напитков; 8) введение военной цензуры за почтовыми отправлениями и сообщениями, передаваемыми с помощью телекоммуникационных систем, а также контроля за телефонными переговорами, создание органов цензуры, непосредственно занимающихся указанными вопросами. Следует отметить также, что на территории, где введено военное положение, реализуются программы интернирования (изоляции) граждан иностранного государства, воюющего с Россией и прекращение деятельности иностранных и международных организаций, в отношении которых получены достоверные сведения о том, что они осуществляют деятельность, направленную на подрыв обороны и безопасности страны.

Возрастание неопределенностей и рисков в период подготовки и действия военного положения связано с вполне оправданной латентностью управления и необходимостью реагирования на постоянно возникающие чрезвычайные обстоятельства, а так же с принципиально новыми организационными механизмами координации и контроля согласованности работы не только всех органов исполнительной власти, но и Вооруженных Сил РФ, других видов войск и воинских формирований. Примерами вышесказанного могут служить два недавних указа Президента РФ. Первый из них – от 19.10.2022 г. № 756 «О введении военного положения на территориях Донецкой Народной Республики, Луганской Народной Республики, Запорожской и Херсонской областей» основывается на том, что «против территориальной целостности Российской Федерации применяется вооруженная сила». Правительство РФ было должно в течение трех дней собрать и согласовать предложения Министерства обороны РФ, МВД РФ, МЧС РФ, ФСБ РФ, Федеральной службы войск национальной гвардии РФ и Главного управления специальных программ Президента РФ о мерах, применяемых на территориях, где введено военное положение. Сразу же «в целях повышения эффективности деятельности высших должностных лиц (органов исполнительной власти) субъектов РФ» был подписан указ Президента РФ от 19.10.2022 № 757 «О мерах, осуществляемых в субъектах Российской Федерации в связи с Указом Президента Российской Федерации от 19 октября 2022 г. № 756», где на территориях новых субъектов РФ в зоне «специальной военной операции» вводился «режим максимального реагирования». Этим же указом на территориях Республики Крым, Краснодарского края, Белгородской, Брянской, Воронежской, Курской, Ростовской областей и г. Севастополя устанавливался «режим среднего уровня реагирования», на территориях субъектов РФ, входящих в состав Центрального федерального округа и Южного федерального округа, за исключением ранее названных субъектов РФ – «режим уровня повышенной готовности», на всех остальных территориях субъектов РФ – «режим уровня базовой готовности». Этими нормативными актами устанавливается особая роль высшего должностного лица субъекта РФ, который обязан принимать их самостоятельно с учетом текущей ситуации и возникающих рисков на территории этого субъекта РФ. Эти руководители должны возглавлять и специально создаваемые оперативные штабы субъектов РФ из представителей территориальных «силовых органов». Не требует доказательств необходимость (и естественность) принятия большинства решений в вышеназванных ситуациях с использованием латентности и лоббизма.

Заключение

Лоббизм и латентные воздействия на принятие решений доминируют в обстановке тотальной турбулентности, генезис и суть которой были рассмотрены в предыдущей статье автора в «Трудах ИСА РАН», открывающей перечень литературы настоящей публикации. Тотальная турбулентность рассматривалась как состояние современного миропорядка, характеризующееся перманентной или периодически повторяющейся нестабильностью, амбивалентностью и неопределенностью протекания общественно-политических и социально-экономических процессов. Тотальная турбулентность – идеальная среда функционирования технологий латентности и лоббирования, а их следствия обнаруживаются лишь в виде конечных результатов политических, хозяйственных, технологических и иных решений. Это объективная реальность, заслуживающая систематического и специально организованного исследования в структуре современного комплекса науки управления.

Литература

1. *Лексин В.Н.* Неопределенность, риски и устойчивость систем// Труды ИСА РАН. 2022. Т. 72. №1. С. 3-14.
2. *Лексин В.Н.* Новые стратегические решения о развитии российской Арктики и проблемы их реализации в условиях неопределенности и риска //Большая Евразия: развитие, безопасность, сотрудничество. Ежегодник ИНИОН РАН. 2021. Вып. 4. Т. 1. С.155-120.
3. *Соловьев А.И.* Латентные структуры управления государством или игра теней на лике власти // Полис. Политические исследования. 2011. № 5. С. 70-98.
4. *Соловьев А.И.* Политическая повестка правительства, или зачем государству общество // Полис. Политические исследования. 2019. № 4. С. 8-25.
5. *Гаман-Голутвина О.В.* Преодолевая методологические различия: споры о познании политики в эпоху неопределенности // Полис. Политические исследования. 2019. № 5. С. 19-42.
6. *Курилло В.Е.* Латентная политика. Политическая латентология. М: Изд. «Спутник+», 2013. 724 с.
7. *Епархина О.В.* Коррупция как фактор развития латентных конфликтов // Конфликтология. 2013. № 1. С. 81- 91
8. *Адамьянц Т.З.* Латентные технологии информационных войн и «двойных стандартов» // Социологические исследования. 2016. № 12. С. 123-127.
9. *Шестопал Е.Б., Селезнева А.В.* Социокультурные угрозы и риски в современной России // Социологические исследования. 2018. № 10. С. 90–99
10. Мировой порядок – время перемен / Под ред. А.И. Соловьёва, О.В. Гаман-Голутвиной. М.: Аспект Пресс. 2019. 375 с.
11. *Журавлева Т.А.* Латентные сети в публичной политике //Власть. 2016. № 6. С. 22-28
12. *Коньков А.Е.* Латентное пространство публичной политики в современном государстве: в поисках теоретической модели. М.: Аргамак-Медиа. 2021. 224 с.
13. *Коньков А.Е.* Развитие латентных механизмов политики в условиях расширения публичного пространства // Вестник МГУ им.М.В.Ломоносова, Серия 12. Политические науки. 2021. № 4. С. 22-37
14. *Епархина О.В.* Коррупция как фактор развития латентных конфликтов // Конфликтология. 2013. № 1. С. 81–91.
15. Данные судебной статистики по делам коррупционной направленности // Судебный департамент при Верховном Суде Российской Федерации [Электронный ресурс]. URL: http://www.cdep.ru/index.php?id=150 (дата обращения: 21.02.2023)
16. Показатели преступности России // Генеральная прокуратура РФ. Портал правовой статистики [Электронный ресурс]. URL: http://crimestat.ru/offenses_chart (дата обращения: 21.02.2023).
17. Россия в Индексе восприятия коррупции-2020: 30 баллов и 129-е место // Transparency International Russia [Электронный ресурс]. URL: https://transparency.org.ru/research/indeks-vospriyatiya-korruptsii/rossiya-v-indekse-vospriyatiya-korruptsii-2020-30-ballov-i-129-mesto.html (дата обращения: 21.02.2023).
18. *Най Дж.* Гибкая власть: Как добиться успеха в мировой политике. Новосибирск; ФСПИ «Тренды». 2006. С. 221.
19. *Наумов А.О.* «Мягкая сила» и «цветные» революции // Российский журнал правовых исследований. 2016. № 1. С. 73-86.
20. *Лебедева М.М.* «Мягкая сила»: понятие и подходы //Вестник МГИМО-Университета. 2017. № 3(54). С. 212-223.
21. *Janda K., Berry J.M., Goldman J.* Lobbying and policy change: who wins, who loses, and why.– Chicago; IL: Univ. Chicago Press. 2009. 360 p.
22. *Vining A.R. Shapiro D.M., Borges B.* Building the firm's political lobbying strategy.// Journal of Public Affairs. 2008. №10. P. 150-175.
23. *Фельдман П.Я.* Лоббизм: теория и практика. – М.: Горячая линия – Телеком. 2015. 120 с.
24. *Ильичева Л.Е.* Лоббизм и корпоративизм. М.: Экономика. 2002. 147 с.
25. *Бинецкий А.Э.* Лоббизм в современном мире.– М.: ТЕИС. 2004. 247 с.
26. *Mahoney C.* Lobbying success in the United States and the European Union. / // Journal of Public Policy. 2007. № 1. P. 35-56.
27. *Конышев В.Н., Сергунин А.А.* Современный предпринимательский лоббизм в США: определение, типология, особенности // Вестник Санкт-Петербургского университета. Сер. 6. Философия, культурология, политология, право, международные отношения. 2010. №. 2. С. 72-77.
28. *Костяев С.С.* Израильское лобби в бюджетном процессе США // США и Канада: экономика, политика, культура. 2010. №. 11. С. 106-115.
29. *Трапезников В.О.* Механизм реализации групповых интересов через исполнительные струк-

туры власти в США // Вопросы национальных и федеративных отношений. 2020. Т. 10. № 4 (61). С. 882-887.
30. *Taminiau Y.* Corporate lobbying in Europe, managing knowledge and information strategies // Journal of Public Affairs. 2006. №6. P.122-130.
31. *Борев А.В.* Регулирование корпоративного лоббизма в Евросоюзе. Хроники компромиссов по поддержанию полупрозрачности // Информационно-аналитическое издание «Советник президента». 2008. С. 2-10.
32. *Руденкова Д.Э.* Лоббизм в Европейском союзе: кризис легитимности. М.: ИМЭМО РАН. 2017. 120 с.
33. *Любимов А.П.* История лоббизма в России– М.: Фонд «Либеральная миссия». 2005. 208 с.
34. *Толстых П.А.* GR: Полное руководство по разработке государственно-управленческих решений, теории и практике лоббирования. М.: Перо. 2019. 1245 с.
35. *Шохин А.Н.* Бизнес и власть в России: теория и практика взаимодействия. М.: Изд. дом Высшей школы экономики. 2011. 349 с.
36. *Kashirskikh O.N., Zverev S.* The Forms and Shapes of Today's Communication as a Field, as a Discipline, and as a Social Institution in Russia: Communication Development as a Result of Society's Modernization // Strategic communications in Russia: Public relations and advertising. Routledge. 2021. Ch. 3. P. 29-45.
37. *Толмачева И.В.* Лоббизм по-русски. Между бизнесом и властью.- М.: Эксмо. 2011. 300 с.
38. *Толстых П.А.* Лоббизм в Государственной Думе Федерального Собрания Российской Федерации: структура, технологии, перспективы легитимации: структура, технологии, перспективы легитимации (дисс. канд. полит. наук). М.: РАНХиГС. 2006. 221 с.
39. Лоббизм в Государственной Думе Федерального собрания (седьмой созыв).-Барнаул; АНО «Центр антикоррупционных исследований и инициатив «Трансперенси Интернешнл – Р». 2019. 60 с.

Лексин Владимир Николаевич. Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» РАН, г. Москва. Главный научный сотрудник. Доктор экономических наук, профессор. Область научных интересов: системная диагностика общественно-политических и социально-экономических процессов. E-mail: leksinvn@yandex.ru

Uncertainty and risks of implementing management decisions in conditions of latency and lobbying

V.N. Leksin

Federal Research Center "Computer Science and Control" of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Abstract. The causes and consequences of the increasing prevalence of latent technologies and lobbying as typical components of modern state and corporate governance are investigated. It is shown that by promptly solving urgent problems of politics and business, latency and lobbying contribute to the formation of new temporarily secretive subsystems with their own elements and connections that can significantly change publicly justified priorities and resource capabilities of decision-making. The types of effects of latency and lobbying on management decisions, including in emergency situations, are considered.

Keywords: *uncertainty, risks, latency, lobbying*
DOI: 10.14357/20790279230309

References

1. *Leksin V.N.* Uncertainty, risks and stability of systems// Proceedings of the ISA RAS. 2022. Vol. 72. No. 1. P. 3-14.
2. *Leksin V.N.* New strategic decisions on the development of the Russian Arctic and the problems of their implementation in conditions of uncertainty and risk //Greater Eurasia: development, security, cooperation. Yearbook. 2021. Issue 4. RAS INION. Vol. 1. P.155-120.
3. *Soloviev A.I.* Latent structures of state governance or the play of shadows on the face of power // Polis. Political studies. 2011. No. 5. P. 70-98.

4. *Soloviev A.I.* The political agenda of the government, or why the state needs society // Polis. Political studies. 2019. No. 4. P. 8-25.
5. *Gaman-Golutvina O.V.* Overcoming methodological differences: disputes about the cognition of politics in the era of uncertainty. Policy. Political studies. 2019. No. 5. P. 19-42.
6. *Kurillo V.E.* Latent politics. Political latentology. M/: Publishing house "Sputnik+". 2013. 724 p.
7. *Diocesina O.V.* Corruption as a factor in the development of latent conflicts // Conflictology. 2013. No. 1. P. 81- 91.
8. *Adamyants T.Z.* Latent technologies of information wars and "double standards" // Sociological research. 2016. No. 12. P. 123-127.
9. *Shestopal E.B., Selezneva A.V.* Sociocultural threats and risks in modern Russia // Sociological Research. 2018. No. 10. P. 90-99.
10. World order – a time of change / Edited by A. I. Solovyov, O. V. Gaman-Golutvina. M.: Aspect Press, 2019. 375 p.
11. *Zhuravleva T.A.* Latent networks in public policy //Power. 2016. No. 6. P. 22-28
12. *Konkov A.E.* Latent space of public policy in the modern state: in search of a theoretical model / Monograph. M.: Argamak-Media. 2021. 224 p.
13. *Konkov A.E.* The development of latent policy mechanisms in the context of expanding public space // Bulletin of Lomonosov Moscow State University, Series 12. Political sciences. 2021. No. 4. P. 22-3.
14. *Diocesina O.V.* Corruption as a factor in the development of latent conflicts // Conflictology. 2013. No. 1. P. 81-91.
15. Judicial statistics on corruption-related cases // Judicial departmentpri the Supreme Court of the Russian Federation [Electronic resource]. URL: http://www.cdep.ru/index.php?id=150 (accessed: 02/21/2021)
16. Indicators of crime in Russia // The Prosecutor General's Office of the Russian Federation. Portal of legal statistics [Electronic Resource]. URL: http://crimestat.ru/offenses_chart (accessed: 02/21/2021).
17. Russia in the Corruption Perception Index 2020: 30 points and 129th place // Transparency International Russia [electronic resource]. URL: https://transparency.org.ru/research/indeks-vospriyatiya-korruptsii/rossiya-v-indekse-vospriyatiya-korruptsii-2020-30-ballov-i-129-mesto.html (accessed: 02/21/2021).
18. *Nai J.* Flexible Power: How to succeed in world politics / translated from the English by V. I. Suprun. Novosibirsk: FSPI "Trends". 2006. 221 p.
19. *Naumov A.O.* "Soft power" and "color" revolutions // Russian Journal of Legal Studies. 2016. No. 1. P. 73-86.
20. *Lebedeva M.M.* "Soft power": concept and aProaches //Bulletin of MGIMO University. 2017. No. 3(54). P. 212-223.
21. *Janda K., Berry J.M., Goldman J.* Lobbying and policy change: who wins, who loses, and why.– Chicago, IL: Univ. Chicago Press. 2009. 360 p.
22. *Vining A.R. Shapiro D.M., Borges B.* Building the firm's political lobbying strategy.// Journal of Public Affairs. 2008. No. 10. P. 150-175.
23. *Feldman, P.Ya.* Lobbying: theory and Practice. – Moscow: Hotline – Telecom. 2015. 120 p.
24. *Ilyicheva L.E.* Lobbying and corporatism / L.E. Ilyicheva. – M.: "Economics". 2002. 147 p.
25. *Binetsky A.E.* Lobbying in the modern world. / A.E. Binetsky. – M.: TEIS. 2004. 247 p.
26. *Mahoney C.* Lobbying success in the United States and the European Union. / C. Mahoney // Journal of Public Policy. 2007. № 1. P. 35-56.
27. *Konyshev V.N., Sergunin A.A.* Modern entrepreneurial lobbying in the USA: definition, typology, features // Bulletin of St. Petersburg University. Ser. 6. Philosophy, Cultural studies, political science, law, international relations. 2010. No. 2. P. 72-77.
28. *Kostyaev S.S.* The Israeli lobby in the budget process of the USA // USA and Canada: economics, politics, culture. 2010. No. 11. P. 106-115.
29. *Trapeznikov V.O.* Mechanism of realization of group interests through executive power structures in the USA // Issues of national and federal relations. 2020. Vol. 10. No. 4 (61). P. 882-887.
30. *Taminiau Y.* Incorporate lobbying in Europe, managing knowledge and information strategies // Journal of Public Affairs. 2006. No. 6. P. 122-130.
31. *Borev A.V.* Regulation of corporate lobbying in the European Union. Chronicles of compromises on maintaining translucency // Information and analytical publication "Adviser to the President". March. 2008. P. 2-10.
32. *Rudenkova D.E.* Lobbying in the European Union: the crisis of legitimacy. – Moscow: IMEMO RAS. 2017. 120 p.
33. *Lyubimov A.P.* The history of lobbying in Russia / A.P. Lyubimov. – M.: Liberal Mission Foundation. 2005. 208 p.
34. *Tolstykh P.A.* GR: A complete guide to the development of public management decisions, theory and practice of lobbying. Moscow: Publishing House "Pero". 2019. 1245 p.
35. *Shokhin A.N.* Business and power in Russia: theory and practice of interaction. Moscow: Publishing

House of the Higher School of Economics. 2011. 349 p.
36. *Kashirskikh O.N., Zverev S.* The Forms and Shapes of Today's Communication as a Field, as a Discipline, and as a Social Institution in Russia: Communication Development as a Result of Society's Modernization // Strategic communications in Russia: Public relations and advertising. Routledge. 2021. Ch. 3. P. 29-45.
37. *Tolmacheva I.V.* Lobbying in Russian. Between business and government. Moscow: Eksmo. 2011. 300 p.
38. *Tolstykh P.A.* Lobbying in the State Duma of the Federal Assembly of the Russian Federation: structure, technologies, prospects of legitimation: structure, technologies, prospects of legitimation (Diss. cand. polit. Sciences). – M.; RANEPA. 2006. 221 p.
39. Lobbying in the State Duma of the Federal Assembly (seventh convocation). –Barnaul; ANO "Center for Anti–Corruption Research and Initiatives "Transparency International – R". 2019. 60 p.

Leksin V. N. Federal Research Center "Computer Science and Control" of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia. Chief Researcher, Doctor of Economics, Professor. Number of printed works: more than 500 (including 25 monographs). Research interests: system diagnostics of socio-political and socio-economic processes. E-mail: leksinvn@yandex.ru

Системный анализ в медицине и биологии

Система «паразит-хозяин» с распределенным временем сохранения иммунитета

А.Н. Герасимов[I], Н.В. Сычева[I], А.Э. Цыганкова[II], М.И. Шпитонков[III]

[I] ФБУН «Центральный НИИ Эпидемиологии Роспотребнадзора», г. Москва, Россия
[II] ФГАОУ ВО Первый МГМУ им. И.М. Сеченова Минздрава России, г. Москва, Россия
[III] Федеральное государственное учреждение «Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук», г. Москва, Россия

Аннотация. Исследована математическая модель динамики системы «паразит-хозяин», в которой длительность сохранения иммунитета не фиксирована, а распределена и зависит от особенностей конкретного организма хозяина. Получено, что при контактном числе, большем единицы, существует единственное нетривиальное стационарное решение, являющееся глобальным аттрактором. Применительно в пандемии COVID-19 это означает, что если не будет возникать новых вариантов возбудителя, то при постоянных условиях заболеваемость стабилизируется. Исследовано влияние на скорость затухания заболеваемости малых отклонений для системы «паразит-хозяин» с наличием групп, отличающихся по длительности сохранения иммунитета. Получено, что при значениях , соответствующих COVID-19, фазовая траектория имеет вид скручивающейся спирали с длиной периода порядка года.

Ключевые слова: *система паразит-хозяин, коронавирусная инфекция, эпидемический процесс, гетерогенная популяция.*
DOI: 10.14357/20790279230310

Введение

Работы по анализу заболеваемости при помощи математических моделей стали особенно актуальны после появления новой коронавирусной инфекции с возбудителем SARS-CoV-2, так как для анализа эпидемической ситуации для нового возбудителя классический эпидемиологический анализ, основанный на статистическом анализе заболеваемости, дает слишком мало информации [1, 2, 4].

Среди многочисленных «сюрпризов», которые «преподнесло» новое заболевание COVID-19, помимо большого разнообразия клинических проявлений и послеинфекционных осложнений – быстрая потеря специфического иммунитета после вакцинации и перенесенного заболевания. Имеющиеся данные говорят о характерном времени сохранения напряженного иммунного ответа на уровне года и менее [5], причем полученные оценки сильно различаются, что свидетельствует в пользу гипотезы о значительной гетерогенности популяции, не только по восприимчивости к новой коронавирусной

инфекции, но и по длительности сохранения послеинфекционного иммунитета.

1. Методы

В базовой модели Кермака – Мак-Кендрика все члены бесконечно большой популяции хозяина идентичны по свойствам, актуальным для эпидемического процесса, и могут находиться в одном из трех состояний – восприимчивом, инфицированном и невосприимчивом (иммунном). В связи с этим текущее состояние системы описывается долей инфицированной $I(t)$ и восприимчивой $S(t)$ частей популяции, а динамика задается уравнениями:

$$\begin{aligned} \frac{dI}{dt} &= \alpha IS - \beta I \\ \frac{dS}{dt} &= -\alpha IS + \gamma\left(1 - S\right). \end{aligned} \tag{1}$$

Здесь константы α, β и γ задают интенсивность трех процессов: заражения, выздоровления и обновления, так что $1/\beta$ – средняя продолжительность заболевания (понимаемого как заразный период, вне зависимости от клинических проявлений), $1/\gamma$ – средняя продолжительность жизни для инфекций с напряженном пожизненным иммунитетом и средняя длительность сохранения специфического иммунитета для инфекций с временным иммунитетом, а отношение $R_0 = \frac{\alpha}{\beta}$ – контактное число, являющееся численной мерой заразности заболевания [10].

Интенсивность процесса заражения пропорциональна как доле инфицированных (чем больше заразных, тем больше от них заражаются), так и доле восприимчивых (контакт возбудителя с невосприимчивым не может привести к заражению), поэтому первый член в правой части уравнений системы (1) – произведение S и I. Интенсивность потока выздоровления пропорциональна доли инфицированных (второй член в правой части первого уравнения), интенсивность обновления популяции пропорциональна доли невосприимчивых (второй член в правой части второго уравнения, так как восприимчивые не могут терять иммунитет и пары событий «смерть восприимчивого/рождения нового члена популяции» не меняет состояние системы.

Система (1) представляет предельно упрощенное описание эпидемического процесса. Помимо неявного используемого предположения о постоянной численности популяции в ней используется предположение о ее гомогенности, то есть риск заражения одинаков у всех восприимчивых, заразность и вероятность выздоровления инфицированного не зависит от длительности, прошедшего с момента заражения, и т.д.

Также при сопоставлении модели с фактическими данными нужно учитывать, что I – это доля инфицированных, а не болеющих, то есть в нее входят и бессимптомные формы,

Из-за простоты модели (1) ею можно пользоваться для оценки ситуации даже для новых и малоизвестных инфекционных заболеваний. В частности, подобные модели активно использовались для оценки величины контактного числа новой коронавирусной инфекции [8]. Добавление к простой модели дополнительных состояний и зависимостей позволяет оценить существенность их влияния. Например, в работе [7] изучено, как влияет страх заболевания и перед вакцинацией на динамику эпидемического процесса.

Однако использование в качестве базовой предельно упрощенной модели вынуждает изучать корректность принятых предположений – насколько сильно динамика изучаемой системы зависит от упрощающих предположений [3].

Рассмотрим обобщение системы (1) на случай индивидуальной длительности сохранения послеинфекционного иммунитета, то есть скорость потери иммунитета у разных членов популяции может быть разная.

И причины гетерогенности по скорости потери иммунитета, и проявления гетерогенности могут быть разные. Например, для многих инфекционных заболеваний индивидуальная устойчивость связана с наличием или отсутствием специфического гена. В этом случае для описания эпидемического процесса можно использовать популяцию с несколькими подгруппами, с разными скоростями потери иммунитета.

При других причинах, приводящих к гетерогенности, более адекватным является описание распределения скорости потери иммунитета в популяции как непрерывной функции. Например, из-за особенности механизма проникновения возбудителя SASR-CoV-2 в клетку, при которой используется ассоциация с поверхностным белком ACE2, заражающая доза и защитный уровень специфического иммунитета зависит от концентрации белка ACE2, которая снижается с возрастом. В этом случае длительность сохранения иммунитета можно задать как непрерывную функцию от возраста, то есть длительность сохранения послеинфекционного иммунитета непрерывно распределена в популяции.

Для того, чтобы не сужать полученные результаты на случай дискретного или непрерывного распределения, рассмотрим случай произвольного распределения скорости потери иммунитета γ, однако, будем считать, что γ может принимать значения только из интервала $[\gamma_{\min}, \gamma_{\max}]$, причем $\gamma_{\min} > 0$, $\gamma_{\max} < \beta$, так как длительность времени сохранения иммунитета должна быть больше длительности времени заболевания и меньше длительности жизни. Если $F(\gamma_0)$ – доля членов популяции, у которых $\gamma \le \gamma_0$, то F(γ) – монотонно возрастающая функция, такая, что F(0)=0 и $F(\gamma) \underset{\gamma \to +\infty}{\to} 1$. Следовательно, $dF(\gamma)$ – вероятностное распределение, $\int\limits_{\gamma \ge 0} dF(\gamma) = 1$.

Ввиду учета в модели гетерогенности по скорости потери иммунитета γ состояние системы задается не общей долей инфицированных и восприимчивых $I(t), S(t)$, а долями инфицированных и восприимчивых в зависимости от γ, то есть функциями $I(\gamma,t), S(\gamma,t)$, которые без ограничения общности с содержательной точки зрения мы будем считать измеримыми. Так как любой член популяции может быть в одном из трех состояний: восприимчивый, инфицированный и иммунный, то $\forall \gamma \in [\gamma_{\min}, \gamma_{\max}]\ I(\gamma,t) \ge 0, S(\gamma,t) \ge 0, I(\gamma,t) + S(\gamma,t) \le 1$, а динамика задается уравнениями:

$$\begin{aligned} \frac{dI(\gamma,t)}{dt} &= \alpha S(\gamma,t) \int\limits_{\gamma \ge 0} I(\gamma,t)\, dF(\gamma) - \beta I(\gamma,t) \\ \frac{dS(\gamma,t)}{dt} &= -\alpha S(\gamma,t) \int\limits_{\gamma \ge 0} I(\gamma,t)\, dF(\gamma) + \gamma\left(1 - S(\gamma,t)\right). \end{aligned} \tag{2}$$

В системе (2) фигурирует $\int\limits_{\gamma \ge 0} I(\gamma,t)\, dF(\gamma)$ – общая доля инфицированных в момент времени *t*, так как члены популяции заражаются друг от друга вне зависимости от того, насколько длительным будет иммунитет у того, кто заразен в данный момент времени. В остальном система (2) аналогична системе (1).

2. Результаты

Так как $\int\limits_{\gamma \ge 0} I(\gamma,t)\, dF(\gamma)$, $I(\gamma,t), S(\gamma,t)$ принимают значения в пределах от 0 до 1, то правая часть системы (2) равномерно ограничена.

Из второго уравнения системы (2) следует, что

$$\frac{dS(\gamma,t)}{dt} = \gamma - \left(\gamma + \alpha \int\limits_{\gamma \ge 0} I(\gamma,t)\, dF(\gamma)\right) S(\gamma,t) =$$

$$= \gamma - \left(\gamma + f(t)\right) S(\gamma,t),$$ где *f*(t) не зависит от γ и по модулю не больше α, следовательно, если $S(\gamma,t)$, измерима по мере dF, то и $\frac{dS(\gamma,t)}{dt}$ также измерима по мере dF.

Сложив уравнения системы (2), получим $\frac{dI(\gamma,t)}{dt} + \frac{dS(\gamma,t)}{dt} = \gamma\left(1 - S(\gamma,t)\right) - \beta I(\gamma,t)$, откуда следует, что если $I(\gamma,t), S(\gamma,t)$ измеримы по мере dF, то и $\frac{dI(\gamma,t)}{dt} + \frac{dS(\gamma,t)}{dt}$ тоже измеримо по мере dF. С учетом измеримости $\frac{dS(\gamma,t)}{dt}$ получаем, что $\frac{dI(\gamma,t)}{dt}$ измеримо по мере dF. Следовательно, если $I(\gamma,t), S(\gamma,t)$ – измеримы по мере dF, то и их производные по времени тоже измеримы и равномерно ограничены и, следовательно, решения системы (2) можно продолжать по времени, по крайней мере до выхода за границы области определения $I(\gamma,t) \ge 0, S(\gamma,t) \ge 0, I(\gamma,t) + S(\gamma,t) \le 1$.

Теорема 1. При продолжении решений системы (2) по времени они не выходят за область определения $I(\gamma,t) \ge 0, S(\gamma,t) \ge 0, I(\gamma,t) + S(\gamma,t) \le 1$.

Доказательство.

Если $I(\gamma,t) = 0$, то из первого уравнения системы (2) $\frac{dI(\gamma,t)}{dt} = \alpha S(\gamma,t) \int\limits_{\gamma \ge 0} I(\gamma,t)\, dF(\gamma) \ge 0$, откуда следует, что переход в область отрицательных значений через границу $I(\gamma,t) = 0$ невозможен.

Если $S(\gamma,t) = 0$, то из второго уравнения системы (2) $\frac{dS(\gamma,t)}{dt} = \gamma > 0$, то есть переход через эту границу также невозможен.

Сложив первое и второе уравнение системы (2), получим:

$$\frac{dI(\gamma,t) + S(\gamma,t)}{dt} = \gamma\left(1 - S(\gamma,t) - I(\gamma,t)\right) - (\beta - \gamma) I(\gamma,t).$$

Поэтому если $I(\gamma) + S(\gamma) = 1$, то $\frac{dI(\gamma,t) + S(\gamma,t)}{dt} = -(\beta - \gamma) I(\gamma,t)$, а так как β>γ, а $I(\gamma,t)$ неотрицательно, то правая часть этого равенства меньше или равна нулю, что завершает доказательство.

Теорема 2. Если α≤β, то $J(t) = \int\limits_{\gamma \ge 0} I(\gamma,t)\, dF(\gamma)$ – строго монотонно убывающая функция, стремящаяся к нулю (или тождественно равная нулю при $J(0) = 0$).

Доказательство. Проинтегрируем первое уравнение системы (2) по мере $dF(\gamma)$:

$$\frac{d}{dt}\int_{\gamma\geq 0} I(\gamma,t)dF(\gamma)=\alpha\int_{\gamma\geq 0} S(\gamma,t)dF(\gamma)\int_{\gamma\geq 0} I(\gamma,t)dF(\gamma)-\beta\int_{\gamma\geq 0} I(\gamma,t)dF(\gamma).$$

Так как $I(\gamma,t)+S(\gamma,t)\leq 1$, то

$$\int_{\gamma\geq 0} S(\gamma,t)dF(\gamma)\leq\int_{\gamma\geq 0}\left(1-I(\gamma,t)\right)dF(\gamma)=1-\int_{\gamma\geq 0} I(\gamma,t)dF(\gamma),$$

откуда

$$\frac{d}{dt}\int_{\gamma\geq 0} I(\gamma,t)dF(\gamma)\leq\alpha\left(1-\int_{\gamma\geq 0} I(\gamma,t)dF(\gamma)\right)\int_{\gamma\geq 0} I(\gamma,t)dF(\gamma)-\beta\int_{\gamma\geq 0} I(\gamma,t)dF(\gamma)$$

Так как $\alpha\leq\beta$, то

$$\frac{d}{dt}\int_{\gamma\geq 0} I(\gamma,t)dF(\gamma)\leq\alpha\left(1-\int_{\gamma\geq 0} I(\gamma,t)dF(\gamma)\right)\int_{\gamma\geq 0} I(\gamma,t)dF(\gamma)-\beta\int_{\gamma\geq 0} I(\gamma,t)dF(\gamma)\leq$$

$$\leq\beta\left(1-\int_{\gamma\geq 0} I(\gamma,t)dF(\gamma)\right)\int_{\gamma\geq 0} I(\gamma,t)dF(\gamma)-\beta\int_{\gamma\geq 0} I(\gamma,t)dF(\gamma)=-\beta\left(\int_{\gamma\geq 0} I(\gamma,t)dF(\gamma)\right)^2,$$

то есть $\frac{dJ}{dt}\leq-\beta J^2$, откуда при неотрицательности начального значения J и следует утверждение теоремы.

Таким образом при $R_0=\frac{\alpha}{\beta}\leq 1$ тривиальное решение системы (2) $S = 1$, $I = 0$ является аттрактором. При $R_0 > 1$ тривиальное решение системы (2) $S = 1$, $I = 0$ является неустойчивым.

Действительно, проинтегрировав первое уравнение системы (2), получим $\frac{d}{dt}J=\alpha J\int_{\gamma\geq 0} S(\gamma,t)dF(\gamma)-\beta J$, а так как $\alpha>\beta$, то для ненулевого значения J и $S\cong 1$ функция $J(t)$ будет монотонно возрастать до тех пор, пока $\int_{\gamma\geq 0} S(\gamma,t)dF(\gamma)$ не станет равным β/α, что противоречит предположению о том, что S=1, I=0 является устойчивым или равновесным стационарным решением.

Докажем, что у системы (2) есть еще хотя бы одно нетривиальное стационарное решение. Для этого рассмотрим систему:

$$\begin{aligned}\frac{dI(\gamma,t)}{dt}&=\alpha S(\gamma,t)\theta-\beta I(\gamma,t)\\ \frac{dS(\gamma,t)}{dt}&=-\alpha S(\gamma,t)\theta+\gamma\left(1-S(\gamma,t)\right),\end{aligned}\qquad(3)$$

где $\theta\in[0,1]$.

Стационарное решение системы (3) имеет вид $I_0(\gamma)=\frac{\alpha}{\beta}\frac{\gamma\theta}{\gamma+\alpha\theta}, S_0(\gamma)=\frac{\gamma}{\gamma+\alpha\theta}$, то есть $I_0(\gamma)$, $S_0(\gamma)$ принимают значения, большие нуля и меньшие единицы, причем при увеличении θ $S_0(\gamma)$ строго монотонно уменьшается, а $I_0(\gamma)$ – строго монотонно увеличивается.

Рассмотрим $J_0(\theta)=\int I_0(\gamma)dF(\gamma)$ как функцию θ. Так как все $I_0(\gamma)$ строго монотонно и непрерывно увеличиваются при увеличении θ, то и $J_0(\theta)$ – строго монотонно возрастающая непрерывная функция.

Если θ=0, то $J=\int_{\gamma\geq 0} I(\gamma,t)dF(\gamma)=0$.

Однако

$$\frac{d}{d\theta}I_0(\gamma)=\frac{d}{d\theta}\left(\frac{\alpha}{\beta}\frac{\gamma\theta}{\gamma+\alpha\theta}\right)=\frac{\alpha}{\beta}\left(\frac{\gamma}{\gamma+\alpha\theta}-\alpha\frac{\gamma\theta}{(\gamma+\alpha\theta)^2}\right),$$

то есть при θ=0 $\frac{d}{d\theta}I_0(\gamma)=\frac{\alpha}{\beta}>1$, и при достаточно малых θ $J_0(\theta)>\theta$.

Если θ=1, то

$$I_0(\gamma)=\frac{\alpha}{\beta}\frac{\gamma}{\gamma+\alpha}<\frac{\alpha}{\gamma+\alpha}\frac{\gamma}{\beta}<\frac{\gamma}{\beta}<1.$$

Следовательно, так как $J_0(\theta)$ – непрерывная функция, то для достаточно малых положительных θ $\frac{J_0(\theta)}{\theta}>1$ и $J_0(1)<1$.

Следовательно, существует такое $0<\theta<1$, при котором $J_0(\theta)=\theta$, а полученное стационарное решение системы (3) является и нетривиальным стационарным решением системы (2) так как значения J и θ совпадают.

Теорема доказана.

Теорема 3. Если $\alpha>\beta$ и $J(0)=\int_{\gamma\geq 0} I(\gamma,t)dF(\gamma)>0$, то существует C > 0, такое, что для достаточно больших t $J(t)>C$.

Доказательство. Проинтегрируем первое уравнение системы (2) по dF:

$$\frac{d}{dt}J(t)=\alpha J(t)\int_{\gamma\geq 0} S(\gamma,t)dF(\gamma)-\beta J(\gamma,t).$$

Так как S неотрицательно, то $\frac{d}{dt}J(t)\geq\beta J(t)$, откуда следует, что $J(t-\tau)\leq J(t)e^{\beta\tau}$. Поэтому если нижний предел $J(t)$ равен нулю, то для любых $t,\varepsilon>0$ можно найти $T > t$, такое, что $J(T) < \varepsilon$, откуда следует, что $J(t-\tau)\leq\varepsilon e^{\beta\tau}$. Следовательно, для любого сколь угодно малого δ>0 и сколь угодно большого T можно найти интервал времени $[t_0, t_0+T]$, на котором $J(t) < \delta$. Но из второго уравнения системы (2) следует, что тогда

$$\frac{dS(\gamma,t)}{dt}\leq-\alpha\delta S(\gamma,t)+\gamma\left(1-S(\gamma,t)\right).$$

Так как $S(\gamma,t)$ – величина в пределах от 0 до 1, то из этого неравенства следует, что для любого $\varepsilon > 0$ можно найти достаточно малое положительное δ и достаточно большие t_0,T, такие, что $S(\gamma,t_0) > 1 - \varepsilon$. Однако выше было доказано существование равномерной оценки $S(\gamma,t) \geq c > 0$, откуда следует справедливость теоремы.

Теперь приступим к доказательству того, что найденное нетривиальное стационарное решение является и глобальным аттрактором для всех решений с начальным значением $J(0) > 0$, из чего, в частности, будет следовать и его единственность.

Теорема 4. Если $\alpha>\beta$, то все решения с $J(0) = \int\limits_{\gamma\geq 0} I(\gamma,t)\,dF(\gamma) > 0$ стремятся при $t \to +\infty$ к единственному нетривиальному стационарному решению.

Доказательство. Обозначим нетривиальное стационарное решение, существование которого было доказано выше:

$$I_0(\gamma), S_0(\gamma), J_0 = \int\limits_{\gamma\geq 0} I_0(\gamma,t)\,dF(\gamma).$$

Как было показано выше, для всех решений системы (2) и достаточно больших времен значения S равномерно ограничены снизу константой $c > 0$, поэтому при исследовании сходимости решений можно без ограничения общности считать, что $S(\gamma,t) > c > 0$.

Из Теоремы 3 следует, что без ограничения общности при исследовании поведения системы на больших временах также можно считать, что $J(t) = \int I(\gamma,t)\,dF(\gamma) > \varepsilon > 0$.

Так как $S(\gamma,t) > c > 0$, то поделим второе уравнение на S:

$$\frac{d}{dt}\ln S(\gamma,t) = -\alpha J(t) + \frac{\gamma}{S(\gamma,t)} - \gamma. \quad (4)$$

Так как функция $f(x) = \frac{1}{x}$ на отрезке $c \leq x \leq 1$ – дважды непрерывно дифференцируема, ее вторая производная положительна и находится в пределах от 2 до $\frac{2}{\tilde{n}^2}$, то из разложения в ряд Тейлора

$$\frac{1}{S(\gamma,t)} = \frac{1}{S_0(\gamma)+\left(S(\gamma,t)-S_0(\gamma)\right)} =$$

$$= \frac{1}{S_0(\gamma)} - \frac{S(\gamma,t)-S_0(\gamma)}{S_0^2(\gamma)} + \frac{1}{2}\left(S(\gamma,t)-S_0(\gamma)\right)^2 D(\gamma,t), \quad (5)$$

где $D(\gamma,t)$ – вторая производная функции $f(x) = \frac{1}{S_0(\gamma)+x}$ в некоторой точке интервала от нуля до x, где $c \leq S_0(\gamma)+x \leq 1$, то есть $D(\gamma,t)$ равномерно ограничена сверху и снизу положительными константами D_1 и D_2. В результате имеем:

$$\frac{d}{dt}\ln S(\gamma,t) = -\alpha J(t) + \frac{\gamma}{S_0(\gamma)} - \gamma\frac{S(\gamma,t)-S_0(\gamma)}{S_0^2(\gamma)} +$$

$$+\frac{\gamma}{2}\left(S(\gamma,t)-S_0(\gamma)\right)^2 D(\gamma,t) - \gamma \quad (6)$$

Проинтегрируем (5) по времени:

$$\ln S(\gamma,T) - \ln S(\gamma,0) = -\alpha\int_0^T J(t)\,dt + \frac{T\gamma}{S_0(\gamma)} - \gamma\int_0^T \frac{S(\gamma,t)-S_0(\gamma)}{S_0^2(\gamma)}\,dt +$$

$$+\frac{\gamma}{2}\int_0^T \left(S(\gamma,t)-S_0(\gamma)\right)^2 D(\gamma,t)\,dt - T\gamma$$

Так как производная по времени S равномерно ограничена сверху, а S – число в пределах от 0 до 1, то равномерно ограничена сверху некой константой A и производная по времени от $\left(S(\gamma,t)-S_0(\gamma)\right)^2$. Следовательно, если $\left(S(\gamma,t_0)-S_0(\gamma)\right)^2 = X > 0$, то для $T > t_0$ $\left(S(\gamma,T)-S_0(\gamma)\right)^2 \geq X - A(T-t_0)$ и $\int\limits_{t_0}^{t_0+X/A} \left(S(\gamma,t)-S_0(\gamma)\right)^2 D(\gamma,t)\,dt \geq D_1 \int\limits_{t_0}^{t_0+X/A} \left(X - A(t-t_0)\right)dt = D_1\frac{X^2}{2A}$.

Поэтому если $\int\limits_0^T \left(S(\gamma,t)-S_0(\gamma)\right)^2 D(\gamma,t)dt$ конечно, то $S(\gamma,t) \to S_0(\gamma)$.

Но если для некоторого γ $S(\gamma,t) \to S_0(\gamma)$, то из второго уравнения системы (2) $\alpha S_0(\gamma) J(t) \to \gamma\left(1-S_0(\gamma)\right)$ и $J(t) \to J_0$. В этом случае из второго уравнения системы (2) имеем, что уже для любого γ $S(\gamma,t) \to S_0(\gamma)$. В этом случае из первого уравнения системы (2) $I(\gamma,t) \to I_0(\gamma)$, то есть решение стремится к стационарному.

Следовательно, для завершения доказательства теоремы осталось исследовать случай, когда для любого γ $\int\limits_0^T \left(S(\gamma,t)-S_0(\gamma)\right)^2 D(\gamma,t)\,dt \to +\infty$.

Левая часть равенства (5) не превосходит по модулю $-\ln\tilde{n}$. Поэтому при $T\to+\infty$

$$-\alpha\int_0^T J(t)\,dt + \frac{T\gamma}{S_0(\gamma)} - \gamma\int_0^T \frac{S(\gamma,t)-S_0(\gamma)}{S_0^2(\gamma)}\,dt - T\gamma \to -\infty \quad (7)$$

Так как для стационарного решения системы (2) $-\alpha J_0(t) + \frac{\gamma}{S_0(\gamma,t)} - \gamma$, то

$$-\alpha\int_0^T \left(J(t)-J_0\right)dt - \gamma\int_0^T \frac{S(\gamma,t)-S_0(\gamma)}{S_0^2(\gamma)}\,dt \to -\infty \quad (8)$$

Сложив уравнения системы (2) и проинтегрировав по времени, получим:

$$\left|\beta\int_0^T I(\gamma,t)dt + \gamma\int_0^T S(\gamma,t)dt - \gamma\right| \leq 1,$$

и для решения $\beta I_0(\gamma)+\gamma S_0(\gamma)-\gamma=0$, откуда

$$\left|\beta\int_0^T (I(\gamma,t)-I(\gamma_0))dt+\gamma\left(\int_0^T S(\gamma,t)-S(\gamma_0)\right)dt\right|\le 1 \quad (9)$$

и неравенство (7) можно переписать в виде:

$$-\alpha\int_0^T (J(t)-J_0)\,dt+\beta\int_0^T \frac{I(\gamma,t)-I_0(\gamma)}{S_0^2(\gamma)}dt\to-\infty$$

Проинтегрировав, получим

$$-\alpha\int_{\gamma\ge0} S_0^2(\gamma)\,dF(\gamma)\int_0^T (J(t)-J_0)\,dt+\beta\int_0^T (J(t)-J_0)\,c$$

Проинтегрировав первое уравнение системы (2), получим $\frac{dJ}{dt}=\alpha J\int_{\gamma\ge0} S(\gamma,t)\,dF(\gamma)-\beta J$, откуда $\frac{d}{dt}\ln J=\alpha\int_{\gamma\ge0} S(\gamma,t)\,dF(\gamma)-\beta\cdot$

Так как все I больше $\varepsilon>0$ и не больше 1, то интеграл по времени от правой части равенства по модулю не больше $-\ln\varepsilon$, откуда

$$\left|\alpha\int_0^T\int_{\gamma\ge0} S(\gamma,t)\,dF(\gamma)dt-\beta\right|\le-\ln\varepsilon\cdot$$

В частности, для стационарного решения $\alpha\int_{\gamma\ge0} S_0(\gamma)\,dF(\gamma)=\beta$, а так как $S\le1-I<1-\varepsilon$, то

$$\alpha\int_0^T\int_{\gamma\ge0} S(\gamma,t)\,dF(\gamma)dt-\beta T\to+\infty \text{ и}$$

$$\int_0^T (J(t)-J_0)\,dt\to-\infty \quad (10)$$

Но тогда из (8) следует, что и для любого γ $\int_0^T I(\gamma,t)-I_0(\gamma)\,dt\to-\infty$ и из (8) получаем, что для любого γ $\int_0^T S(\gamma,t)-S_0(\gamma)\,dt\to+\infty$.

Однако из первого уравнения системы (2)

$$\frac{d}{dt}\ln J=\alpha\int_0^T\int_{\gamma\ge0} S(\gamma,t)\,dF(\gamma)dt-\beta T$$

и $\int S_0(\gamma)\,dF(\gamma)=\frac{\beta}{\alpha}$. Следовательно, $dt\int_0^T\int_{\gamma\ge0}(S(\gamma,t)-S_0(\gamma))\,dF(\gamma)dt$ равномерно ограничено.

Мы пришли к противоречию, что и завершает доказательство теоремы.

Пусть теперь в популяции имеется несколько подгрупп k = 1,...,n численностью N_1,...,N_n, для членов которых время сохранения иммунитета (включая время заболевания) равно T_n. Для краткости изложения будем считать, что если $k>m$, то $T_k<T_m$.

В этом случае текущее состояние системы описывается набором I_k,S_k долей инфицированных и восприимчивых членов популяции в k-ой группе, k = 1,...,n, а система уравнений Кермака-МакКендрика примет вид:

$$\begin{aligned}\frac{dI_n}{dt}&=\alpha S_n\sum_{k=1}^N p_k I_k-\beta I_n\\ \frac{dS_n}{dt}&=-\alpha S_n\sum_{k=1}^N p_k I_k+\gamma_n(1-S_n).\end{aligned} \quad (11)$$

где $p_n=\frac{N_n}{\sum_{k=1}^N N_k}>0$ – доля k-ой группы, $\gamma_n=\frac{1}{T_n}$, $\frac{1}{\beta}$ равно продолжительности промежутка времени от инфицирования до окончания выделения (включая время пребывания возбудителя во внешней среде), а отношение $R_0=\frac{\alpha}{\beta}$ – контактное число.

В силу принятых предположений если $k>m$, то $\gamma_k>\gamma_m$.

Далее будем рассматривать основной случай $R_0>1$.

Пусть – $\bar I_n,\bar S_n, n=1,...N$ – нетривиальное (с ненулевой заболеваемостью) стационарное решение, а $j_n=I_n-\bar I_n, s_n=S_n-\bar S_n, n=1,...N$ – отклонения от стационарного решения.

Так как $(\bar I_n,\bar S_n)$ – стационарное решения системы (10), то

$$\alpha\bar S_n\sum_{k=1}^N p_k\bar I_k=\beta\bar I_n$$

$$\alpha\bar S_n\sum_{k=1}^N p_k\bar I_k=\gamma_n(1-\bar S_n).$$

Из второго уравнения получаем, что $\bar S_n=\frac{\gamma_n}{\alpha\left(\sum_{k=1}^N p_k\bar I_k+\gamma_n\right)}$, а так как в силу принятых предположений для $k\ge m$ выполняется $\gamma_k>\gamma_m$, то и $\bar S_k>\bar S_m$. При этом $\beta\bar I_n=\alpha\bar S_n\sum_{k=1}^N p_k\bar I_k=\frac{\gamma_n\sum_{k=1}^N p_k\bar I_k}{\sum_{k=1}^N p_k\bar I_k+\gamma_n}$, откуда следует, что и $\bar I_k>\bar I_m$.

Рассмотрим динамику малых отклонений от стационарного решения, $j_n(t)=I_n(t)-\bar I_n$, $s_n(t)=S_n(t)-\bar S_n, n=1,...,N$. Отбросив малые второго порядка малости, получим:

$$\begin{aligned}\frac{dj_n}{dt} &= \alpha s_n \sum_{k=1}^{N} p_k \bar{I}_k + \alpha \bar{S}_n \sum_{k=1}^{N} p_k j_k - \beta j_n \\ \frac{ds_n}{dt} &= -\alpha s_n \sum_{k=1}^{N} p_k \bar{I}_k - \alpha \bar{S}_n \sum_{k=1}^{N} p_k j_k - \gamma_n s_n\end{aligned} \quad (12)$$

или, в операторном виде,

$$\frac{d}{dt}\left(j_1,...,j_N,s_1,...,s_N\right) = A\left(j_1,...,j_N,s_1,...,s_N\right), \quad (13)$$

где A – линейный оператор.

Распространим уравнения (11) на комплексную область. Тогда у оператора A имеются собственные вектора и числа.

В частности, для гомогенной модели (при $N=1$, отсутствии разброса по длительности иммунитета)

$$\bar{I} = \frac{\gamma}{\beta}\left(1-\frac{1}{R_0}\right), \bar{S} = \frac{1}{R_0},$$

$$\frac{dj}{dt} = \gamma\left(R_0 - 1\right)s$$

$$\frac{ds}{dt} = -\gamma R_0 s - \beta j$$

оператор A имеет вид $A = \begin{pmatrix} 0 & \gamma\left(R_0-1\right) \\ -\beta & -\gamma R_0 \end{pmatrix}$ и его собственные числа можно найти из характеристического уравнения $-\lambda\left(-\lambda-\gamma R_0\right)+\gamma\beta\left(R_0-1\right)=0$, или $\lambda_{1,2} = -\frac{\gamma R_0}{2} \pm \sqrt{\frac{\gamma^2 R_0^2}{4} - \gamma\beta\left(R_0-1\right)}$.

Так как для COVID-19 на настоящий момент контактное число оценивается в 5-7, а отношение длительности сохранения иммунитета к длительности заболевания, то есть $\frac{\beta}{\gamma}$ – в десятки или более, то «с запасом» выполняется неравенство $\frac{\gamma^2 R_0^2}{4} < \gamma\beta\left(R_0-1\right)$, то есть под корнем стоит отрицательное выражение; собственные числа имеют отрицательную действительную часть и ненулевую мнимую, и решение имеет вид скручивающейся спирали.

Вернемся к гетерогенной модели с несколькими подгруппами, отличающимися длительностью послеинфекционного иммунитета.

Пусть λ – собственное число, а $\vec{v}(t) = \left(j_1(t),...,j_N(t),s_1(t),...,s_N(t)\right)$ – соответствующий ему собственный вектор.

Как было получено раньше, все решения с ненулевой начальной долей инфицированных стремятся к стационарному решению, то все собственные числа λ имеют отрицательную действительную часть.

Для практических приложений наибольший интерес представляет собственное число с наименьшим модулем действительной части, так как оно дает наименьшую скорость уменьшения значения собственного вектора, то есть, для малых колебаний – скорость затухания.

Формально другая скорость затухания может быть в том случае, если начальные значения являются линейной комбинацией собственных векторов других значений, однако это предположение выходит за границы точности модели. В частности, так как рассматриваемая популяция хотя и большая, но не бесконечно большая, то к правой части системы (11) добавляется стохастическая компонента, которая обеспечивает ненулевой вклад в динамику любого собственного вектора.

Также имеет смысл рассчитывать величину собственных чисел не только для контактного числа в 7, но и для других. Динамика при меньших значениях контактного числа соответствует динамике заболеваемости в условиях продолжения противоэпидемических мероприятий разной интенсивности, а динамика при большем значении контактного числа может стать актуальной, если новая мутация возбудителя станет еще более заразной.

В табл.1 для собственного числа с максимальной действительной частью представлены его значения, длина периода и время, за которое амплитуда малых отклонений от стационарного решения уменьшается в 10 раз. Время измеряется в годах. Рассмотрены следующие случаи:

А) Гомогенная модель, длительность сохранения иммунитета 1 год.
Б) Гомогенная модель, длительность сохранения иммунитета 1,5 года.
В) Гомогенная модель, длительность сохранения иммунитета 2 года.
Г) Гетерогенная модель, у половины популяции иммунитет сохраняется год, у половины – два года.
Д) Гетерогенная модель, длительность сохранения иммунитета распределена равномерно на интервале от года до двух.

Для простоты восприятия, помимо полученных значений собственного значения $\lambda = a + ib$, приведена длительность периода затухающих колебаний $T = \frac{2\pi}{b}$ и длительность времени $T_{10} = -\frac{\ln(10)}{a}$, за которое амплитуда колебаний уменьшается в 10 раз.

Табл. 1

Собственные значения с максимальной действительной частью λ время T_{10} уменьшения амплитуды малых колебаний в 10 раз (годы) и длина периода T (годы)

R_0	2	3	5	7	10
λ					
А	-1+5,958*i*	-1,5+8,411*i*	-2,5+11,822*i*	-3,5+14,379*i*	-5+17,421*i*
Б	-0,667+4,888*i*	-1+6,904*i*	-1,667+9,724*i*	-2,333+11,856*i*	-3,333+14,418*i*
В	-0,5+4,243*i*	-0,75+5,995*i*	-1,25+8,452*i*	-1,75+10,317*i*	-2,5+12,57*i*
Г	-0,748+5,019*i*	-1,123+7,166*i*	-1,873+10,171*i*	-2,622+12,438*i*	-3,746+15,151*i*
Д	-0,749+5,121*i*	-1,124+7,26*i*	-1,874+10,251*i*	-2,623+12,506*i*	-3,748+15,21*i*
T_{10} (время уменьшения амплитуды в 10 раз), годы					
А	2,303	1,535	0,921	0,658	0,461
Б	3,454	2,303	1,382	0,987	0,691
В	4,605	3,070	1,842	1,316	0,921
Г	3,078	2,050	1,230	0,878	0,615
Д	3,073	2,049	1,229	0,878	0,614
T (длина периода), годы					
А	1,055	0,747	0,532	0,437	0,361
Б	1,286	0,910	0,646	0,530	0,436
В	1,481	1,048	0,743	0,609	0,500
Г	1,252	0,877	0,618	0,505	0,415
Д	1,227	0,865	0,613	0,502	0,413

Заключение

Математические модели эпидемического процесса все более активно используются для анализа эпидемической ситуации, однако пандемия новой коронавирусной инфекции вызвала резкий рост интереса к ним.

В настоящий момент динамика эпидемического процесса новой коронавирусной инфекции представляет собой последовательность сменяющих друг друга «волн», при которых период быстрого роста с достижением массовой заболеваемости сменялся периодом такого же быстрого и радикального снижения [11, 12, 14]. Первые волны были «рукотворными» – переход из периода роста заболеваемости к периоду снижения был следствием введения жестких режимно-ограничительных мероприятий, для обозначения которых сейчас обычно используется термин «локдаун». Правительство большинства стран (за исключением Китая и некоторых других) не решилось на проведение постоянных интенсивных мероприятий по социальному разобщению, сочтя экономические и социальные последствия таких мер неприемлемыми. Интенсивный противоэпидемический режим «включался» только тогда, когда становилось ясным, что дальнейшего повышения заболеваемости национальная система здравоохранения не выдержит. В результате в период до весны 2021 года количество волн подъема заболеваемости, их выраженность и время наступления сильно различались не только между странами, но и между регионами.

Весной 2021 года ситуация еще более осложнилась: появился новый вариант «Дельта», который не только был и более тяжелым, и более заразным. В результате в 2021 году повторялись волны заболеваемости, частично регулируемые противоэпидемическими мероприятиями, включая прививки.

Варианты, появившиеся в 2022 году, вновь были более заразные, чем ранее, но вызываемое

ими заболевание было обычно менее тяжелое. Поэтому большинство стран перестали проводить локдауны, а волны заболеваемости для новых штаммов аналогичны «классическим» эпидемиям, когда возбудитель приходит, поражает большую часть популяции, после чего заболеваемость резко падает.

При этом процесс активной мутации возбудителя COVID-19 продолжается, и возможны самые разные неприятные сюрпризы, включая повышение патогенности доминирующих вариантов. В связи с этим разработка математических моделей эпидемического процесса остается крайне актуальной.

Простейшая гомогенная модель сильно усложняет исследуемый процесс, считая всех людей одинаковыми. Гетерогенные модели, учитывающие индивидуальные различия, в принципе точнее соответствуют реальному эпидемическому процессу, однако содержат большое количество внутренних параметров, затрудняющих валидизацию.

Кроме того, в качестве основного объекта изучения при математическом моделировании выступали инфекции с пожизненным или длительным послеинфекционным иммунитетом.

Полученные результаты показывают, что даже с учетом достаточно нестойкого послеинфекционного иммунитета, длительность сохранения которого зависит от индивидуальных особенностей, в случае отсутствия возникновения новых вариантов возбудителя заболеваемость COVID-19 постепенно выйдет на плато, то есть новая коронавирусная инфекция по характеру эпидемического процесса будет похожа на большинство других ОРЗ с сезонными подъемами и относительно постоянной многолетней заболеваемостью.

Также мы получили, что для COVID-19, если не будет появляться новых вариантов и происходить другие резкие изменения эпидемиологической ситуации, стабилизация заболеваемости будет происходить достаточно быстро. Длительность промежутка времени между волнами будет составлять менее года, а сами волны будут иметь быстрое затухание. Более выраженное влияние на динамику заболеваемости будут иметь сезонные изменения активности механизма передачи, которые при некоторых условиях могут привести к потере устойчивости основного решения и возникновению бифуркаций [9].

Возникновение бифуркаций возможно и при учете зависимости активности механизма передачи от дня недели, а также при переходе от непрерывного времени к дискретному. Так, в работе [13], посвященной численному анализу динамики системы при численном интегрировании с шагом в один день, было обнаружено, что при небольших значениях контактного числа возможно возникновение бифуркаций. Это нельзя считать дефектом численного анализа, при котором из-за слишком большого шага численного интегрирования появляются артефакты, так как активность людей имеет сильную зависимость от времени суток и вопрос о том, что лучше описывает реальный эпидемический процесс – модель с непрерывным временем или с дискретным временем с шагом в один день, нуждается в дополнительном изучении.

Литература

1. *Chang JT, Kaplan EH.* Modeling local coronavirus outbreaks. Eur J Oper Res. 2023 Jan 1;304(1). P. 57-68.
2. *Hosseini-Motlagh SM, Samani MRG, Homaei S.* Design of control strategies to help prevent the spread of COVID-19 pandemic. Eur J Oper Res. 2023 Jan 1;304(1). P. 219-238.
3. *Kopfová Jana, Nábělková Petra, Rachinskii Dmitrii, Rouf Samiha C.* Dynamics of SIR model with vaccination and heterogeneous behavioral response of individuals modeled by the Preisach operator. J Math Biol. V. 83. № 2. 2021. P. 199-207.
4. *Mustapha U.T., Hincal E., Yusuf A., Qureshi S., Sanlidag T., Muhammad S.M., Kaymakamzade B., Gokbulut N.* Transmission dynamics and control strategies of COVID-19: a modelling study. Bulletin of the Karaganda University. Mathematics Series. 2021. No 2 (102). P. 92-105.
5. *Pani Arianna, Cento Valeria, Vismara Chiara, Daniela Campisi, Federica Di Ruscio et. al.* Results of the RENAISSANCE Study: REsponse to BNT162b2 COVID-19 vacciNe-short- And long-term Immune reSponSe evAluatioN in health Care workErs. Mayo Clin Proc. 2021 Dec;96(12). P. 2966-2979.
6. *Sun Q, Miyoshi T, Richard S.* Analysis of COVID-19 in Japan with extended SEIR model and ensemble Kalman filter. J Comput Appl Math. 2023 Feb;419:114772.
7. *Yousef A., Bozkurt F., Abdeljawad T., Emreizeeq E.* A mathematical model of COVID-19 and the multi fears of the community during the epidemiological stage. J. Comput. Appl. Math. 2023 Feb;419:114624.
8. *Wells C.R., Fitzpatrick M.C., Sah P., Shoukat A., Pandey A., El-Sayed A.M., Singer B.H., Moghadas S.M. & Galvani A.P.* (2020). Projecting the demand for ventilators at the peak of the COVID-19 outbreak in the USA. The Lancet. Infectious diseases, 20(10). P. 1123–1125.
9. *Герасимов А.Н., Разжевайкин В.Н.* Динамика эпидемического процесса в гетерогенной не

полностью изолированной популяции с учетом сезонных колебаний активности механизма передачи // Журнал вычислительной математики и математической физики. 2008. Том 48. №8. С. 1488-1499
10. *Герасимов А.Н.* Математические модели и эпидемиологический анализ. Вестник Российской академии медицинских наук. 2010. № 12. С. 23-26.
11. *Кроткова Е.Н., Цыркунов В.М.* Инфекционные болезни: доковидные и постковидные аспекты. Современные проблемы гигиены, радиационной и экологической медицины. 2020. Т. 10. С. 426-442.
12. *Пшеничная Н.Ю., Лизинфельд И.А., Журавлёв Г.Ю., Плоскирева А.А., Еровиченков А.А., Акимкин В.Г.* Эпидемический процесс COVID-19 в Российской Федерации: промежуточные итоги. Сообщение 2. Инфекционные болезни. 2021. Т. 19. № 1. С. 10-15.
13. *Соколов А.В.* Covid-19: качественное изменение поведения системы «вирус против человека» – от предельного цикла к устойчивому фокусу (препринт). https://doi.org/10.1101/2022.09.28.22280472.
14. *Стародубов В.И., Береговых В.В., Акимкин В.Г., Семененко Т.А., Углева С.В., Авдеев С.Н. и др.* COVID-19 в России: эволюция взглядов на пандемию (часть 1). Вестник Российской академии медицинских наук. 2022. Т. 77. № 3. С. 199-207.

Герасимов Андрей Николаевич. ФБУН Центральный научно-исследовательский институт Эпидемиологии Роспотребнадзора, г. Москва. Ведущий научный сотрудник. Доктор физико-математических наук. Область научных интересов: математические модели в биологии, медицине, эпидемиологии.
E-mail: andr-gerasim@yandex.ru

Цыганкова Анна Эдуардовна. ФГАОУ ВО Первый МГМУ им. И.М. Сеченова Минздрава России, г. Москва. Ассистент. Область научных интересов: инфекционные болезни.
E-mail: anna.tsygankova.inf@gmail.com

Сычева Наталья Владимировна. Центральный НИИ Эпидемиологии Роспотребнадзора, г. Москва. Младший научный сотрудник. Область научных интересов: эпидемиология. E-mail:natsy@bk.ru

Шпитонков Михаил Иванович. Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» РАН, г. Москва. Старший научный сотрудник. Кандидат физико-математических наук, доцент. Область научных интересов: математические модели в биологии, медицине, эпидемиологии, физиологии, экологии. E-mail: mixash@bk.ru

Parasite-host system with distributed immunity retention time

A.N. Gerasimov[I], N.V. Sycheva[I], A.E.Tsygankova[II], M.I. Shpitonkov[III]

[I] Central epidemiology institute, Moscow, Russia

[II] I.M. Sechenov First Moscow State Medical University, Moscow, Russia

[III] Federal Research Center “Computer Science and Control” of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Abstract. A mathematical model of the dynamics of the “parasite-host” system was studied, in which the duration of immunity maintenance is not fixed, but distributed and depends on the characteristics of a particular host organism. It is found that for a contact number greater than one, there exists a unique non-trivial stationary solution that is a global attractor. With regard to the COVID-19 pandemic, this means that if no new variants of the pathogen arise, then under constant conditions, the incidence will stabilize. The impact on the decay rate of small deviations in incidence for the “parasite-host” system with the presence of groups differing in the duration of immunity was studied. It was found that for values R_0 corresponding to COVID-19, the solution has the form of a twisting spiral with a period of about a year.

Keywords: *parasite-host system, coronavirus infection, epidemic process, heterogeneous population.*
DOI: 10.14357/20790279230310

References

1. *Chang JT, Kaplan EH.* Modeling local coronavirus outbreaks. Eur J Oper Res. 2023 Jan 1;304(1):57-68.
2. *Hosseini-Motlagh SM, Samani MRG, Homaei S.* Design of control strategies to help prevent the spread of COVID-19 pandemic. Eur J Oper Res. 2023 Jan 1;304(1):219-238.
3. *Kopfová Jana, Nábělková Petra, Rachinskii Dmitrii, Rouf Samiha C.* Dynamics of SIR model with vaccination and heterogeneous behavioral response of individuals modeled by the Preisach operator. J Math Biol. V. 83. № 2. 2021. P. 199-207.
4. *Mustapha U.T., Hincal E., Yusuf A., Qureshi S., Sanlidag T., Muhammad S.M., Kaymakamzade B., Gokbulut N.* Transmission dynamics and control strategies of COVID-19: a modelling study. Bulletin of the Karaganda University. Mathematics Series. 2021. № 2 (102). P. 92-105.
5. *Pani Arianna, Cento Valeria, Vismara Chiara, Daniela Campisi, Federica Di Ruscio et. al.* Results of the RENAISSANCE Study: REsponse to BNT162b2 COVID-19 vacciNe-short- And long-term Immune reSponSe evAluatioN in health Care workErs. Mayo Clin Proc. 2021 Dec;96(12):2966-2979.
6. *Sun Q, Miyoshi T, Richard S.* Analysis of COVID-19 in Japan with extended SEIR model and ensemble Kalman filter. J Comput Appl Math. 2023 Feb;419:114772.
7. *Yousef A, Bozkurt F, Abdeljawad T, Emreizeeq E.* A mathematical model of COVID-19 and the multi fears of the community during the epidemiological stage. J. Comput. Appl. Math. 2023 Feb;419:114624.
8. *Wells C.R., Fitzpatrick M.C., Sah P., Shoukat A., Pandey A., El-Sayed A.M., Singer B.H., Moghadas S.M. & Galvani A.P.* (2020). Projecting the demand for ventilators at the peak of the COVID-19 outbreak in the USA. The Lancet. Infectious diseases, 20(10), 1123–1125.
9. *Gerasimov A.N., Razzhevaykin V.N.* Dinamika epidemicheskogo protsessa v geterogennoy ne polnost'yu izolirovannoy populyatsii s uchetom sezonnykh kolebaniy aktivnosti mekhanizma peredachi [Dynamics of the epidemic process in a heterogeneous incompletely isolated population, taking into account seasonal fluctuations in the activity of the transmission mechanism]. Zhurnal vychislitel'noy matematiki i matematicheskoy fiziki. [Journal of Computational Mathematics and Mathematical Physics], V 48, 2008№8. P. 1488-1499
10. *Gerasimov A.N.* Mathematicheskie modeli i epidemiologicheskii analiz. [Mathematical models and epidemiological analysis]. Vestnik Rossiiskoy akademii meditsynskyhk nauk. [Bulletin of the Russian Medical Academy of Sciences], № 12. 2010, P. 23-26.
11. *Krotkova E.N., Tsyrkunov V.M.* Infektsionnye bolezni: dokovidnye i postkovidnye aspekty. [Infectious diseases: pre- and post-cortical aspects]. Sovremennye problemy gigieny, radiatsionnoi i ekologicheskoi meditsiny.[Modern problems of hygiene, radiation and environmental medicine]. V. 10. 2020. P. 426-442.
12. *Pshenichnaya N.Yu., Lizinfeld I.A., Zhuravlev G.Yu, Ploskireva A.A., Erovichenkov A.A., Akimkin V.G.* Epidemicheskii protsess COVID-19 v Rossiiskoi Federatsii: promezhutochye itogi. [The epidemic process of COVID-19 in the Russian Federation: interim results.]. Soobshcenie 2. Infektsionnye bolezni.[Message 2. Infectious diseases]. V. 19. № 1. 2021. P. 10-15.
13. *Sokolov A.V.* Covid-19: kachestvennoye izmeneniye povedeniya sistemy «virus protiv cheloveka» – ot predel'nogo tsikla k ustoychivomu fokusu (preprint) [A Qualitative Change in the Behavior of the "Virus Against Human" System – from Limit Cycle to Sustainable Focus (preprint)]. https://doi.org/10.1101/2022.09.28.22280472
14. *Starodybov V.I., Beregovykh V.V., Akimkin V.G., Semenenko T.A., Ugleva S.V., Avdeev S.N. i dr.* COVID-19 v Rossii: evolyutsiya bzglyadov na pandemiyu (chast 1). [COVID-19 in Russia: the evolution of views on the pandemic (Part 1)]. Vestnik Rossiiskoy akademii meditsinskikh nauk. [Bulletin of the Russian Medical Academy of Sciences]. V. 77. No 3. 2022. P. 199-207.

Gerasimov Andrey Nikolaevich. Doctor of Mathematics. Central epidemiology institute. Novogireevskaya str. 3a, Moscow, 111123, Russia. E-mail: andr-gerasim@yandex.ru

Sycheva Natalia Vladimirovna. Junior Researcher. Central epidemiology institute. Novogireevskaya str. 3a, Moscow, 111123, Russia. E-mail: natsy@bk.ru

Tsygankova Anna Eduardovna. I.M. Sechenov First Moscow State Medical University. Trubetskaya str. 8, bl.2, Moscow, 119991, Russia. E-mail: anna.tsygankova.inf@gmail.ru

Shpitonkov Mikhail Ivanovitch. Ph.D, Federal Research Center "Computer Science and Control" of Russian Academy of Sciences, 44/2 Vavilova str., Moscow, 119333, Russia. E-mail: mixash@bk.ru

Информационная технология разработки оптимальных рационов здорового питания*

Н.С. Потемкина, В.Н. Крутько

Федеральное государственное учреждение «Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук», г. Москва, Россия

Аннотация. Разработан метод формирования разнообразных, полноценных по составу, профилактических для большинства хронических неинфекционных заболеваний недельных рационов. На основе этого метода предложен прототип рациона для здорового и профилактического питания, отвечающего современным диетическим требованиям и нормативам РФ. Полноценность нутриентного состава рациона достигается без использования БАД, но с обязательным включением в рацион пророщенных зерен. Прототип представляет собой набор продуктов питания для одного человека на неделю. На его основе пользователь может легко составлять полноценные персональные диеты, не используя процедуры компьютерной оптимизации.

Ключевые слова: *профилактическое, геропротекторное, здоровое питание, оптимальный рацион, БАД, пророщенные зерна, числовой эксперимент.*

DOI: 10.14357/20790279230311

Введение

Здоровые привычки в питании и правильный выбор продуктов, как часть образа жизни, являются важными факторами предотвращения и лечения ряда заболеваний, к которым относятся хронические неинфекционные заболевания (ХНИЗ) – основные причины смерти, и многие вирусные, в том числе и COVID-19 [1 – 4]. Нездоровое питание, в частности дефицит микронутриентов, является одной из основных причин роста алиментарно-зависимых заболеваний, таких как ожирение, артериальная гипертония, атеросклероз, сахарный диабет 2 типа, остеопороз, отдельные виды рака, нейродегенеративные, и некоторые другие заболевания. Эти же причины ведут к снижению сопротивляемости организма и преждевременному старению, так как приводят к нарушениям систем антиоксидантной защиты и развитию иммунодефицитных состояний [1, 5, 6].

По словам В.А. Тутельяна и соавторов [1], «современный человек, даже с теоретически адекватным рационом из обычных натуральных продуктов, не может получить микронутриенты в необходимых количествах. Иными словами, дефицит микронутриентов запрограммирован». Для современных диет, наряду с дефицитом микронутриентов, характерно недостаточное количество растительных продуктов и избыток животных. Они слишком богаты насыщенными жирами и содержат чрезмерное количество обработанных (рафинированных) углеводов [2, 7, 8]. Постоянное воздействие повышенных уровней глюкозы, триглицеридов и свободных жирных кислот приводят к развитию оксидативного стресса, который в свою очередь вызывает хроническое воспаление, что снова стимулирует оксидативный стресс. В результате образуется порочный круг, который типичен для ХНИЗ, а также характерен для преждевременного старения [1- 6, 9]. Также хотелось бы отметить, что связь процесса старения с дефицитом витаминов и минералов недооценивается, поскольку она клинически неочевидна – дефицит накапливается постепенно и может проявиться только с возрастом, поэтому здоровое старение может быть достигнуто при достаточном потреблении витаминов и минералов [10].

Учитывая, что питание большинства населения, как в России, так и в западных странах, является преимущественно нездоровым и не полноценным по эс-

* Исследование выполнено при частичной финансовой поддержке НТИ в рамках научного проекта «Интеллектуальная цифровая платформа персонализированного управления качеством жизни "Health Heuristics"».

сенциальным нутриентам [1, 2, 7, 9], для восстановления дефицита питательных микронутриентов до рекомендуемых уровней, многие авторы предлагают использовать биологически активные добавки (БАД) и функциональные продуты (продукты с добавлением БАД), что имеет серьезные недостатки, главным из которых является слабо изученная их эффективность и безопасность [1, 11]. Однако существуют натуральные продукты, фактически являющиеся функциональными и, в то же время, лишенные этих недостатков. К ним относятся пророщенные зерна, потенциал которых в повседневном питании населения России не используется, хотя они являются традиционным, широко используемым компонентом питания в странах Юго-Восточной Азии.

Многочисленные исследования [12 – 15] показывают, что прорастание вызывает значительные изменения биохимического состава цельного зерна: биологическая ценность белка проростков возрастает, количество биологически активных соединений увеличивается. В проросших зернах почти все питательные вещества высоко доступны, а различные микронутриенты присутствуют в более высоких концентрациях. По сравнению с цельным зерном снижена калорийность проростков, что помогает поддерживать адекватный уровень калорийности рациона, а безопасность проростков можно сравнить с безопасностью любых необработанных растительных продуктов.

Целью настоящего исследования является разработка цифрового метода создания рационов питания, представленных в виде оптимального недельного продуктового набора, полноценного по нутриентному составу, профилактического для большинства ХНИЗ и преждевременного старения и состоящего из широко распространенных продуктов повседневного питания с включением проросших зерен.

1. Разработка недельного рациона и анализ его нутриентного содержания

Для достижения поставленной цели использовались метод линейной оптимизации и числовой эксперимент. В качестве базового набора продуктов питания нами была выбрана официально рекомендованная Минздравом РФ Продуктовая корзина РФ, уточненная в соответствии с современными требованиям [16]. На основе этих рекомендаций был сформирован исходный перечень продуктов (недельный продуктовый набор для одного человека) для его последующей оптимизации (рацион RFBASKET). Количество продуктов определялось путем пересчета величин, приведенных в приказе в единицах кг/год на единицы г/неделя.

В набор вошли продукты из следующих групп: зерновые и бобовые, включая крупы, муку и хлеб в пересчете на муку; картофель, овощи и бахчевые; фрукты; сахар и кондитерские изделия; белковые продукты, включая мясо, птицу, рыбу; молочные продукты, включая молоко, кефир, масло сливочное, сыр и сметану; яйца куриные; масло растительное. Дискреционные продукты (продукты, которые не содержат в себе необходимых для организма веществ, но при этом содержат много соли, сахара, жиров и мало витаминов, содержат усилители вкуса и консерванты, а также обладают высокой калорийностью и вызывают привыкание) в список не включались. Список этих продуктов был принят за исходный набор для оптимизации – набор продуктов, из которого программа оптимизации выбирает продукты для формирования оптимального продуктового набора.

Разработка выполнена с помощью компьютерной системы «Питание для здоровья и долголетия» [17, 18], которая предназначена для оценки фактического питания, оптимизации диет методом линейной оптимизации и формирования рекомендаций по питанию.

На рис. 1 представлена функциональная схема процесса оптимизации. Сложность поставленной задачи заключается в необходимости многопараметрической оптимизации, суть которой, в нашем случае, отражена в работе В.А Тутельяна [1, Стр. 230-231] : «Мы постоянно сталкиваемся с дилеммой — необходимостью, с одной стороны, ограничения объема потребляемой пищи с целью достижения соответствия между калорийностью рациона и энерготратами, а с другой — значительного расширения ассортимента потребляемых пищевых продуктов для ликвидации существующего дефицита микронутриентов». Более того, требования по достижению норматива по одним нутриентам могут противоречить другим аналогичным требованиям или концепции питания в целом. Разрешать такие противоречия помогает использование интерактивного режима программы оптимизации [18], благодаря которому мы имеем возможность изменять условия решаемой задачи в процессе решения, а именно изменять набор продуктов, доступных для оптимизации, а также критерии и ограничения оптимизации.

В данном исследовании рацион оптимизировался по критерию минимизации калорийности и с ограничениями для нутриентного состава, при которых содержание в рационе каждого нутриента из заданного списка должно быть не меньше рекомендованного значения и не больше предельно допустимого, а также с с ограничениями для массы

употребляемых продуктов. По стоимости продуктовый набор не оптимизировался, т.к. продукты, включенные в набор для оптимизации, являются относительно недорогими повседневными. В процессе оптимизации исходный набор пополнялся продуктами, акцентированными в рекомендациях широко распространенной в мире Средиземноморской диеты (Mediterranean diet), которая признана одной из лучших и полноценных среди здоровых и профилактических диет [2], и продуктами, характеризующимися богатством нутриентов при низкой калорийности, в частности пророщенными зернами. Процедура редактирования сценария оптимизации проиллюстрирована на рис. 2.

Оценка нутриентного состава выполнялась с помощью баз данных России и США по содержанию нутриентов в продуктах питания [19, 20] и российских нормативов потребления [21, 22], нормированных на 1000 ккал.

Оценка рациона RFBASKET показала наличие дефицита многих питательных веществ (рис. 3, слева), что может повысить риск ХНИЗ и преждевременного старения [1 – 7, 9, 10].

На рис. 3 справа отображен состав рациона RFOPTIM, полученного путем оптимизации. В процессе оптимизации часть продуктов из исходного продуктового набора была заменена на продукты из той же пищевой группы, но более полноценные по составу. Например, в группе «Зерновые и бобовые» вместо муки в оптимальный набор вошел хлеб из цельного и пророщенного зерна, добавлены ростки пшеницы, чечевицы и подсолнечника. В рацион также добавлены орехи, водоросли, свежая и сушеная листовая зелень, которые являются частью традиционной диеты многих долгожителей. Согласно общепризнанным диетическим рекомендациям [1, 2], оптимизированный продуктовый набор содержит более высокую долю бобовых, овощей и фруктов и пониженную долю красного мяса. В него также добавлено оливковое масло, увеличено количество морепродуктов и добавлены специи, которые являются одним из средств профилактики ХНИЗ и предотвращения преждевременного старения [23]. В то же время, набор продуктов RFOPTIM не содержит редких для Российской Федерации продуктов. Содержание большинства нутриентов в нем не ниже рекомендуе-

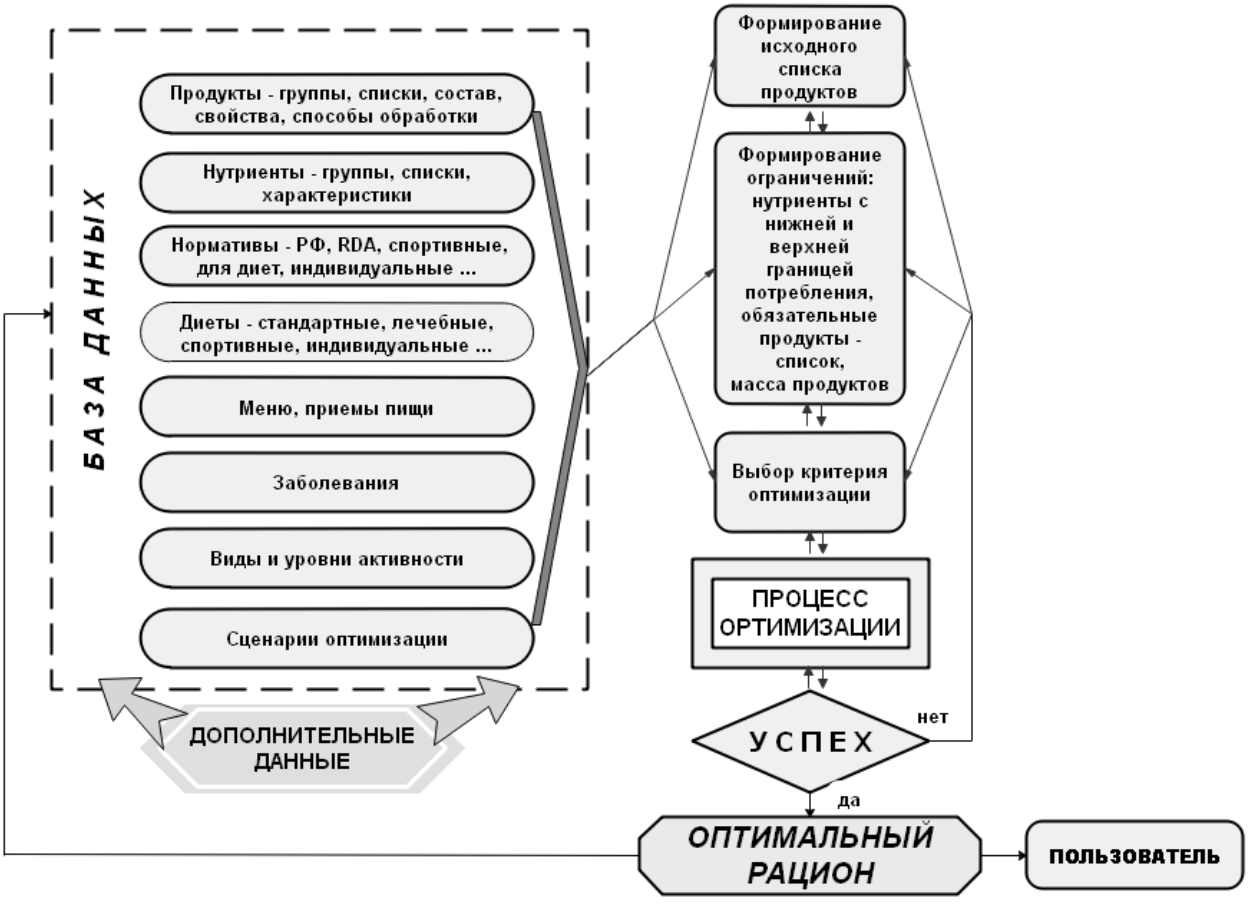


Рис. 1. Функциональная схема процессов создания и редактирования сценария оптимизации с использованием интерактивной процедуры

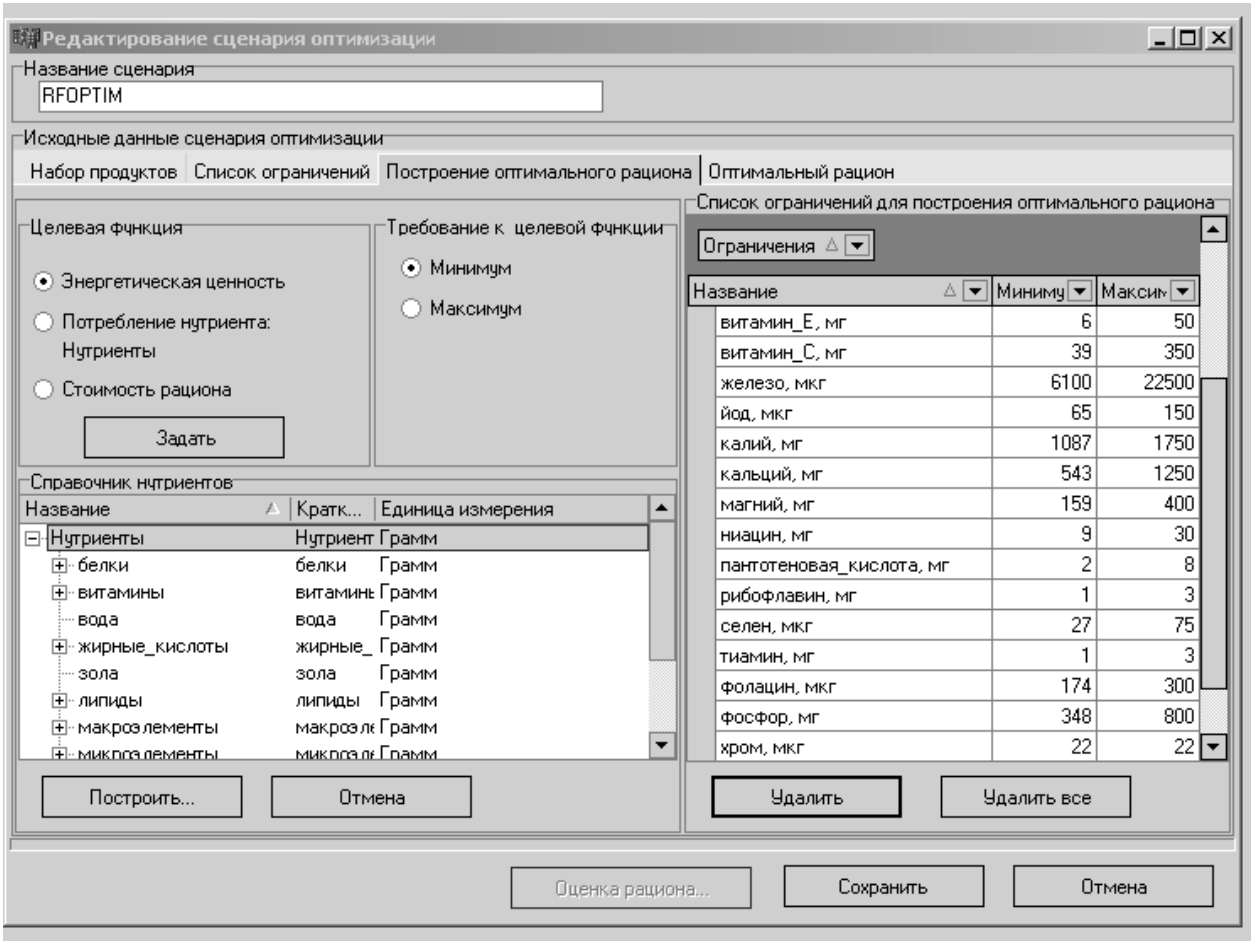


Рис. 2. Страница «Редактирование сценария оптимизации» системы «Питание для здоровья и долголетия»

мых значений и не превышает допустимых значений. Незначительный недостаток витамина А полностью компенсируется избытком бета-каротина. Пониженное содержание углеводов связано с отсутствием в рационе дискреционных продуктов, содержащих много простых углеводов и вредных жиров.

В своих расчетах мы не учитывали потери при пищевой обработке, которые существенно зависят от способа тепловой обработки. В любом случае, максимальные потери обычно приходятся на витамин С – до 60%. Потери остальных витаминов и минералов, при правильной тепловой обработке, не превышают 30 %, потери белка равны 10% [24]. На рис. 3 видно как содержание практически всех нутриентов в рационе превышает возможные потери.

В результате нами предложен полноценный, сбалансированный, разнообразный недельный продуктовый набор для индивидуального питания (рацион RFOPTIM). Процедура разработки этого продуктового набора может быть примером разработки разнообразных продуктовых наборов, отвечающих всем требованиям, предъявляемым к здоровым профилактическим рационам. Список продуктов, входящих в рацион RFOPTIM совпадает со списком табл. 1, а количество продуктов этого рациона незначительно округлено до указанных значений. Следует отметить, что без пророщенных зерен в рационе питания все попытки решить поставленную задачу оптимизации давали отрицательный результат. Используя процедуру оптимизации и изменяя состав доступного для оптимизации набора продуктов, можно получить широкий и разнообразный спектр индивидуальных здоровых рационов с учетом персональных характеристик человека, местных условий и соблюдением диетических требований. Средиземноморская диета может служить основой для создания таких рационов. Ограничения, налагаемые территориальными и культурными условиями, можно преодолеть, включив местные продукты в набор продуктов для оптимизации – масла, фрукты и ягоды, листовые культурные и дикорастущие травы, национальные специи. Таким образом, процедура разработки рациона FROPTIM факти-

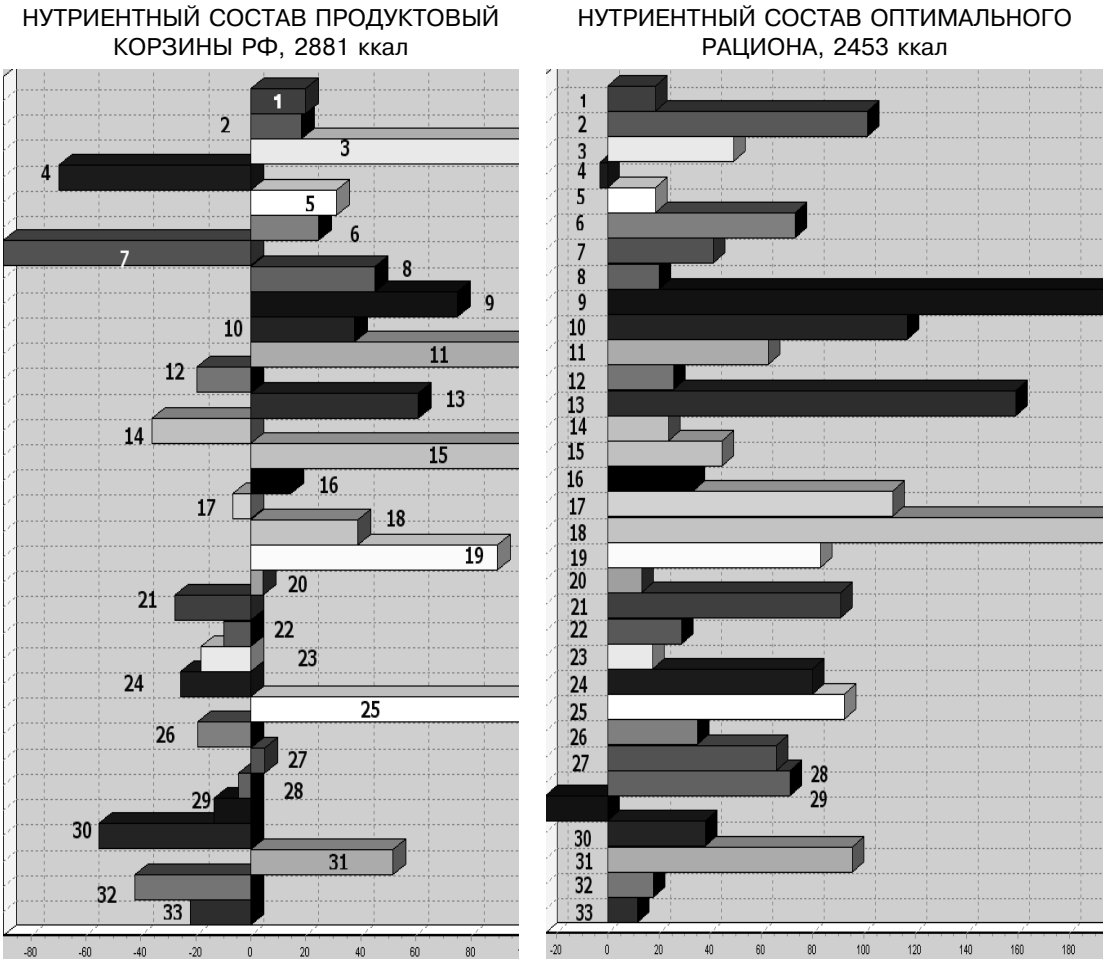


Рис. 3. Белки – 1, бета-каротин – 2, валин – 3, витамин А – 4, витамин В12 – 5, витамин В6 – 6, витамин D – 7, витамин Е – 8, витамин С – 9, железо – 10, изолейцин – 11, йод – 12, калий – 13, кальций – 14, лейцин – 15, липиды – 16, магний – 17, марганец – 18, мононенасыщенные жирные кислоты – 19, насыщенные жирные кислоты – 20, натрий – 21, ниацин – 22, пантотеновая кислота – 23, пищевые волокна – 24, полиненасыщенные жирные кислоты – 25, рибофлавин – 26, селен – 27, тиамин – 28, углеводы – 29, фолацин – 30, фосфор – 31, хром – 32, цинк – 33

чески представляет собой метод создания подобных рационов.

Практически важно, что разработанный продовольственный набор может служить прототипом для создания индивидуальных рационов без использования оптимизации и других сложных расчетов. Для того, чтобы обосновать это утверждение, мы провели числовой эксперимент, показывающий, какие именно продукты в предложенном оптимальном продуктовом наборе обеспечивают заданную нормативами нутриентную плотность рациона. В ходе этого эксперимента нами был выполнен ряд коррекций оптимального продуктового набора, связанных с последовательным сокращением разнообразия его состава. Например, в процессе ряда последовательных коррекций все фрукты были заменены яблоками, все мясо курицей, из группы овощей убрали редис, помидоры и огурцы. Перечисленные выше изменения состава оптимального набора не привели к радикальным изменениям его нутриентного состава. На каждом этапе коррекции рассматривались и другие варианты замен внутри продуктовой группы, например, все фрукты или все крупы последовательно заменялись одним из возможных видов фруктов или круп, но между этими вариантами не было существенных различий, и все отклонения от нормы были по-прежнему положительными. Снижая разнообразие рациона, мы оставляли наиболее широко распространенные и самые доступные продукты. В результате всех этих действий нутриентный состав менялся незначительно и оставался в пре-

делах нормы и даже с ее превышением. Серьезные изменения нутриентного состава произошли только после замены проростков чечевицы на горох и удаления из рациона печени трески и ламинарии (рис. 4, слева). Из рисунка видно, что позитивные отклонения от нормы после этой коррекции рациона значительно сократились для большинства нутриентов по сравнению с отклонениями оптимального рациона. Но, в тоже время, большинство из них не стали ниже нормативных значений. Однако для витамина D и йода произошли критические изменения – содержание витамина D упало до 92%, а йода стало на 65 % ниже нормы, что вызвано удалением из рациона печени трески и ламинарии. Также ниже нормы на 26% стало количество фолацина, которым богаты проростки чечевицы. Дальнейшие изменения в рационе приводят к еще более серьезным отклонениям нутриентного состава рациона от нормативов (рис.4, справа). После того как ростки пшеницы были заменены на макароны из муки высшего сорта, из рациона убрали сушеную и свежую зелень, на 20% ниже нормы стало содержание кальция и резко – до 49% снизилось содержание фолацина, ниже нормы до 5% стало содержание пантотеновой кислоты. Содержание цинка снизилось до 29%. В результате этих изменений практически все позитивные отклонения нутриентов от нормы, особенно содержание витамина B6, ниацина, рибофла-

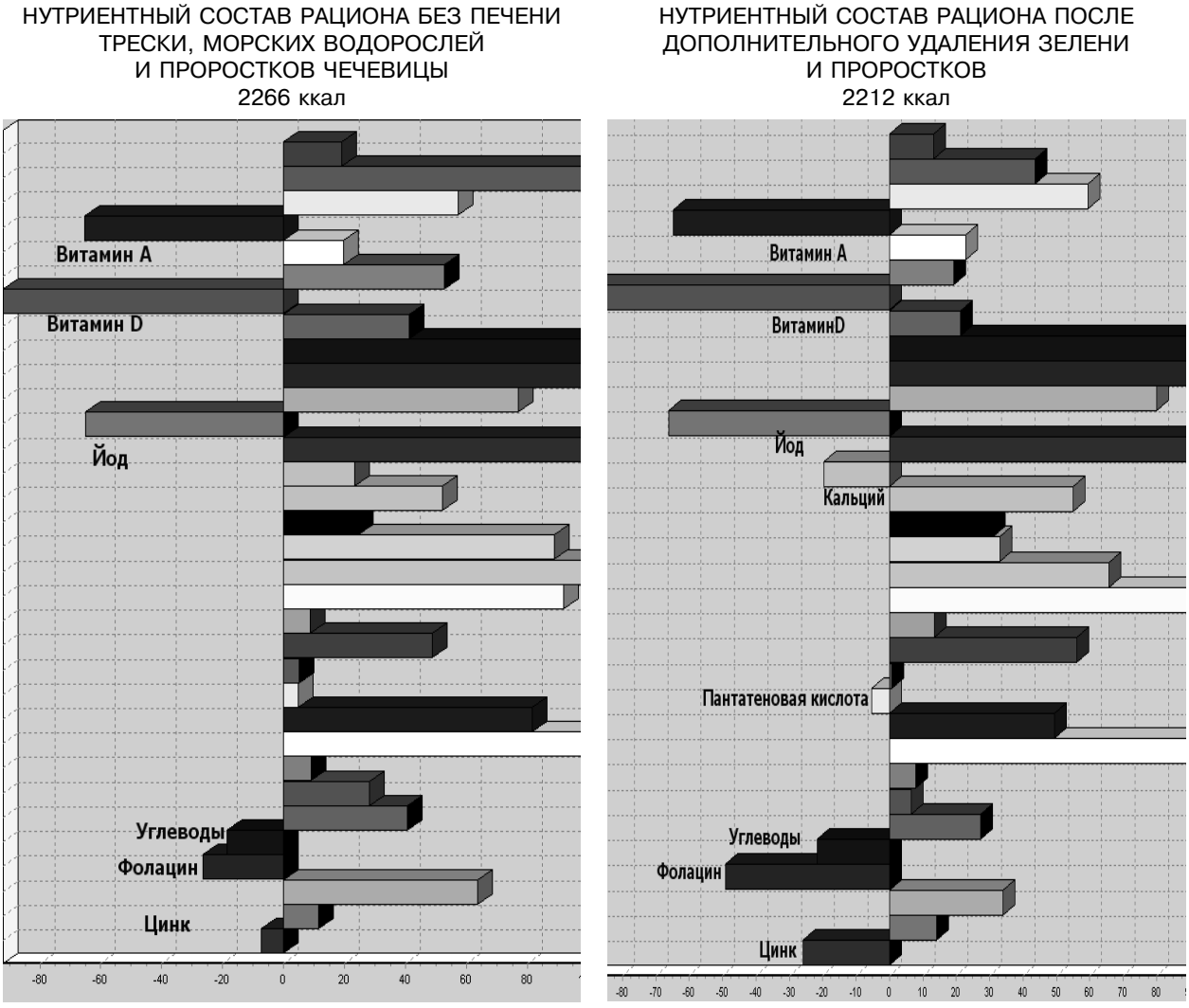


Рис.4 . Белки – 1, бета-каротин – 2, валин – 3, витамин A – 4, витамин B12 – 5, витамин B6 – 6, витамин D – 7, витамин E – 8, витамин C – 9, железо – 10, изолейцин – 11, йод – 12, калий – 13, кальций – 14, лейцин – 15, липиды – 16, магний – 17, марганец – 18, мононенасыщенные жирные кислоты – 19, насыщенные жирные кислоты – 20, натрий – 21, ниацин – 22, пантотеновая кислота – 23, пищевые волокна – 24, полиненасыщенные жирные кислоты – 25, рибофлавин – 26, селен – 27, тиамин – 28, углеводы – 29, фолацин – 30, фосфор – 31, хром – 32, цинк – 33.

Табл. 1

Прототип здорового полноценного недельного рациона с энергетической ценностью 2470 ккал

Группа продуктов	Название продукта	Вес в граммах
Зерновые, бобовые и картофель	Горох	200
	Картофель	2000
	Крупа гречневая	300
	Хлеб	700
Проростки	Ростки пшеницы	200
	Проростки чечевицы	200
	Проростки подсолнуха	100
Овощи, зелень, грибы и орехи	Базилик сухой	100
	Шампиньоны свежие	500
	Лук зеленый	500
	Лук репчатый	500
	Морковь	500
	Зелень петрушки	200
	Свекла	500
	Ядро ореха грецкого	100
Мясные продукты и яйца	Курица	350
	Яйца куриные	200
Молочные продукты	Молоко или кефир 3.2% жирности	2000
	Сыр	210
	Сметана 20% жирности	140
Рыба и морепродукты	Ламинария	100
	Печень трески	200
	Скумбрия	200
	Хек	500
Жировые продукты	Масло сливочное 82.5%	70
	Масло подсолнечное	70
	Масло оливковое	210
Фрукты	Яблоки	2000
Другие продукты	Сахар	250
	Мед	100
	Чай черный байховый	100
	Соль	21

вина, тиамина значительно снизились, что существенно повышает риски ХНИЗ.

Здесь следует заметить, что кажущееся увеличение содержания некоторых нутриентов, например хрома, объясняется последовательным понижением калорийности рациона, так как, если его калорийность упала, а количество какого–то нутриента не изменилось, то создается ложное впечатление увеличения этого нутриента в рационе.

Результаты нашего числового эксперимента показывают, что определенный ряд пищевых продуктов следует отнести к ключевым элементам полноценного по микронутриентам здорового питания, которые необходимо включать в привычный рацион. К этим продуктам относятся проростки зерновых, бобовых и семян, многие из которых широко распространены и вполне доступны; продукты богатые витамином D. К наиболее доступным можно отнести печень трески и рыбий жир; йодосодержащие морепродукты, например ламинария; свежая и сушеная зелень, которая должна использоваться в достаточно большом количестве. Также рекомендуется использовать в рационе оливковое масло, которое хоть и не является незаменимым для достижения нормативной нутриентной плотности рациона, но играет важную и еще недостаточно изученную роль в Средиземноморской диете, представляющей собой целостное явление, из-за гармоничного сочетания многих элементов [2]. Другие продукты не менее важны, но обладают взаимозаменяемостью в своей продуктовой группе или даже между группами. Например, мясные и молочные продукты, овощи и фрукты часто относят к взаимозаменяемым [24].

Числовой эксперимент не только подтверждает тот факт, что многие продукты внутри групп являются взаимозаменяемыми, но и показывает, что варьирование многих продуктов внутри групп не

оказывает существенного значения не только на макронутриентный, но и на микронутриентный состав рациона. Поэтому, взяв за основу предложенный рацион и варьируя продукты внутри пищевых групп, а также выделив проростки в отдельную пищевую группу, можно составлять индивидуальные здоровые рационы без использования процедуры оптимизации и других сложных вычислений. Для этого достаточно соблюдать предложенные принципы формирования рациона, использовать правила взаимозаменяемости продуктов, ориентироваться на количество продуктов в каждой пищевой группе разработанного оптимального рациона и пропорционально изменять это количество в соответствии с индивидуальной потребностью в энергетической ценности рациона. Список продуктов наиболее простого из таких рационов, который предлагается, как прототип оптимального рациона, представлен в виде набора продуктов для одного человека на неделю и приведен в табл. 1.

Нутриентный состав этого рациона является полноценным и мало отличается от оптимального, приведенного на рис.3. Этот пример может быть использован как прототип формирования индивидуальных оптимальных рационов.

2. Обсуждение и интерпретация результатов

В этом исследовании нами создан оптимальный недельный рацион, как пример здорового профилактического питания, основанного на продуктах, наиболее употребляемых населением РФ. Особенность нашего примера оптимизации диеты заключается в том, что мы избегаем обработанных и необязательных продуктов питания.

Принципиально новым в этом примере является использование проросших зерен, а также повышенное потребление листовой зелени. Хотя пищевая ценность проросших зерен доказывалась и обсуждалась в научной литературе в течение длительного времени [12 – 15], их практическое использование в России сильно отстает, и эту ситуацию необходимо менять.

Наиболее популярными среди проростков являются семена злаков, бобовых, масличных культур и крестоцветных. К ним относятся семена чечевицы, сои, брокколи, люцерны, редиса, подсолнечника, кресс-салата, тыквы, маша, а также лука и чеснока. Некоторые из них считаются особо ценными, особенно брокколи, редис, чечевица и их рекомендуется употреблять ежедневно в качестве «суперфудов» или функциональной пищи в целях профилактики ХНИЗ [12]. Количество видов растений, годных к употреблению в виде проростков или микрозелени, очень большое. Они отличаются не только химическим составом, но и вкусовыми качествами, поэтому регулярное использование этих продуктов обеспечивает разнообразие питания и удовлетворение различных индивидуальных потребностей.

Заключение

На примере реконструкции и оптимизации продуктового набора, представленного в рекомендациях МЗ РФ, показана возможность разработки недорогих полноценных профилактических и геропротекторных рационов, представимых в виде индивидуального недельного продуктового набора. Компьютерная оптимизация рациона и использование пророщенных зерен позволили избежать отклонения нутриентного состава рациона от официально рекомендованных нормативов.

Показана возможность простой модификации этого рациона, позволяющая обеспечить удовлетворение индивидуальных потребностей и предпочтений, а также учитывать доступность продуктов питания.

Показано, что такие продукты питания как проростки зерновых, бобовых и семян, продукты богатые витамином D, йодосодержащие морепродукты, свежая и сушеная зелень, а также специи относятся к ключевым элементам здорового питания, так как их отсутствие в рационе затрудняет достижение или даже не позволяет обеспечить нутриентную плотность рациона, соответствующую рекомендованным нормативам.

Предложенный недельный продуктовый набор представлен в виде, удобном для формирования периодических закупок и может служить прототипом для создания индивидуальных продуктовых наборов без проведения оптимизации и других сложных вычислений. Для этого достаточно соблюдать общие принципы формирования рациона, придерживаться рекомендованного количества продуктов в каждой пищевой группе и пропорционально изменять это количество в соответствии с индивидуальной потребностью в энергетической ценности (калорийности) рациона. Важно подчеркнуть, что использование пророщенных зерен является обязательным фактором создания подобных продуктовых наборов.

Литература

1. *Тутельян В.А., Герасименко Н.Ф., Никитюк Д.Б., Погожева А.В.* Оптимальное питание – основа здорового образа жизни // Здоровье молодежи: новые вызовы и перспективы. М: Научная книга. 2019. Т. 3. С. 228-249.

2. *García-Montero C, Fraile-Martínez O, Gómez-Lahoz AM, et al.* Nutritional Components in Western Diet Versus Mediterranean Diet at the Gut Microbiota-Immune System Interplay. Implications for Health and Disease. Nutrients. 2021;13(2):699. doi:10.3390/nu13020699.ë
3. *Gombart AF, Pierre A, Maggini S.* A Review of Micronutrients and the Immune System-Working in Harmony to Reduce the Risk of Infection. Nutrients. 2020, 12(1):236. https://doi:10.3390/nu12010236.
4. *Марченкова Л.А., Макарова Е.В., Юрова О.В.* Роль микронутриентов в комплексной реабилитации пациентов с новой коронавирусной инфекцией COVID-19 // Вопросы питания. 2021. Т 90, № 2. С. 40-49. doi:// http:org/10.33029/0042-8833-2021-90-2-40-49
5. *Christ A, Lauterbach M, Latz E.* Western Diet and the Immune System: An Inflammatory Connection. Immunity. 2019;51(5):794-811. doi:10.1016/j.immuni.2019.09.020
6. *Переверзев А.П., Романовский Р.Р., Шаталова Н.А. Остроумова О.Д.* Инфламэйджинг: воспаление и оксидативный стресс как причина старения и развития когнитивных нарушений. Медицинский совет. 2021. №4. С. 48-58. doi: 10.21518/2079-701X-2021-4-48-58.
7. *Батурин А.К., Мартинчик А Н., Камбаров А.О.* Структура питания населения России на рубеже XX и XXI столетий // Вопросы питания. 2020. Т. 89. № 4. С. 60-70. DOI: https://doi.org/10.24411/0042-8833-2020-10042
8. *Коденцова В.М., Вржесинская О.А., Рисник Д.В., Никитюк Д.Б., Тутельян В.А.* Обеспеченность населения России микронутриентами и возможности ее коррекции. Состояние проблемы // Вопросы питания. 2017. Т. 86. № 4. С. 113-124.
9. *Iddir M. Brito A. Dingeo G. Fernandez Del Campo S.S. Samouda H. La Frano M.R. Bohn T.* Strengthening the Immune System and Reducing Inflammation and Oxidative Stress through Diet and Nutrition: Considerations during the COVID-19 Crisis. Nutrients. 2020. 12 (6), E1562. https://doi.org/10.3390/nu12061562.
10. *Ames BN.* Prolonging healthy aging: Longevity vitamins and proteins. Proc Natl Acad Sci U S A. 2018;115(43):10836-10844. doi:10.1073/pnas.1809045115
11. *Féart C.* Dietary Supplements: Which Place between Food and Drugs?. Nutrients. 2020;12(1):204. Published 2020 Jan 13. doi:10.3390/nu12010204
12. *Wojdyło A., Nowicka P., Tkacz K., Turkiewicz IP.* Sprouts vs. Microgreens as Novel Functional Foods: Variation of Nutritional and Phytochemical Profiles and Their In Vitro Bioactive Properties. Molecules. 2020;25(20):E4648. doi:10.3390/molecules25204648
13. *Choe U., Yu LL., Wang TTY.* The Science behind Microgreens as an Exciting New Food for the 21st Century. J Agric Food Chem. 2018;66(44):11519-11530. doi:10.1021/acs.jafc.8b03096
14. *Benincasa P., Falcinelli B., Lutts S., Stagnari F., Galieni A.* Sprouted Grains: A Comprehensive Review. Nutrients. 2019;11(2):421. doi:10.3390/nu11020421
15. *Benincasa P., Falcinelli B., Lutts S., Stagnari F., Galieni A.* Sprouted Grains: A Comprehensive Review. Nutrients. 2019;11(2):421. Published 2019 Feb 17. doi:10.3390/nu11020421
16. Приказ Минздрава России от 19.08.2016 № 614 (ред. от 01.12.2020 г. https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=381786
17. *Потемкина Н.С.* Проблема здорового питания и возможности ее решения с помощью современных компьютерных технологий. Вестник восстановительной медицины. 2008. № 5. С. 63-67.
18. *Крутько В.Н., Донцов В.И., Потемкина Н.С.* Оптимизация профилактических рационов питания с помощью компьютерной системы «Питание для здоровья и долголетия». Учебное пособие для врачей. М.: НГЦ. 2007. 24 с.
19. *Скурихин И.М., Тутельян В.А.* ред. Химический состав Российских продуктов питания. Справочник. М.: ДеЛи принт. 2002.
20. USDA National Nutrient Database for Standard Reference. Available at: https://fdc.nal.usda.gov/index.html (Accessed 21.10.2021).
21. Методические рекомендации МР 2.3.1.0253-21 «Нормы физиологических потребностей в энергии и пищевых веществах для различных групп населения Российской Федерации» Available at: https://base.garant.ru/402816140/ (дата обращения 23.11.2022).
22. МР 2.3.1.19150-04. Рекомендуемые уровни потребления пищевых и биологически активных веществ. http://www.consultpharma.ru/index.php/ru/documents/fs/615-mr2-3-1-19150-04?start=6 (дата обращения 23.11.2022).
23. *Kunnumakkara AB., Sailo BL., Banik K. et al.* Chronic diseases, inflammation, and spices: how are they linked? J Transl Med. 2018,16(1):14. https://doi:10.1186/s12967-018-1381-2.
24. *Барановский А.Ю.* под ред. Диетология. 5-е изд. / А.Ю. Барановский. Санкт-Петербург: Питер. 2017. 1104 с. ISBN 978-5-496-02276-7. URL: https://ibooks.ru/bookshelf/354382/reading (дата обращения: 31.11.2022).

Потемкина Наталия Серафимовна. Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» РАН, г. Москва. Старший научный сотрудник. Кандидат биологических наук. Область научных интересов: информационные технологии, здоровый образ жизни, экология. E-mail: nspotyomkina@mail.ru (Ответственный за переписку).

Крутько Вячеслав Николаевич. Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» РАН, г. Москва. Заведующий отделом. Доктор технических наук, кандидат биологических наук, профессор. Область научных интересов: медицинская информатика и компьютерные системы для оценки и прогноза здоровья и старения. E-mail: krutkovn@mail.ru.

Information technology for the development of optimal healthy diets

N.S. Potemkina, V.N. Krut'ko

Federal Research Center "Computer Science and Control" of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Abstract. A method has been developed for the formation of diverse, full–fledged, preventive for most chronic non-communicable diseases – the main causes of death, geroprotective weekly diets using the linear optimization procedure and numerical experiment. Based on this method, a prototype of a diet for healthy and preventive nutrition that meets the dietary requirements and regulations of the Russian Federation is proposed. The usefulness of the nutrient composition of the diet is achieved without the use of dietary supplements, but with the mandatory inclusion of sprouted grains in the diet. The prototype is a set of food for one person for a week. Based on it, the user can easily make complete personal diets without using computer optimization procedures.

Keywords: *preventive, geroprotective, healthy nutrition, optimal diet, dietary supplements, sprouted grains, numerical experiment*.

DOI: 10.14357/20790279230311

References

1. *Tutel'yan V.A., Gerasimenko N.F., Nikityuk D.B., Pogozheva A.V.* Optimal'noe pitanie – osnova zdorovogo obraza zhizni // Zdorov'e molodezhi: novye vyzovy i perspektivy. T.3. M: Nauchnaya kniga. 2019. P. 228-249. (in Russian)
2. *García-Montero C., Fraile-Martínez O., Gómez-Lahoz AM. et al.* Nutritional Components in Western Diet Versus Mediterranean Diet at the Gut Microbiota-Immune System Interplay. Implications for Health and Disease. Nutrients. 2021;13(2):699. doi:10.3390/nu13020699
3. *Gombart AF., Pierre A., Maggini S.* A Review of Micronutrients and the Immune System-Working in Harmony to Reduce the Risk of Infection. Nutrients. 2020,12(1):236. https://doi:10.3390/nu12010236.
4. *Marchenkova L.A., Makarova E.V., YUrova O.V.* Rol' mikronutrientov v kompleksnoj reabilitacii pacientov s novoj koronavirusnoj infekciej COVID-19 // Voprosy pitaniya.[Problems of Nutrition] 2021. T 90, № 2. P. 40-49. DOI:// http:org/10.33029/0042-8833-2021-90-2-40-49 (in Russian)
5. *Christ A., Lauterbach M., Latz E.* Western Diet and the Immune System: An Inflammatory Connection. Immunity. 2019;51(5):794-811. doi:10.1016/j.immuni.2019.09.020
6. *Pereverzev A.P., Romanovskij R.R., SHatalova N.A. Ostroumova O.D.* Inflamejdzhing: vospalenie i oksidativnyj stress kak prichina stareniya i razvitiya kognitivnyh narushenij. Medicinskij sovet [Medical Council]. 2021;(4):48-58. DOI: 10.21518/2079-701X-2021-4-48-58. (in Russian).
7. *Baturin A.K., Martinchik A N., Kambarov A.O.* Struktura pitaniya naseleniya Rossii na rubezhe HKH i HKHI stoletij // Voprosy pitaniya.[Problems of Nutrition]. 2020. T. 89. № 4. P. 60-70. DOI: https://doi.org/10.24411/0042-8833-2020-10042 (in Russian)
8. *Kodencova V.M., Vrzhesinskaya O.A., Risnik D.V., Nikityuk D.B., Tutel'yan V.A.* Obespechennost' naseleniya Rossii mikronutrientami i vozmozhnosti ee korrekcii. Sostoyanie problemy // Vopr. pitaniya[Problems of Nutrition] . 2017. T. 86, № 4. P. 113-124. (in Russian).
9. *Iddir M., Brito A., Dingeo G., Fernandez Del Campo S.S., Samouda H., La Frano M.R., Bohn T.* Strengthening the Immune System and Reducing Inflammation and Oxidative Stress through Diet and Nutrition: Considerations during the COVID-19 Crisis. Nutrients 2020, 12 (6), E1562. https://doi.org/10.3390/nu12061562.

10. *Ames BN.* Prolonging healthy aging: Longevity vitamins and proteins. Proc Natl Acad Sci U S A. 2018; 115(43):10836-10844. doi:10.1073/pnas.1809045115
11. *Féart C.* Dietary Supplements: Which Place between Food and Drugs? Nutrients. 2020; 12(1):204. Published 2020 Jan 13. doi:10.3390/nu12010204
12. *Wojdyło A., Nowicka P., Tkacz K., Turkiewicz IP.* Sprouts vs. Microgreens as Novel Functional Foods: Variation of Nutritional and Phytochemical Profiles and Their In Vitro Bioactive Properties. Molecules. 2020;25(20):E4648. doi:10.3390/molecules25204648
13. *Choe U., Yu LL., Wang TTY.* The Science behind Microgreens as an Exciting New Food for the 21st Century. J Agric Food Chem. 2018; 66(44):11519-11530. doi:10.1021/acs.jafc.8b03096
14. *Benincasa P., Falcinelli B., Lutts S., Stagnari F., Galieni A.* Sprouted Grains: A Comprehensive Review. Nutrients. 2019;11(2):421. doi:10.3390/nu11020421
15. *Benincasa P., Falcinelli B., Lutts S., Stagnari F., Galieni A.* Sprouted Grains: A Comprehensive Review. Nutrients. 2019;11(2):421. Published 2019 Feb 17. doi:10.3390/nu11020421
16. Prikaz Ministerstva zdravoohraneniya RF ot 19 avgusta 2016 g. № 614 "Ob utverzhdenii Rekomendacij po racional'nym normam potrebleniya pishchevyh produktov, otvechayushchih sovremennym trebovaniyam zdorovogo pitaniya".(in Russian) Available at:https://baybuga-school.ru/doc/PrikazMINZDRAV.pdf (accepted 13.06.2022).
17. *Potemkina N.S.* Problema zdorovogo pitaniya i vozmozhnosti ee resheniya s pomoshch'yu sovremennyh komp'yuternyh tekhnologij [The problem of healthy nutrition and the possibility of its solution with the help of modern computer technologies.] //Vestnik vosstanovitel'noj mediciny [Bulletin of Rehabilitation Medicine]. 2008. N5. P. 63-67. (in Russian)
18. *Krut'ko V.N., Doncov V.I., Potemkina N.S.* Optimizaciya profilakticheskih racionov pitaniya s pomoshch'yu komp'yuternoj sistemy «Pitanie dlya zdorov'ya i dolgoletiya». Uchebnoe posobie dlya vrachej. M.: NGC, 2007. 24 str. (in Russian)
19. *Skurihin I.M., Tutelyan V.A.* Himicheskij sostav rossijskih produktov pitaniya [Chemical composition of Russian food products]. 2002. (in Russian).
20. USDA National Nutrient Database for Standard Reference. Available at: https://fdc.nal.usda.gov/index.html (Accessed 21.10.2021).
21. Metodicheskie rekomendacii MP 2.3.1.0253-22 "Normy fiziologicheskih potrebnostej v energii i pishchevyh veshchestvah dlya razlichnyh grupp naseleniya Rossijskoj Federacii" [Guidelines MP 2.3.1.0253-21 "Norms of physiological needs for energy and nutrients for various groups of the population of the Russian Federation"](in Russian).
22. MP 2.3.1.19150-04. Rekomenduemye urovni potrebleniya pishchevyh i biologicheski aktivnyh veshchestv[Recommended levels of consumption of food and biologically active substances.]. http://www.consultpharma.ru/index.php/ru/documents/fs/615-mr2-3-1-19150-04?start=6 (accepted 23.11.2022). (in Russian).
23. *Kunnumakkara AB., Sailo BL., Banik K. et al.* Chronic diseases, inflammation, and spices: how are they linked? J Transl Med. 2018, 16(1):14. https://doi:10.1186/s12967-018-1381-2.
24. *Baranovskij A.YU.* pod red. Dietologiya. 5-e izd. / A.YU. Baranovskij. Sankt-Peterburg: Piter,2017. 1104 c. ISBN 978-5-496-02276-7. URL: https://ibooks.ru/bookshelf/354382/reading (accepted: 31.11.2022) (in Russian).

Potemkina Natalia Serafimovna. Federal Research Center "Computer Science and Control" of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia. Senior researcher, Candidate of Biological Sciences. Number of publications: 99. Research interests: information technology, healthy lifestyle, ecology. E-mail: nspotyomkina@mail.ru (Responsible for correspondence).

Krut'ko Vyacheslav Nikolaevich, Federal Research Center "Computer Science and Control" of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia. Head of the Department, Doctor of Technical Sciences, Candidate of Biological Sciences, Professor. Number of printed works: 346 (including 15 monographs). Research interests: medical informatics and computer systems for the assessment and control of health and aging. E-mail: krutkovn@mail.ru.

Моделирование двух региональных эпидемических ситуаций и анализ факторов повторных волн COVID-19*

А.Ю. Переварюха

Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук, г. Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Цель работы – модельное описание локальных эффектов специфических сценариев волнообразной эпидемической динамики. Предложены уравнения с запаздыванием для сложных форм колебательной динамики, правые части которых дополнены ситуативными функциями затухания волн эпидемии. Получены численные решения и разрушающихся, и затухающих колебаний с возможностью новой вспышки, что позволило описать возникший в 2022 г. в двух регионах эффект одиночной экстремальной волны после увеличения длины активных цепочек заражений, – возникновения резкого пика заражений с быстрым колебательным затуханием. Модельные сценарии существенно отличается от других сценариев волн локальных эпидемий – длительной серии коротких по времени пиков с последовательно возрастающей амплитудой, как в Японии и в Австралии. С 2023 г. ключевым становится иммунологический фактор – гетерогенности эпитопов популяции лимфоцитов CD8.

Ключевые слова: *системный анализ эпидемических факторов, дифференциация региональных эпидемий, цепочки заражений, колебательные режимы случаев заражения, уравнения с запаздыванием, активные мутационные зоны, сценарии разрушения циклических траекторий.*

DOI: 10.14357/20790279230312

Читатели избавят меня от
излишней обязанности описывать развязку.
А.С. Пушкин. Барышня-крестьянка.

Введение

Наиболее интересные стремительные экстремальные процессы в биофизических взаимодействиях чрезвычайно вариативные и генерируют аномальные варианты развития: колебательные и хаотические режимы [1]. Системный анализ быстрых явлений, как коллапс биоресурсов, инвазионная вспышка нового для среды опасного вида или эпидемическая волна принципиально не имеет единого верного подхода [2]. Методология системного анализа кризисных ситуаций биодинамики [3] разнообразна в пространстве параметров [4]. К явлениям с нестабильными режимами и резкими изменениями относятся и биологические инвазии в широком смысле [5], в том числе эпидемии, вызванные мутирующим возбудителем и иммунный ответ при нарушении механизмов экспрессии его регуляторов. Завершить статью по теме анализа актуальной эпидемической динамики сложно, так как постоянно обновляется информация об обнаружении новых штаммов, параметрах их трансмиссивности, вирулентности, доле бессимптомного носительства, времени от заражения до выделения вирионов. Быстро устаревают графики с трендами эпидемической динамики и признаками начала новых волн заражений в ряде стран, которые продолжают публиковать адекватную информацию о ситуации. После полугодовой паузы весной 2023 г. эпидемическая обстановка обострилась в Южной Индии и Индокитае. Регулярно публикуются новые работы о важных клинических свойствах выявленных штаммов коронавируса, прогнозах эволюции, особенностях иммунного ответа и эффективности выработанных ранее нейтрализующих антител. Автор продолжает следить за изменением доли новых штаммов в числе заражений и на конец июля 2023 г. рекомбинантного и явно доминирующего штамма не наблюдается.

Влияние событий, возникающих при выполнении некоторых заданных условий (изменений трансмиссивности штаммов и способности их

* Работа выполнена в рамках проекта РНФ № 23-21-00339 в СПб ФИЦ РАН.

уклонения от антител) можно описывать, например, предикативными гибридно-событийными моделями [6] в сценариях, но для этого нужна вычислительная структура, проверяющая выполнение условий эволюции, что выглядит слишком искусственно. Даже спустя 3 года нельзя точно прогнозировать начало новых волн заражений продолжающихся локальных эпидемии COVID-19. Динамика определяется событиями, где число передачи нового штамма становится много выше оцененного среднего. Созданы несколько исследовательских центров, целенаправленно занятых прогнозированием коронавирусной активности, но при этом локальные вспышки (как в конце апреля в Непале) все равно оказываются для властей неожиданными. Альтернативный вариант анализа ситуаций – классификация наблюдаемых вариантов изменения заболеваемости и подбор модели под данный сценарий с нужными нелинейными эффектами. Сопоставительный подход даст средство прогнозирования по некоторому шаблону графиков, сходству с определенным типом сценария эпидемии, но многие сценарии оказываются уникальными с точки зрения набора нелинейных эффектов. Сходных вариантов развития эпидемических ситуаций мы выявили достаточно, но в работе сосредоточим внимание на двух необычных изменениях динамики.

Будем исходить из трактовки, что в основе смены трендов развития/затухания волн эпидемии лежат четыре компоненты: 1) активация передачи с появлением вирулентной эволюционной ветви; 2) миграции в среду зараженных носителей; 3) запаздывающая выработка иммунной устойчивости; 4) частичная потеря иммунной устойчивости в популяции, связанная с вероятностными аспектами ответа. Два компонента мы рассмотрим в модельных сценариях феноменологически, используя функции регуляции с запаздывающим противодействием, – ориентируясь на системный анализ ситуаций. Модели предназначены для сравнения сценариев и рассчитаны на вычислительные мощности обычного компьютера с инструментальной средой Rand Model Designer, поддерживающей современную библиотеку численных методов.

1. Свойства эпидемической динамики современного этапа распространения COVID

Каждая эволюционная ветвь тестирует популяционный иммунитет на функциональность. В результате противоборства мы наблюдаем на графиках сложные колебательные режимы заболеваемости: серии быстрых волн (Япония, Бельгия), затухающие колебания (ЮАР, Новая Зеландия) или единичные отдельно стоящие пики (отдельные мегаполисы, как Нью-Йорк).

Если в начальных стадиях пандемии 2020 г. в большинстве стран (помимо изолировавшихся «островных» регионов Австралии, Новой Зеландии) наблюдалась схожая динамика развития первичной вспышки. После глобальной волны Omicron в марте-апреле 2022 г. все более становились очевидны существенные качественные отличия трендов и несинхронность пиков локальных эпидемических графиков даже в странах одного географического региона (рис. 1).

В одних странах в апреле 2023 г. продолжается уменьшение заражений, но в Дании и в Австралии начинается новая локальная волна заражений просто как часть автономного колебательного процесса. Пики волн заражений регионов не имеют больше синхронности и более того, теперь максимумы заражений не синхронизированы с пиками числа летальных случаев. В странах примерно одинаковый высокий уровень вакцинированного населения. Статистика госпитализации и смертности из-за сосуществующего спектра обновленных штаммов SARS-COV-2 в 2023 г. еще существеннее различаются в странах, которые в начале пандемии в марте 2020 г. были в схожих условиях. В Японии ожидают девятою волну.

Более того, сейчас в Австралии и Канаде графики динамики случаев заражения и частоты госпитализации не синхронные. Общее число случаев уменьшается, но среднее число госпитализированных не снижается. Проблема современного этапа пандемии COVID – тяжелые формы повторных инфекций как системные заболевания с поражением и нервной и иммунной системы. Белки SARS-COV-2 проникают в клеточное ядро [7] и влияют на экспрессию наших интерферонных механизмов, что приводит к дисрегуляции иммунного ответа, и далее часто к опасному скачкообразному выбросу цитокинов. Перенесенный COVID вызывает иммуносупрессию как «постковидный иммунодефицит», в результате длительного заболевания оказывается сильно истощена популяция Т-лимфоцитов хелперов с рецептором CD4. В результате те, кто тяжело переболел, заболевают снова. По причине иммуносупрессии некоторые перенесшие в 2020 г. болели COVID много раз (знаем случаи заболеваний 5 раз с положительным ПЦР). Это нарушает схему перехода SIR-модели, так как переболевшие в сложной форме с побочной иммуносупрессией становятся не «иммунными», но особенно восприимчивыми «группой риска», уже через довольно короткий срок снижения титра антител.

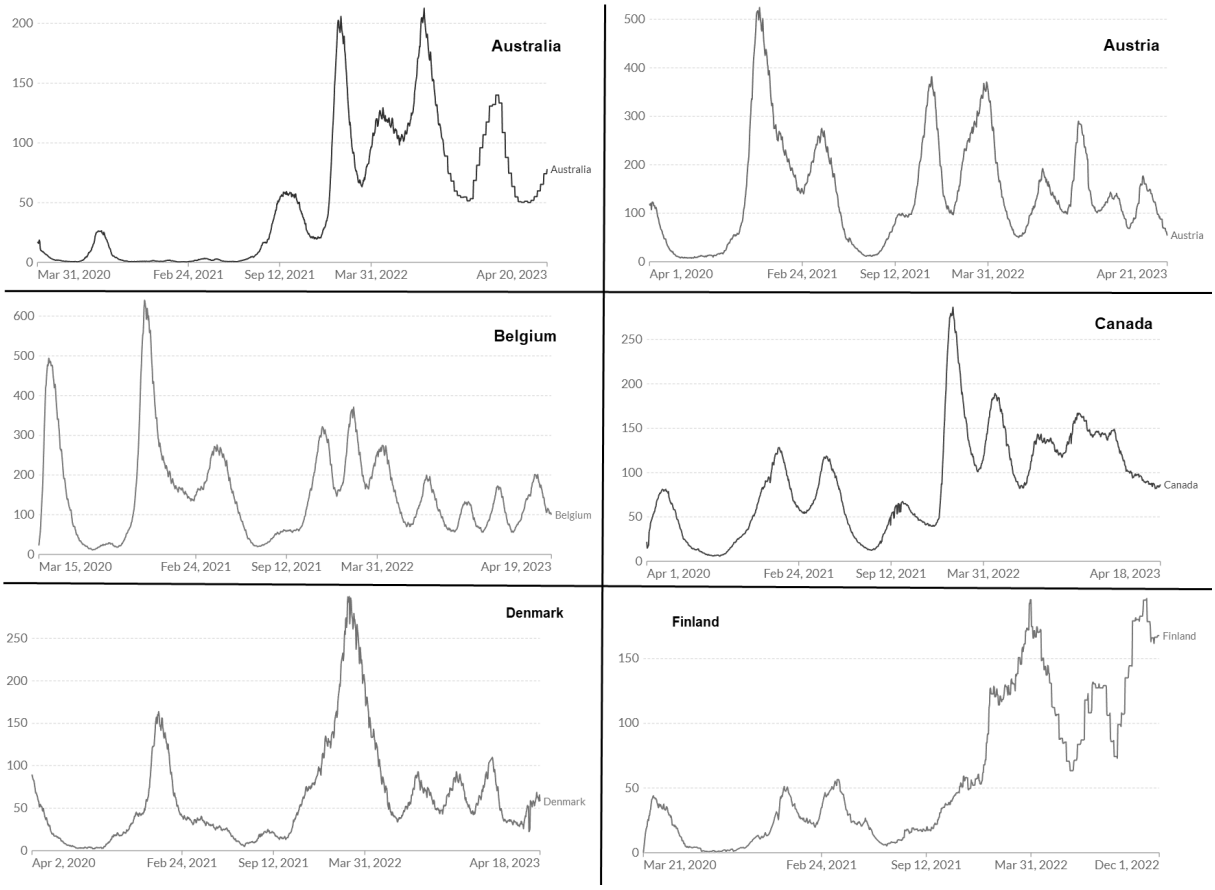


Рис. 1. Разнообразие динамики волн случаев заражения COVID-19 в 6 странах в 2020-2023 гг. в расчете на 1 млн населения по данным https://ourworldindata.org/coronavirus

Перспектива работ по вакцинации – действие на опережение. Теперь мы лучше понимаем вектор изменчивости вируса, где конкурируют эволюционные ветви. Причина быстрых мутаций вируса оказалась скрыта в наших клетках, – APOBEC фермент редактирования мРНК с противовирусными функциями только вносит неслучайные изменения в РНК вируса [8], но активность антивирусных цитидиндеаминаз в различных субпопуляциях различная. Жители Юго-Восточной Азии традиционно считаются устойчивыми к ряду эндемичных для региона вирусов по сравнению с европейцами. Чтобы выживать в таких условиях, актуально иметь постоянно экспрессируемые противовирисуные эндонуклеазы и цитидиндеаминазы. Это объясняет, почему среди регионов, где впервые отмечено обособление новых эволюционных ветвей (не просто отдельных тревожных штаммов) на филогенетическом древе разнообразия коронавируса неслучайно лидируют Индокитай и ЮАР из-за плотности населения и распространения в субпопуляции ВИЧ, что способствует длительному заболеванию. Отбор мутаций стал многофакторным процессом, где вакцинный иммунитет тоже играет роль. Ветви эволюции SARS-COV-2 появляются скачкообразно. Omicron получил сразу 15 аминокислотных мутаций, расположенных в рецептор-связывающем домене (RBD), мишени вакцинных антител.

2. Проблемы многофакторной коэволюции и событий суперраспространения

Прогнозы завершения пандемии с применением моделирования потерпели неудачу из-за последовательности новых COVID-волн, что признали авторы в [10]. В [11] приведен разбор неудачного применения эпидемической модели, что применялась при прогнозировании потребностей системы здравоохранения в США и давала оптимистичные прогнозы.

Исходно SIR-модель описывала локальные вспышки ОРВИ и без повторных волн. Даже в удаленной Новой Зеландии к июлю 2023 г. началась 4-я COVID-волна. Многие модификации SIRS-моделей даже на основе расширенного набора системы уравнений (MSEIR) не смогут

учитывать важные особенности современной пандемии. В [12] показана неэффективность SIRS-концепции на примере данных локальных вспышек COVID, но это ожидаемо, так как специалисты при построении прогностических моделей завершения пандемии в 2020 г. еще не понимали, с какой проблемой они столкнулись в этот раз. Сценарий с генерацией серий эпидемических волн не удалось получить в усовершенствованной модели в [13], но подобных примеров можно привести десятки, что затрудняет поиск среди массы работ по теме необычных моделей.

О примерах построений методологически различных моделей коронавирусной эпидемии уже написан ряд обзорных работ [14]. Принципиальная сложность формулируется известным афоризмом «нельзя объять необъятное». Достаточно очевидно, что в Нью-Йорке, Дели и Токио эпидемия будет развиваться по различным сценариям и одной моделью они не описываются. Слишком много региональных специфических факторов, поведенческих и иммунологических, но некоторые факторы удается учитывать в новейших версиях SEIR-моделей [15]. Далеко не все контактные с носителями были восприимчивы к исходному SARS-COV-2 (причина: один из нерешенных вопросов, вероятно перекрестный Т-клеточный иммунитет, вызванный контактом с другими представителями β-коронавирусов человека). В локальных субпопуляциях присутствие сезонных βHCoV различно. Исследования [16] серопревалентности выявляли SARS-COV-антитела у неконтактных с больными. Далеко не все переболевшие COVID и вакцинированные получили долгосрочный иммунитет, так как мутирующий вирус может нарушать выработку интерферонов и воздействовать на Т-клетки.

Помимо продолжающихся мутаций, появляющихся не единичными заменами аминокислот, но сериями «мутационными волнами», ключевая проблема прогноза – часто фиксируемые спорадические явления суперраспространительства. Одномоментные заражения запустили стремительно саму пандемию, так же как и многие другие ранее («испанка» началась с одного заразившегося солдата 4.03.1918, но на огромном мобилизационном пункте в Канзасе). Базовое репродуктивное число R_0 (число особей, заражаемых в среднем *носителем данного возбудителя в полностью неиммунизированном окружении)* для данного вируса слишком усредненный параметр. Показатель R_0 не поможет в прогнозах из-за частых случаев массовых заражений, но многие больные никого не заражают (интенсивность выделение вируса у инфицированных сильно различается). Оценки R_0 региона не всегда можно экстраполировать на другие страны.

Непредсказуемо (иногда по две в течение месяца) появляется новая подветвь у Омикрона и фиксируют «тревожные штаммы», которым дают личное имя: XBB.1.5 «Kraken», XBB.1.9.1 «Hyperion». Опасной летом 2023 г. считается ветвь XBB.1.16.x «Arcturus». Скорость эволюции пока не замедлилась, как это бывало с другими возбудителями [17]. Разрастание эволюционных ветвей показано на рис 2 – крайние штаммы ветви Omicron (BA.2.x, XBB, XBC) сосуществуют.

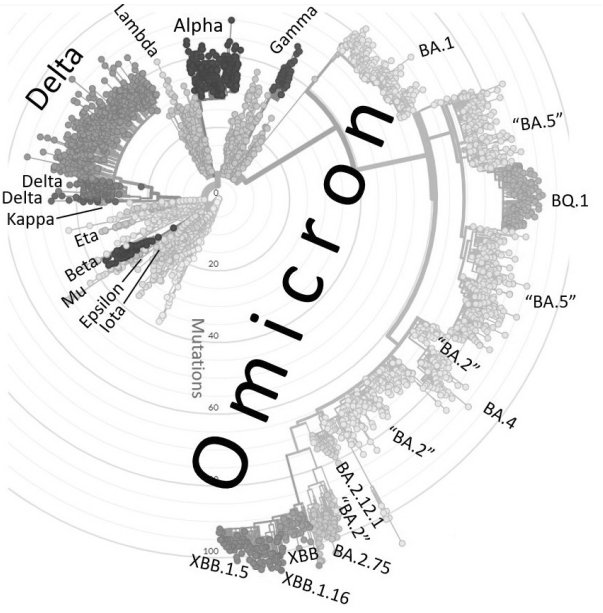


Рис. 2. Современное состояние эволюции и разнообразия вариантов коронавируса по данным проекта nextstrain.org, публикующего данные о геномах патогенных организмов

Диаграмма на рис. 2 регулярно дополняется, но общий тренд уже достаточно понятен. Очевидно, что эволюционные механизмы с появлением Omicron резко активизировались и продолжают генерировать новые ответвления и подварианты, большинство тупиковые, но отдельные дают новые ответвления серии мутаций. Создавать вакцины специально против этих ветвей штаммов нет смысла из-за быстроты их обновлений, но актуально исследовать для иммунизации именно консервативные антигены – «холодные пятна». В регионах Европы и Южной Азии не только различные тренды динамики заболеваемости, но преобладают сейчас и развиваются далее разные эволюционные Omicron-ветви коронавируса – BA, BQ и XBB.

3. Смены равновесия и волн в моделях развития эпидемических процессов

Для вычислительного описания перестроений характера колебательных режимов в системе «вирус/популяционный иммунитет» более подходят непрерывные модели. Сложное поведение амплитуды волн можно получить, не прибегая к построению систем большой размерности фазового пространства. Методы на основе уравнений с отклоняющимся аргументом в форме параметрических сценариев мы адаптируем для описания явлений, возникающих при качественных изменениях тренда развития эпидемии. Цель построения моделей – найти феноменологическое простое описание для сравнительного анализа и классификации ряда примеров эпидемической динамики COVID-волн как нетривиальной колебательной системы.

Рассмотрим особенности и различия динамики распространения вируса и трансформаций волн заболеваемости на примерах эпидемической динамки из нескольких стран, которые имеют общность с точки зрения интерпретации их свойств на основе поведения нелинейных динамических систем. Сопоставим разнообразие динамики волн локальных эпидемий, используя колебательные решения уравнений с отклоняющимся аргументом. С точки зрения анализа сложных переходных процессов интересна имитация сценариев с эффектом резкой смены трендов в количестве суточных случаев после стабилизации эпидемического процесса.

Отметим явления, выделяющиеся из обычных графиков. Возникновение весной 2021 г. экстремального роста суточных госпитализаций в Бразилии отличалось выраженным пиком после плавного затухания колебаний, образованных первичной вспышкой исходного штамма.

Сценарий вспышки в Бразилии штамма Gamma соответствует в нелинейной динамике бифуркации с катастрофической потерей установившегося равновесия системы. Для сценария можно предложить феноменологическую модель с пороговым эффектом. Сценарий с переходом плавного роста случаев к колебательной затухающей динамике и далее к новой фазе вспышки можно трактовать в теории как следствие качественных изменений в базовых характеристиках эпидемического процесса, которое можно отразить бифуркацией – метаморфозом фазового портрета. Вычислительный сценарий с описанием стремительного разрушения неустановившихся колебаний и новой неконтролируемой никакими мерами и барьерами вспышкой получим в уравнении с двумя влаченными запаздываниями $\tau>\tau_1$ и двумя пороговыми значениями *H, K* для развития процесса заражений:

$$\frac{dN}{dt} = R_0 N(t)\left(1-\frac{N(t-\tau)}{K}\right)\left(H - N(t-\tau_1)\right),$$

$$0 < H < K, N(0) < H, 0 < R_0, 0 < \tau_1 < \tau, \quad (1)$$

где увеличение базового репродуктивного числа R_0 у *мутирующего вируса* после фазы логистического роста больных приведет к возникновению из ранее устойчивого равновесия $N(t)$=H осцилляций числа ежедневных заражений. Мы сможем определить метаморфозы фазового портрета, соответствующие для данной ситуации без SIRS-системы, получив колебательную динамику, но которая оказывается переходной в моделях с запаздыванием с асимптотически неустойчивыми циклическими траекториями. Колебания далее уже без внешнего воздействия разрушаются при превышении их максимумом значения порога *K, но на самом деле изменение параметра распространяемости вируса в популяции* R_0 *произошло* гораздо раньше вспышки. Первый сомножитель в (1) заимствован из известной флуктуационной модели Райта-Хатчинсона [18] уравнения с запаздыванием. В решении модели после бифуркации при $r\tau=\pi/2$ следует появление из потерявшего устойчивость равновесия *K* гармонического цикла $N_*(t;r\tau>\pi/2)$ [19]. При увеличении $r\tau>2\ \pi$ решение модели Райта-Хатчинсона становится релаксационным циклом со все большой амплитудой и глубокими минимумами со свойством $\lim_{r\tau\to\infty} \min N_*(t;r\tau) = 0$ и резкими отдельно стоящими пиками. Затяжные минимумы не соответствуют наблюдаемой популяционной цикличности с разновеликими пиками [20]. Эпидемическая вспышка в обычном, не пандемическом сценарии – явление переходного процесса, часто сопровождаемая стадией с повторными увеличениями числа заражений, но всегда до стабилизации и затухания при увеличении доли иммунизированных. Уравнение (1) описывает сценарий перехода к стремительной вспышке после фазы первичного роста и колебаний, но необходимо добавить в правую часть (1) нелинейную функцию-демпфер для затухания вспышки $\Psi(N^k(t-\tau_1))$ в следующей форме:

$$\frac{dN}{dt} = R_0 F(N(t-\tau)) - \Psi(N^k(t-\tau_1)). \quad (2)$$

В 2023 г. по анализу графиков мониторинга нами выявлены три разных варианта локальной колебательной динамики эпидемического процесса. Отражающая варианты снижения амплитуды волн заболевания Ψ должна быть ситуативной. Предложим модель с $\Psi(N^k(t-\tau_1))$ для описания затухающих после вспышки, но возвращающихся

колебаний и без явного включения пороговых величин заболевших и общего числа восприимчивых в популяции:

$$\frac{dN}{dt} = R_0 N(t-\tau)\exp(-bN(t-\tau)) - q\frac{N^2(t-2\tau)}{A-N^3(t-\tau)}. \quad (3)$$

Из вычислительного анализа (3) можно подтвердить наблюдения, что не обязательно изменять ответственные за интенсивность передачи вируса параметры модели (R_0,τ) чтобы вызвать переход от фазы затухания к новой серии колебаний. Для реализации новой серии осцилляций в форме пиков с большой амплитудой (из-за новых цепочек заражений и массовых миграций больных) без новых штаммов (как было в ЮАР) в уравнении (3) достаточно вытолкнуть траекторию решения, находящуюся в режиме затухающих колебаний из окрестности равновесия – в фазе прохождения минимума цикла импульсным внешним воздействием:

$$N(t_{\min}+\varepsilon) = \min N_*(t;R_0\tau) + \Delta N, \left|\Delta N\right| \ll N(t). \quad (4)$$

В сценарии стремительно запускается новый переходный колебательный процесс с очевидным затуханием после 1-го пика. Сценарий подобного развития эпидемии отмечен в Нью-Йорке. В модели (3) равновесное состояние для затухающего цикла после окончания индуцированного нового переходного колебательного режима не изменяется, но это свойство решения можно изменить, модифицировав второе слагаемое в правой части (3).

С целью описания экстремальных вариантов колебательной динамики эпидемии мы предлагаем использовать в уравнении с запаздыванием $N(t–\tau)$ вместо квадратичной логарифмическую регуляцию с функцией $\Psi(N(t-\tau_1))$, определяющей затухание волны:

$$\frac{dN}{dt} = R_0 N(t)\ln\left(\frac{K-\sqrt{N(t)}}{N(t-\tau)}\right) - \Psi(N(t-\tau_1)). \quad (5)$$

Выбор функции Ψ в (5) определит динамику затухания после первичной вспышки. Выбираемая экспертами ситуативная функция $\Psi(N(t-\tau_1))$ предполагает использование пороговой величины иммунных А: $\Psi = q\frac{N(t-2\tau)}{A-N(t-\tau)}$, или для варианта затухания релаксационного цикла со снижающимся положением равновесия:

$$\Psi = q\frac{N^m(t-\tau_1)}{\left(A-N(t-\tau)\right)^k}, m<k.$$

Допустимо ис-пользование в правой части уравнения сразу двух независимых вариантов функций Ψ,Ψ_1 затухания колебательного процесса для описания нелинейного демпфирования и фактора стохастичности, когда вторая функция возмущена случайной величиной Ψ(γτ), что более актуально для анализа течения инфекции в организме.

Согласно нашему подходу к моделированию, фактор запаздывания, а точнее говорить о регуляции с последействием, отраженный записью $N(t–\tau)$ в уравнениях для биосистем, – характеристика не объекта, но процесса, возникающая при взаимодействии биологического объекта и конкурентной среды с данной скоростью возобновления ресурсов. В контексте эпидемии запаздывающая регуляция связана с двумя факторами, которые отражены в двух слагаемых правой части (3). Для эпидемических процессов запаздывание τ при репродукции естественно, так как всегда есть латентный период от заражения до начала активного распространения [21]. В ситуативной функции затухания Ψ с $N(t–\tau)$ феноменологически отражено накопление иммунной памяти в популяции при прошлых заражениях.

Разработанные уравнения с $N(t–\tau)$ и Ψ позволят описать отдельные переходные сценарии затухающих осцилляций разной формы и варианты с бифуркационными переходами к новым вспышкам. При грамотном выборе нелинейных эффектов моделей описательные возможности математического аппарата расширяются, но все варианты поведения получаемых решений будут ограничены в сравнении с реальностью. Нужно классифицировать варианты эпидемий.

Для респираторных инфекций в больших популяциях характерно именно образование эффекта эпидемических волн, как у пандемических штаммов гриппа (типичны для гриппа две волны). Для пандемии коронавируса в 2020 г. ожидалась специалистами схожая динамика из трех волн [22], но развитие стало сложнее чем у гриппа и при многообразии меняющихся колебательных форм. 8 волн было в отгораживавшей барьерами и тестированием Японии, 10 волн прошли в Бельгии, где в 2020 г. были худшие показатели по COVID смертности среди стран ЕС. Вариант, называемый «эпидемическое плато», оказывается достаточно редким сценарием. Истощение Т-лимфоцитов клеток CD4 у неоднократно переболевших сильно влияет [23] на достижение желанного уровня коллективного иммунитета и прогнозы завершения пандемии. В Новой Зеландии были три классические затухающие волны заболеваемости (рис. 3). Динамика повторных заражений носит симметрично противоположный характер (рис. 4).

Этот эффект сильно отличает эпидемический сценарий Новой Зеландии от большинства стран

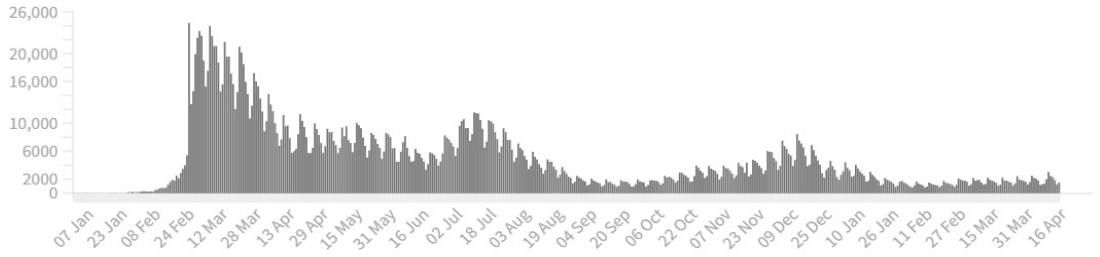


Рис. 3. Динамика четырех затухающих волн COVID в Новой Зеландии по сведениям www.rnz.co.nz/news/national/450874/covid-19-data-visualisations-nz-in-numbers

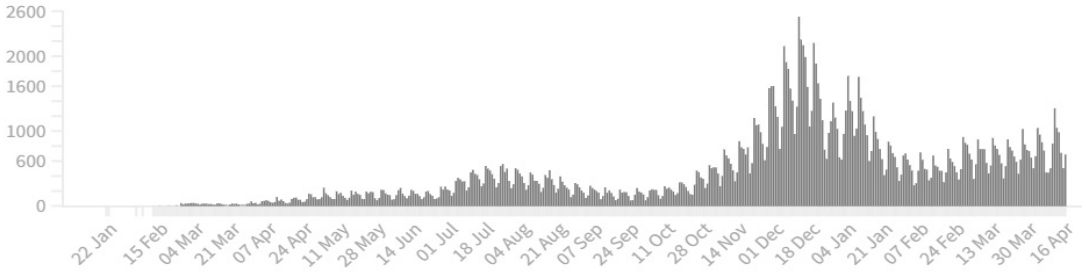


Рис. 4. Динамика волн повторных заражений COVID в Новой Зеландии по сведениям www.rnz.co.nz/news/national/450874/covid-19-data-visualisations-nz-in-numbers

ЕС и особенно от Японии. Доля смертельных случаев тут будет возрастать из-за роста многократных заражений, хотя число общих случаев COVID может быть минимально [24-28].

4. Смена трендов затухания и генерации повторных эпидемических волн

Рассмотрим специфические варианты эпидемической динамики, не укладывающиеся в решения уравнений без дополнительных переопределений функции Ψ. В Японии, выбравшей и долго успешно соблюдавшей [29] строгие административные меры остановки эпидемии на основе «локдаунов», отслеживания и изоляции контактировавших с зараженными и регулярного тестирования, однако осенью 2022 г. резко ухудшилась эпидемическая ситуация. Зимой 2022–23 гг. число требующих госпитализации случаев COVID и смертность от новых штаммов в Японии оказалась выше почти в 6 раз, чем от исходного вируса 2020 г. при аналогичных мерах контроля. Для Японии следующая из уже восьми с начала эпидемии волн лишь увеличивала показатели летальности (в августе 2023 г. началась 9-я японская волна). Интервалы времени между пиками волн, но их амплитуда не уменьшалась. Динамику осцилляций с возрастанием минимумов для серии колебаний можно отразить следующим уравнением запаздывания и с двумя уровнями эпидемических порогов $Z>K$:

$$\frac{dN}{dt} = R_0 N(t)\left(1 - \frac{N(t)(Z - \gamma \exp(-bN(t-\tau_1)))}{K + N(t-\tau)}\right) - \Psi(N(t)). \quad (6)$$

В апреле 2023 г. 8-я японская волна завершилась очередным длительным промежуточным минимумом заражений. Подобные импульсные явления наблюдались в некоторых странах в конце 2020 – весной 2021 г. при появлении первых «тревожных» штаммов (B.1.1.7 и BQ.1). Конвергенция штаммов способна прервать позитивный тренд [30]. С другой стороны, адаптивный иммунитет активированных Т-клеток CD8+ способен обеспечивать перекрестную защиту от многих вариантов коронавируса. Дальнейший отбор из набора мутантных вариантов процесс многофакторный. Рост заболеваемости на Юге Индии и очередная волна в Корее еще не значит, что штаммы этой подветви XBB.2.x и XBC будут столь же вирулентными в России.

Для прогнозирования опасности штаммов в разных регионах математические методы не помогут, необходимы иммунологические исследования выборки эпитопов В и Т-клеток и прогнозы дальнейших мутаций. Штаммы ветви Omicron останутся локальными, но зимой 2024 г. следует ожидать появление принципиально новой рекомбинантной ветви Omicron-Gamma.

Большинство эпитопов вируса, которые использованы для выработки антител, оказываются идентичны в популяции, хоть присутствует и

индивидуальная вероятностная составляющая. Несмотря на огромное разнообразие теоретически доступного нам репертуара антител и сложность антигенов вируса, у инфицированных людей чаще всего возникают ответные выбросы антител В-клетками, реагирующими на одни и те же участки – эпитопы внутри антигенов. Иммунологические механизмы выбора ограниченного набора эпитопов остаются неизвестными [31]. Если все столкнувшиеся с антигеном вырабатывают антитела на его одинаковые фрагменты – эпитопы, то мутации в этих нескольких эпитопах позволят новому штамму вируса сразу уходить от коллективного иммунитета. Увеличение спектра эпитопов для дифференциации иммунного ответа в популяции затрудняет распространение новых вариантов, потому не следует всем в одной стране колоть вакцину на основе одного варианта одного из белков вируса. Выборка вирусных эпитопов для ответа лимфоцитов CD8+ у нас значительно разнообразнее. В дальнейшем странам ЕС имеет смысл иммунизировать группы риска разными полиэпитопными препаратами, что технология позволяла делать еще в 2021 г.

Увеличение частоты повторных инфекций и фактор иммунодефицита при снижении популяции CD4-клеток приводит к другой проблеме – резко возрастает смертность в возрастной группе до 30 лет по современной статистике из Финляндии лета 2023 г.. Летальные случаи все чаще наблюдаются у тех, кто уже многократно переболел, истощив иммунную систему. Механизм этого опасного явления еще предстоит изучить иммунологам.

Заключение

Среди эпидемических эффектов выделены экстремальные явления – резкого перехода от длительно затухающих осцилляций к новой вспышке числа заражений. Выделенные варианты развития эпидемических колебательных процессов по отдельности описываются уравнениями с запаздыванием для локальных эпидемических трендов. Предложены уравнения для описания трех вариантов развития наблюдавшихся этапов локальных эпидемий с возникновением волны после затухания. Для каждого специфического колебательного режима можно подобрать систему уравнений с запаздыванием, в эпидемической динамике режимы можно выделять и классифицировать. Современный этап с обособлением стабильных региональных штаммов обосновывает классификацию характеристик динамики региональных эпидемических ситуаций [32]. По новейшим данным из Индии и Сингапура конвергентные штаммы ветви XBB.16.x эффективно подавляют ранний иммунный ответ. Значит штаммы (это набор вариантов с небольшими отличиями) не останутся региональными и нам нужно готовиться к осенней волне заболеваемости COVID-19, который теперь включится в число обычных сезонных ОРВИ.

Распространение COVID-19 в регионах сильно отличается от волн пандемических штаммов гриппа, затухавших естественным образом. По причине принципиальных различий в динамике после первичной эпидемической волны опираться на прошлый опыт моделирования оказалось ошибкой, далеко не все вирусы способны так быстро адаптироваться к человеку.

Отличительная особенность современной пандемии – достаточно резкая смена локальных трендов: эффекта затухания первичной вспышки заболеваемости и внезапное резкое начало новой эпидемической волны после длительного тренда уменьшения суточных заражений, как происходил в апреле 2023 г. в Индокитае. Как показал наш анализ, и различия, и асинхронность пиков волн только увеличивались. В большинстве регионов эпидемии приобрели осцилляционную форму, но и с разным числом пиков, и с перемежающимися трендами затухания/увеличения максимумов колебаний [33]. Основным фактором затухания и/или продолжения эпидемий стали особенности регионального популяционного иммунитета к антигенам преобладающих в регионе штаммов. Объявлявшаяся многими странами победа над COVID-19 в фазе минимума оказалась преждевременной. Для блокирования новых волн локальных эпидемий требуется достичь замедления скорости эволюции вируса, что произойдет естественным путем при условии отсутствия рекомбинации штаммов – объединения вариантов из разных ветвей. Сейчас наиболее опасный фактор – рост повторных случаев заражения. Именно больные с многократным COVID – основная когорта тяжелых случаев в странах ЕС.

Показано с использованием моделей, что не обязательно изменение поведения эпидемического тренда вызваны параметрическими возмущениями из-за увеличения вирулентности и трансмиссивности возбудителя [34]. Основная единица эпидемического процесса – активная цепочка заражений, что верно и для ВИЧ, и для COVID-19 и других инфекций (помимо малярии и бешенства). Непредсказуемость в генерации новых активных цепочек заражений вносят суперраспространители и особенно без характерных симптомов, заражающие на порядок больше среднего числа репродукции R_0,

что было уже ранее показано на многочисленных примерах динамики эпидемий [35]. В случае вспышек COVID-19 суперраспространители вируса по неясным еще причинам выделят на порядок больше среднего вирусных частиц в 1 мл их слюны. Импульсные явления требуют явного учета событийных изменений при задании сценарных правил развития процесса, что можно реализовать в модели при использовании гибридной формализации и непрерывно-дискретного времени [36].

Литература

1. *Магницкий Н.А.* О переходе к хаосу в одной модели динамики популяций // Труды ИСА РАН. 2020. Т. 70. № 2. С. 71-74.
2. *Переварюха А.Ю.* Модель сценария истощения биоресурсов при экспертном управлении стратегией эксплуатации // Труды ИСА РАН. 2021. Т. 71. № 3. С. 36-46.
3. *Белотелов Н.В.* Проблемы моделирования в экологии // Труды ИСА РАН. 2018. Т. 68. № 2. С. 16-21.
4. *Каменев Г.К.* Исследование бифуркационных свойств популяции с помощью метрических сетей // Труды ИСА РАН. 2018. Т. 68. № 2. С. 26-29.
5. *Соколов А.В.* Моделирование эволюции популяций с возрастной структурой: связь рождаемости со скоростью изменения среды // Труды ИСА РАН. 2014. Т. 64. № 3. С. 53-59.
6. *Переварюха А.Ю.* Гибридная модель развития локально взрывообразного популяционного процесса насекомого // Труды ИСА РАН. 2015. Т. 65. № 2. С. 94-104.
7. *Delorey T.M., Ziegler C.G.K., Heimberg G.* COVID-19 tissue atlases reveal SARS-CoV-2 pathology and cellular targets // Nature. 2021. Vol. 595. P. 107–113.
8. *Lamb K.D., Luka M.M., Saathoff M., Orton R.* SARS-CoV-2's evolutionary capacity is mostly driven by host antiviral molecules // bioRxiv 2023.04.07.536037. https://doi.org/10.1101/2023.04.07.536037
9. *Cilia R.* SARS-CoV-2-specific CD4+ and CD8+ T cell responses can originate from cross-reactive CMV-specific T cells // eLife. 2022. Vol.11. art. no: e82050.
10. *Ioannidis J.P.A., Cripps S., Tanner M.* Forecasting for COVID-19 has failed // International Journal of Forecasting. 2022. Iss. 2. P. 423–438. doi.org/10.7554/eLife.82050
11. *Chin V., Samia N.I., Marchant R.* A case study in model failure? COVID-19 daily deaths and ICU bed utilisation predictions in New York state // European Journal of Epidemiology. 2020. Vol. 35. P. 733–742. https://doi.org/10.1007/s10654-020-00669-6
12. *Moein S., Nickaeen N., Roointan A.* Inefficiency of SIR models in forecasting COVID-19 epidemic: a case study of Isfahan // Scientific Reports. 2021. Vol. 11. Art no. 4725. https://doi.org/10.1038/s41598-021-84055-6
13. *Nikitina A.V.* Study of the spread of viral diseases based on modifications of the SIR model // Computational Mathematics and Information Technologies. 2020. № 1. P. 19–30.
14. *Barnard R.C.* Modelling the medium-term dynamics of SARS-COV-2 transmission in England in the omicron era // Nature Communication. 2022. Vol. 13, art. no 4879. https://doi.org/10.1038/s41467-022-32404-y
15. *Ghosh S.K., Ghosh S.* A mathematical model for COVID-19 considering waning immunity, vaccination and control measures // Scientific Reports. 2023. Vol. 13, art. no. 3610. https://doi.org/10.1038/s41598-023-30800-y
16. *Kevin W. et al.* Preexisting and de novo humoral immunity to SARS-CoV-2 in humans // Science. 2020. Vol. 370. P. 1339-1343. https://doi.org/10.1126/science.abe1107
17. *Perevaryukha A.Y.* A Continuous Model of Three Scenarios of the Infection Process with Delayed Immune Response Factors // Biophysics. 2021. Vol. 66. P. 327–348. https://doi.org/10.1134/S0006350921020160
18. *Hutchinson G.E.* Circular causal systems in ecology // Ann. N. Y. Acad. Sci. 1948. Vol. 50, no. 4. pp. 221–246.
19. *Колесов А.Ю., Колесов Ю.С.* Релаксационные колебания в математических моделях экологии // Труды МИАН. 1993. Т. 199. С. 3–124.
20. *Trofimova I.V., Perevaryukha A.Y., Manvelova A.B.* Adequacy of Interpretation of Monitoring Data on Biophysical Processes in Terms of the Theory of Bifurcations and Chaotic Dynamics // Technical Physics Letters. 2022. Vol. 48. P. 305–310. https://doi.org/10.1134/S1063785022110025
21. *Fabiano N., Radenovic S.N.* The second COVID-19 wave of 2020 in Italy: a brief analysis // Military Technical Courier. 2021. Т. 69. № 1. P. 1–7.
22. *Шабунин А.В.* Гибридная SIRS-модель распространения инфекций // Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика. 2022. Т. 30. № 6. С. 717–731.
23. *Abotaleb M.S., Makarovskikh T.A.* Development of algorithms for choosing the best time series

models and neural networks to predict COVID-19 cases // Bulletin of the South Ural State University. 2021. T. 21. № 3. P. 26–35.
24. *Зайковская А.В., Гладышева А.В., Карташов М.Ю.* Изучение в условиях in vitro биологических свойств штаммов коронавируса SARS-COV-2, относящихся к различным генетическим вариантам // Проблемы особо опасных инфекций. 2022. № 1. С. 94–100.
25. *Вечорко В.И., Аверков О.В., Зимин А.А.* Новый штамм SARS-COV-2 Омикрон – клиника, лечение, профилактика (обзор литературы) // Кардиоваскулярная терапия и профилактика. 2022. Т. 21. № 6. С. 89–98.
26. *Silva S.J., Pardee K., Pena L., Kohl A.* Recent insights into SARS-COV-2 omicron variant // Reviews in Medical Virology. 2022. Vol. 33. Art no: e2373. doi: 10.1002/rmv.2373.
27. *Juul F.E., Jodal H.C., Barua I.* Mortality in Norway and Sweden during the COVID-19 pandemic // Scandinavian Journal of Public Health. 2022. Vol. 50. P. 38-45. doi:10.1177/14034948211047137
28. *Brusselaers N., Steadson D., Bjorklund K.* Evaluation of science advice during the COVID-19 pandemic in Sweden // Humanities and Social Sciences Communications. 2022. Vol. 9, Art no: 91. https://doi.org/10.1057/s41599-022-01097-5
29. *Phetsouphanh C., Darley D.R., Wilson D.B.* Immunological dysfunction persists for 8 months following initial mild-to-moderate SARS-CoV-2 infection // Nature Immunology. 2022. P. 210–216. https://doi.org/10.1038/s41590-021-01113-x
30. *Oshitani H.* COVID lessons from Japan: the right messaging empowers citizens // Nature 2022. Vol. 605, Art no: 589. https://doi.org/10.1038/d41586-022-01385-9
31. *Corey L, Beyrer C, Cohen M., Michael N., Bedford T, Rolland M.* SARS-CoV-2 variants in patients with immunosuppression // The New England Journal of Medicine. 2021. Vol. 385. P. 562–566. doi:10.1056/NEJMsb2104756. pmid:34347959
32. *Shrock E.L., Timms R.T.* Germline-encoded amino acid–binding motifs drive immunodominant public antibody responses // Science. 2023. Vol. 380, Iss. 6640. P. 798-816. https://doi.org/10.1126/science.adc9498
33. *Markov P.V., Ghafari M., Beer M.* The evolution of SARS-CoV-2 // Nature Reviews Microbiology. 2023. Vol. 21. P. 195–210. https://doi.org/10.1038/s41579-023-00878-2.
34. *Perevaryukha A.Y.* An iterative continuous-event model of the population outbreak of a phytophagous hemipteran // Biophysics. 2016. T. 61. № 2. С. 334-341.
35. *Lloyd-Smith J.O., Schreiber S.J., Kopp P.E., Getz W.M.* Superspreading and the effect of individual variation on disease emergence // Nature 2005. Vol. 438. P. 355–359.
36. *Mikhailov V.V., Perevaryukha A.Y., Trofimova I.V.* Computational Modeling of the Nonlinear Metabolism Rate as a Trigger Mechanism of Extreme Dynamics of Invasion Processes // Technical Physics Letters. 2022. Vol. 48. P. 301–304. https://doi.org/10.1134/S1063785022110013

Переварюха Андрей Юрьевич. Федеральное государственное учреждение Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр РАН, г. Санкт-Петербург. Старший научный сотрудник. Область научных интересов: вычислительная математика, моделирование биологических процессов, сравнительная экодинамика, динамика волн эпидемий, анализ гибридных систем управления, биокибернетика.
E-mail: temp_elf@mail.ru

Modeling of the two regional epidemics situations and analysis of factors for repeated waves of COVID-19

A.Yu. Perevaryukha
St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences,Saint Petersburg, Russia

Abstract. The COVID-19 pandemic has moved into the stage of a dynamic confrontation between the pathogen mutating in the regions and accumulating (natural and vaccine) population immunity. Pandemic influenza strains in a similar collision faded after three waves. SARS-COV-2 has an amazing rate of renewal of several of its structural proteins at once, which leads to new oscillations in the number of infections and competition between the evolutionary branches of virus strains. The variety of strains and variability of virus antigens periodically increases, but then some strains go out of distribution, but the rest give rise to new branches. Dynamically, this is reflected in waves of the number of recorded infections, the frequency and amplitude of peaks of which vary significantly in the regions. This is how regional epidemic scenarios are formed, some of which are quite unusual. Classical damped oscillations have been observed in South Africa. In spring of 2023, the next 7th local COVID wave begins in Australia. For a phenomenological model description of the observed dynamics, we propose to use equations with delay is flexible tool for describing complex forms of oscillatory dynamics, where we proposed to include special threshold damping functions. It was possible to obtain solutions for both collapsing and damped oscillations with the possibility of new outbreak, which made it possible to describe the effect of single extreme wave that arose in early 2022 in New York and earlier in Brazil after an increase in the length of active infection chains, a sharp Λ-shaped peak with vibrational damping. The scenario differs significantly from both the primary outbreak and Japanese epidemic scenario – a series of successive short-term waves with increasing amplitude. Only slowing down the evolution of the virus can stop the pandemic, and heterogeneity of population immunity become an important factor, if antibodies are developed for the same epitopes, then changes in these protein regions trigger another wave. In august, earlier than the forecast, COVID-wave of the strain EG.5 "Eris" began.

Keywords: *system analysis of epidemic factors, differentiation of regional epidemics, infection chains, oscillatory modes of infection cases, equations with delay, birth bifurcations and destruction of cyclic trajectories*
DOI: 10.14357/20790279230312

References

1. *Magnitskiy N.A.* 2020. O perekhode k khaosu v odnoy modeli dinamiki populyatsiy [On the transition to chaos in one model of population dynamics]. Trudy Instituta sistemnogo analiza Rossiyskoy akademii nauk [Proceedings of the Institute of System Analysis of the Russian Academy of Sciences] 70 (2): 71-74.
2. *Perevaryukha A.Yu.* 2021. Model stsenariya istoshcheniya bioresursov pri ekspertnom upravlenii strategiyey ekspluatatsii [Bioresource Depletion Scenario Model under Expert Management of Exploitation Strategy] Trudy Instituta sistemnogo analiza Rossiyskoy akademii nauk [Proceedings of the Institute of System Analysis of the Russian Academy of Sciences] 71 (3): 36-46.
3. *Belotelov N.V.* 2018. Problems of modeling in ecology [Problems of modeling in ecology] Trudy Instituta sistemnogo analiza Rossiyskoy akademii nauk [Proceedings of the Institute of System Analysis of the Russian Academy of Sciences] 68 (2): 16-21.
4. *Kamenev G.K.* 2018. Investigation of Bifurcation Properties of a Population Using Metric Networks [Investigation of Bifurcation Properties of a Population Using Metric Networks] Trudy Instituta sistemnogo analiza Rossiyskoy akademii nauk [Proceedings of the Institute of System Analysis of the Russian Academy of Sciences] 68 (2): 26-29.
5. *Sokolov A.V.* 2014. Modelirovaniye evolyutsii populyatsiy s vozrastnoy strukturoy: svyaz' rozhdayemosti so skorost'yu izmeneniya sredy [Modeling the evolution of populations with age structure: the relationship between fertility and the rate of environmental change]. Trudy Instituta sistemnogo analiza Rossiyskoy akademii nauk [Proceedings of the Institute for System Analysis of the Russian Academy of Sciences] 64 (3): 53-59.
6. *Perevaryukha A.Yu.* 2015. Gibridnaya model' razvitiya lokal'no vzryvoobraznogo populyatsionnogo protsessa nasekomogo [A hybrid model of the development of a locally explosive population process of an insect]. Trudy Instituta sistemnogo analiza Rossiyskoy akademii nauk [Proceedings of the Institute for System Analysis of the Russian Academy of Sciences] 65 (2): 94-104.

7. *Delorey T.M., Ziegler C.G.K., Heimberg G.* 2021. COVID-19 tissue atlases reveal SARS-CoV-2 pathology and cellular targets. Nature 595: 107–113. https://doi.org/10.1038/s41586-021-03570-8
8. *Lamb K.D., Luka M.M., Saathoff M., Orton R.* 2023. SARS-CoV-2's evolutionary capacity is mostly driven by host antiviral molecules. bioRxiv 2023.04.07.536037. https://doi.org/10.1101/2023.04.07.536037
9. *Cilia R.* 2022. SARS-CoV-2-specific CD4+ and CD8+ T cell responses can originate from cross-reactive CMV-specific T cells. eLife. 11. art. no: e82050.
10. *Ioannidis J.P.A., Cripps S.* 2022. Tanner M. Forecasting for COVID-19 has failed // International Journal of Forecasting. 2: 423–438. doi.org/10.7554/eLife.82050
11. *Chin V., Samia N.I., Marchant R.* 2020. A case study in model failure? COVID-19 daily deaths and ICU bed utilisation predictions in New York state. European Journal of Epidemiology. 35: 733–742. https://doi.org/10.1007/s10654-020-00669-6
12. *Moein S., Nickaeen N., Roointan A.* 2021. Inefficiency of SIR models in forecasting COVID-19 epidemic: a case study of Isfahan. Scientific Reports. 11 art no. 4725. https://doi.org/10.1038/s41598-021-84055-6
13. *Nikitina A.V.* 2020. Study of the spread of viral diseases based on modifications of the SIR model. Computational Mathematics and Information Technologies. 1: 19–30.
14. *Barnard R.C.* 2022. Modelling the medium-term dynamics of sars-cov-2 transmission in England in the omicron era. Nature Communication. 13: Art.no 4879. https://doi.org/10.1038/s41467-022-32404-y
15. *Ghosh S.K., Ghosh S.* 2023. A mathematical model for COVID-19 considering waning immunity, vaccination and control measures. Scientific Reports. 13: art. no. 3610. https://doi.org/10.1038/s41598-023-30800-y
16. *Kevin W. et al.* 2020. Preexisting and de novo humoral immunity to SARS-CoV-2 in humans. Science. 370:1339-1343. https://doi.org/10.1126/science.abe1107
17. *Perevaryukha A.Y.* 2021. A Continuous Model of Three Scenarios of the Infection Process with Delayed Immune Response Factors. Biophysics. 66: 327–348. https://doi.org/10.1134/S0006350921020160
18. *Hutchinson G.E.* 1948. Circular causal systems in ecology. Ann. N. Y. Acad. Sci. 50(4): 221–246.
19. *Kolesov A.Yu., Kolesov Yu.S.* 1993. Relaksatsionnyye kolebaniya v matematicheskikh modelyakh ekologii [Relaxation oscillations in mathematical models of ecology]. Trudy MIAN [Proceedings of MIAN] 199: 3–124.
20. *Trofimova I.V., Perevaryukha A.Y., Manvelova A.B.* 2022. Adequacy of Interpretation of Monitoring Data on Biophysical Processes in Terms of the Theory of Bifurcations and Chaotic Dynamics. Technical Physics Letters. 48 (12): 305–310. https://doi.org/10.1134/S1063785022110025
21. *Fabiano N., Radenovic S.N.* 2021. The second COVID-19 wave of 2020 in Italy: a brief analysis. Military Technical Courier. 69 (1): 1–7.
22. *Shabunin A.V.* 2022. Gibridnaya SIRS-model' rasprostraneniya infektsiy. Prikladnaya nelineynaya dinamika [Hybrid SIRS-model of the spread of infections]. [Applied nonlinear dynamics] 30 (6): 717–731.
23. *Abotaleb M.S., Makarovskikh T.A.* 2021. Development of algorithms for choosing the best time series models and neural networks to predict COVID-19 cases. Bulletin of the South Ural State University. 21 (3): 26–35.
24. *Zaikovskaya A.V., Gladysheva A.V., Kartashov M.Yu.* 2022. Izucheniye v usloviyakh in vitro biologicheskikh svoystv shtammov koronavirusa SARS-COV-2, otnosyashchikhsya k razlichnym geneticheskim variantam [In vitro study of the biological properties of SARS-COV-2 coronavirus strains belonging to different genetic variants]. Problemy osobo opasnykh infektsiy [Problems of especially dangerous infections] 1: 94–100.
25. *Vechorko V.I., Averkov O.V., Zimin A.A.* 2022. Izucheniye v usloviyakh in vitro biologicheskikh svoystv shtammov koronavirusa SARS-COV-2, otnosyashchikhsya k razlichnym geneticheskim variantam [New strain SARS-COV-2 Omikron – clinic, treatment, prevention (literature review)]. Problemy osobo opasnykh infektsiy [Cardiovascular therapy and prevention] 21(6): 89–98.
26. *Silva S.J., Pardee K., Pena L., Kohl A.* 2022. Recent insights into SARS-COV-2 omicron variant. Reviews in Medical Virology 33: Art no: e2373. doi: 10.1002/rmv.2373.
27. *Juul F.E., Jodal H.C., Barua I.* 2022. Mortality in Norway and Sweden during the COVID-19 pandemic. Scandinavian Journal of Public Health 50: 38-45. doi:10.1177/14034948211047137
28. *Brusselaers N., Steadson D., Bjorklund K.* 2022. Evaluation of science advice during the COVID-19 pandemic in Sweden. Humanities and Social Sciences Communications. 9 Art no: 91. https://doi.org/10.1057/s41599-022-01097-5
29. *Phetsouphanh C., Darley D.R., Wilson D.B.* 2022. Immunological dysfunction persists for 8 months

following initial mild-to-moderate SARS-CoV-2 infection. Nature Immunology. 210–216. https://doi.org/10.1038/s41590-021-01113-x
30. *Oshitani H.* 2022. COVID lessons from Japan: the right messaging empowers citizens. Nature 605 Art no: 589. https://doi.org/10.1038/d41586-022-01385-9
31. *Corey L, Beyrer C, Cohen M., Michael N., Bedford T, Rolland M.* 2021. SARS-CoV-2 variants in patients with immunosuppression. The New England Journal of Medicine. 385: 562–566. doi:10.1056/NEJMsb2104756. pmid:34347959
32. *Shrock E.L., Timms R.T.* 2023. Germline-encoded amino acid–binding motifs drive immunodominant public antibody responses. Science 380 (6640): 798-816. https://doi.org/10.1126/science.adc9498
33. *Markov P.V., Ghafari M., Beer M.* 2023. The evolution of SARS-CoV-2 // Nature Reviews Microbiology 21: 195–210. https://doi.org/10.1038/s41579-023-00878-2
34. *Perevaryukha A.Y.* 2016. An iterative continuous-event model of the population outbreak of a phytophagous hemipteran. Biophysics 61(2): 334-341.
35. *Lloyd-Smith J.O., Schreiber S.J., Kopp P.E., Getz W.M.* 2005. Superspreading and the effect of individual variation on disease emergence. Nature. 438: 355–359.
36. *Mikhailov V.V., Perevaryukha A.Y., Trofimova, I.V.* 2022. Computational Modeling of the Nonlinear Metabolism Rate as a Trigger Mechanism of Extreme Dynamics of Invasion Processes. Technical Physics Letters. 48: 301–304. https://doi.org/10.1134/S1063785022110013.

Perevaryukha Andrey Yurievich. St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia. Senior Researcher, laboratory of Applied Informatics, candidate of technical sciences. Number of publications: 101. Research interests: computational mathematics, modeling of biological processes, comparative methods in ecodynamics, epidemical modeling, analysis of hybrid control systems, bio cybernetics. E-mail: temp_elf@mail.ru.

Системная диагностика социально-экономических процессов

Идеология России в условиях противостояния Россия-Запад

Ю.В. Пазюк[I], В.П. Ефимова[II], С.Н. Осипов[I]

[I] Федеральное государственное учреждение «Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук», г. Москва, Россия
[II] НП ЭКЦ «МЭТ- Сертификация», г. Москва, Россия

Аннотация. В статье представлены результаты исследования проблемы обеспечения безопасного развития России в XXI веке в разрезе создания общенациональной идеологии. Показано, что в условиях цивилизационного противостояния России со странами западного мира и беспрецедентным нарастанием геополитической напряженности, безопасность России не может быть обеспечена на должном уровне без общенациональной идеологии, способной консолидировать российское общество. Речь идет о выживании России, защите нашего культурного цивилизационного кода.

Ключевые слова: *идеология, государство-лидер, евразийская локальная цивилизация, консерватизм, экономический либерализм, социалисты, патриотизм.*
DOI: 10.14357/20790279230313

Введение

Господствующая ныне в западном мире либеральная идеология базируется на идеях прагматизма, философии постмодернизма и метамодернизма, в основе которых лежит мысль, что самое важное в реализации идеологии - результат, выгодный той или иной социальной группе людей, именуемых элитой, независимо от того, несет или не несет он в себе истину.

За последние годы Россия рывком вернулась на уровень Великих держав, но, чтобы вернуть позицию сверхдержавы и статус государства-лидера Евразийской цивилизации этого мало. В условиях противостояния Россия-Запад государству, российскому обществу необходимо определиться с базовыми принципами общенациональной идеологии народного самоопределения, пробуждения и социальной справедливости как интеллектуально-философского активистского течения [1]. Общество должно понимать глобальную цель, общий вектор своего безопасного развития, знать какие задачи необходимо для этого решить стране.

Согласно Конституции РФ (ст. 13-14), в России признается идеологическое разнообразие, и никакая идеология не может быть установлена в качестве государственной или обязательной. Опасность отсутствия общенародной идеологии в условиях противостояния с западным миром сегодня прекрасно осознается большинством российских людей. В условиях санкций, протекционизма Россия погружается в ситуацию выживания и саморазрушения государства.

Российскому обществу сегодня жизненно необходима *общенародная идеология развития* – идеология полноценной человеческой жизни, саморазвития и самосовершенствования общества, государства и каждого человека, а не их бессмысленного выживания.

Президент РФ В. Путин, выступая на форуме «Глобальная встряска – XXI: человек, ценности, государство» отметил следующее: «С***уществующая модель капитализма*** – а это сегодня основа общественного устройства в подавляющем большинстве стран – исчерпала себя, в ее рамках нет больше выхода из клубка все более запутанных противоречий. Повсеместно, даже в самых богатых странах и регионах, неравномерное распределение материальных благ ведет к усугубляющемуся неравенству, прежде всего, *неравенству возможностей* – и внутри обществ, и на международном уровне. Мы должны строить социальное государство. Для нас это особенно важно, имея в виду разницу в доходах различных категорий граждан».[1]

Процесс переустройства можно сформулировать в следующих тезисах: «структурообразующей единицей мирового устройства является только государство; только *суверенные государства* способны эффективно отвечать на вызовы времени и запросы граждан; когда приходит *настоящий кризис*, остается только одна универсальная ценность – *человеческая жизнь*, и как ее защитить, каждое государство решает самостоятельно, исходя из своих возможностей, культуры, традиций.

В современном хрупком мире для России значительно возрастает важность *твердой опоры, моральной, этической, ценностной*, опирающихся на свои духовные ценности, на историческую традицию, на культуру ее многонационального народа; будем руководствоваться ***идеологией здорового консерватизма***»[2].

Это идеологическое направление понимается, прежде всего, как опора на проверенную временем традицию, сохранение и приумножение населения, реализм в оценке себя и других, точное выстраивание системы приоритетов, соотнесение необходимого и возможного, расчетливое формулирование цели развития, принципиальное неприятие экстремизма как способа действий.

На вопрос «Каким должен быть современный консерватор?», ясно ответил известный философ, политолог и публицист А.С. Панарин в своей монографии «…*современный консерватор* – это одновременно и тонкий герменевтик[3], разгадывающий утаенный от предшественников смысл традиции, и мужественный реставратор, делающий дело, невзирая на протесты крикливой «передовой» общественности» [2]: «...чтобы реставраторство не стало ретроградством, необходимо *прочесть традицию в свете требований завтрашнего дня,* сделать ее основой своего проекта будущего» [3].

А. Козырев отмечал, что «... *люди должны реализовать право на достойное существование*. Социальная политика должна стать нашей идеологией»[4]. Он также отметил, что российское государство социальное по Конституции, где исповедуется философия достойного существования, где человек не просто может провозгласить достоинство, а это достоинство должно быть подкреплено определенным социальным базисом.

1. Основные направлениях развития национальной идеологии

Очевидно, что *экономический либерализм* сегодня исчерпал себя. Его жизнеспособность была возможна исключительно при однополярном мироустройстве, существовавшем в 1990-х и 2000-х гг. Тогда США навязывали всему миру *либерально-монетаристскую экономическую модель*. Однако с появлением новых экономических центров, таких как Китай, прежняя модель стала неактуальной. Например, Китай сегодня активно использует методы протекционизма и *государственного капитализма*, выжимая транснациональные компании со своего рынка.[5]

С 2022 г. Правительство РФ отказалось от проведения курса на либеральный монетаризм и на политическом поле усилилось право-консервативное идеологическое течение – «***консерваторы – государственники***».

Отметим, что консерваторы-государственники – это решительные противники глобализации, которая, по их мнению, ведет к тотальной гомогенизации мира, разрушительной для всего самобыт-

[1] Заседание дискуссионного клуба «Валдай», 21.10.2021г.// http://www.kremlin.ru/events/president/news/66975

[2] Там же.

[3] **Герменевтика** – это искусство понимания и самопознания.

[4] https://ria.ru/20220602/ideologiya-1792752150.html

[5] https://www.business-gazeta.ru/article/501919

ного и уникального в нем, унификации, ведущей к ликвидации национальных границ, традиций, менталитета, морали.[6] Так, выступая с жесткой критикой глобализации, Н.А.Нарочницкая утверждает, что «в этом проекте униформного пространства нет места не только православной России, но ни одной из великих духовных и национальных традиций человечества» [4]. Достижение государственных интересов может осуществляться в форме мягкого сотрудничества с соседями (*социалистические государственники*) или же в форме попытки жесткого доминирования, не считаясь с чужими интересами (*империалистические государственники* (имперцы)).[7]

Большинство «социалистических государственников» придерживается идеологии левого (социального) консерватизма. Они поддерживают отдельные положения программ партий социальной направленности (КПРФ**,** Справедливая Россия, Российская партия пенсионеров за социальную справедливость и др.). Выступают против антисоветизма, прославляют победы СССР, резко высказывются против проявления неуважения по отношению к ветеранам ВОВ. Позиционируют победы СССР как победы советского народа и российской государственности.

«Империалистические государственники (имперцы)» стоят на позиции сильной централизованной власти, примата государства и его интересов (этатизм). Традиционно относятся к право-консервативной части политического спектра и являются «*умеренными националистами*», сторонниками капитализма и последовательными антикоммунистами. Негативно оценивают роль коммунистической идеологии и деятельность РСДРП/РКП(б)/ВКП(б)/КПСС. Тяготеют к силовому решению территориальных вопросов (*имперский подход*). Выступают за присоединение всех бывших республик СССР к России и восстановление единого Союза.

Роднит всех государственников резко отрицательное отношение к попыткам организовать в России «оранжевую» («твиттерную», «белоленточную» революцию. В целом, консерватизм трактуется как политическая идеология, ориентированная на сохранение и поддержание исторически сложившихся форм государственной и общественной жизни, в первую очередь ее *морально-правовых основ*, воплощенных в нации, религии, браке, семье, собственности [5]. Следуя концепции, предложенной К. Мангеймом [6], многие понимают консерватизм как осознанный, теоретически аргументированный традиционализм. По мнению В. Гусева «консерватизм представляет собой тип политической мысли, политическую идеологию, главным систематизирующим принципом которых выступает принцип следования социальной традиции» [7].

Консерватизм, наряду с либерализмом и социализмом, относится к наиболее влиятельным социально-политическим и идеологическим течениям двух последних столетий. Столкновение этих течений во многом предопределило историю Новейшего времени.

Карта трех базовых идеологий в политическом, экономическом и культурном поле координат представлена на рис. 1.

Рис. 1. Карта базовых идеологий в политическом, экономическом и культурно-нравственном поле координат

Каждая из этих трех идеологий, как правило, видит две другие, ей противоположные, в одном цвете. Либералы клеймят и консерватизм, и социализм (коммунизм) единым словом «тоталитаризм», и всего лишь видят в них разновидности этого тоталитаризма. Социалисты видят в либералах и консерваторах тоже единый феномен, всего лишь обслугу или ширму либерального капитала, либо либерализм представляется как производная от крайне антиобщественных религиозных взглядов. Консерваторы видят в либерализме и социализме (коммунизме) одну и ту же идеологию атеизма, попытку сделать богом только человека, построить царство божье на земле, отрицать трансцендентные духовные измерения [8].

На рис. 2 представлена триада базовых (*одноположных*) мировых идеологий и идей, объединяю-

[6] https://studme.org/43006/politologiya/pravyy_ili_belyy_konservatizm

[7] https://garyh-jet.livejournal.com/36546.html

щих их дихотомии: «*Консерватизм – Либерализм»; «Социализм – Консерватизм»; «Социализм – Либерализм».*

Общая идея идеологии консерватизма и либерализма – это капитализм, при этом социализм позиционирует себя как *антикапитализм.*

Проявления идеологии социализма и консерватизма объединяет тоталитаризм, а либерализм – это *антитоталитаризм*.

Идеологию социализма и либерализма объединяет атеизм, а консерватизм, по большому счету – это *антиатеизм.*

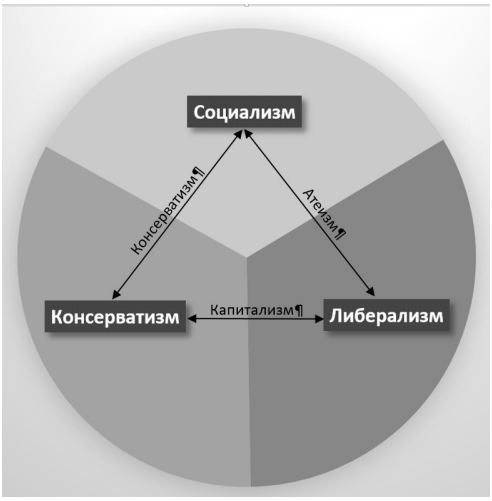


Рис. 2. Триада базовых (одноположных) идеологий, объединяющих их дихотомии

В современной истории редко встречаются эти идеологии в чистом виде, чаще в обществе присутствуют их промежуточные и интегрированные варианты. На рис.3 представлена триада базовых (*одноположных*) мировых идеологий и основных видов их системной интеграции.

Рис. 3. Триада базовых (одноположных) идеологий и основных видов их системной интеграции

Основные идеологические течения в современной России**.**

Социальный либерализм (*социал-либерализм*) – это разновидность «рыночного либерализма», с основным отличием, заключающимся во включении различных гражданских свобод и прав человека как важных для достижения свободы и большей терпимости к смешанной экономике.

Социал-либералы – это те же социал-демократы, только более правого толка, они признают естественные и политические права личности, допускают существование даже частной собственности и рынка, но с другой стороны, как и социалисты/коммунисты, они хотят нивелировать социальное неравенство за счет перераспределения общественного богатства с помощью государства. Отсюда – «социал», т.е. социалистическая, коллективистская направленность политики.

Либеральный социализм сравнивают с послевоенной социал-демократией, поскольку он поддерживает смешанную экономику, которая включает как частную собственность, так и общественную собственность на капитальные блага.

Чистый либерал – социализм характерен негативным отношением к любому консерватизму, к религии, церкви, к государству, традициям и духовным ценностям.[8] Он берет у социалистов веру в общественный и технический прогресс, уделяет огромное внимание средствам коммуникации, любит протест и революционность. Не чужд мерам социальной защиты и правам меньшинств. Если же уклон более либеральный, тогда к дискурсу этого идеологического направления добавляются темы борьбы с коррупцией, смены власти, демографии, а также тема милитаризма и войны за жизненное пространство.

Социальный консерватизм (*социал-консерватизм*) – это доктрина, основанная на убеждении в том, что общество построено на хрупкой сети отношений, которые необходимо поддерживать с помощью долга, традиционных ценностей и устоявшихся институтов.[9]

Как правило, он скептически относится к социальным изменениям и верит в сохранение статуса-кво в отношении социальных вопросов, таких как семейная жизнь, сексуальные отношения и патриотизм. Он возник как реакция на то, что было воспринято обществом как опасные тенденции внутри либеральных движений, ведущие к политическому радикализму и отказу от традиционных ценностей. Успех же правого радикализма на постсоциалистическом пространстве по мне-

[8] https://matveychev-oleg.livejournal.com/1117190.html
[9] https://strikun.ru/socialnyy-konservatizm-social-kons/

нию венгерских авторов Анны Кенде и Петера Креко [9] заключается, прежде всего, в высокой, но нестабильной национальной идентичности, основанной на опыте хрупкого национального суверенитета, а также глубоко укоренившейся и социально приемлемой (т.е. нормативной) межгрупповой вражде с меньшинствами при эффективном использовании «иммигрантской угрозы» в этом контексте.

Не ставя под сомнение цивилизационные ценности России, стремясь к укреплению ее геополитической мощи и национальному возрождению, левый консерватизм считает приоритетным путем реализации этой задачи национализацию недр, крупных частных компаний, занятых экспортом природных ресурсов, а также увеличение государственного контроля в области энергетики, транспорта, коммуникаций и т. д. Что-то из этих элементов, возможно, будет реализовано нашим правительством в рамках заявленной политики государственного капитализма, что-то нет.

Вместе с тем, социал-консерватизм как идеологическое течение, значимое для России, может настаивать на своеобразном прочтении российской политической истории, отстаивая закономерность и естественность советского периода, вписывая его в общую национальную диалектику.

Общая консолидирующая нацию идеология России, по мнению А. Кобякова,[10] это ***социальный консерватизм*** (в терминах Русской доктрины – динамический консерватизм [10]) – эволюционный путь развития с опорой на прошлый опыт и с учетом важнейшей для России ***идеи справедливости***.

У нашей страны есть уникальный опыт: мы не в теории, а на практике знаем все плюсы и минусы как социалистической, так и капиталистической экономической и социальной модели.

Третье интегрированное идеологическое направление – это **либеральный консерватизм**, – отдельное умеренно правое движение в консерватизме, в котором присутствуют элементы либерализма. Его выделяют следующие особенности: более либеральное отношение по моральным и социальным признакам, либеральное отношение к экономике (в частности, принцип невмешательства[11]), охрана природы и окружающей среды.

В современной России либерально-консервативная идея пока сдержанно поддерживается населением, представлена в основном партиями Гражданская платформа и Партия роста. Проведенный авторами анализ показывает, что запрос на консерватизм в российском обществе неизбежно будет расти, особенно после начала СВО на Украине.

Мы обречены на консерватизм, нас подтолкнут к нему и извне, и изнутри. Запад со всеми присущими ему пороками и идеологией неолиберализма представляется сегодня нашему обществу как антипод России, т.к. западная цивилизация «вселяет безвдохновенный, технорационалистический «дух» всеобщего упрощения, опошления и усреднения по единым стандартам внешней жизни и превращает людей в однородные кубики для внешнего манипулирования».[12]

Идеология будущего России, по мнению авторов, наиболее адекватно отвечающая вызовам нового времени, есть все-таки, идеология российского ***умеренного консерватизма***, предполагающая сочетание, как консервативных, так и либеральных социальных решений и практик, обеспечивающих ведущие позиции России в мире, устойчивый рост благосостояния ее народа.

Отсюда следует принципиальный вывод: ***госкапитализм*** призван сыграть роль переходного процесса при рождении нового типа российской экономики: диверсифицированной, структурно сбалансированной, технологически суверенной, социально направленной и с оптимально встроенной в нее государственной и частной собственностью.

Как отмечает Э. Бёрк: «Имея право на все, люди хотят получить все. Государство - это мудрое изобретение человечества, предназначенное для обеспечения и одновременно сдерживания человеческих желаний. Сдерживание человеческих пороков, с чем большинство, толпа, массы не в состоянии справиться самостоятельно, а также мобилизация индивидов на свершения во имя целого – вот задачи государства, церкви» [11].

Стремление провозгласить принцип классического консерватизма единственно верным и упорствовать в нем всюду, может привести к ***тоталитаризму*** – государству принудительного осчастливливания людей посредством тотального подавления их свободы.

Другая проблема классического консерватизма заключается в том, что, будучи философией сдерживания, он выступает против естественного хода вещей, подталкивающего человека к изменению и саморазвитию.

[10] **Андрей Борисович Кобяков** (род. 6 июля 1961, Москва) – российский экономист, публицист и общественный деятель. Доцент МГУ им. М. В. Ломоносова, к.э.н., член «Изборского клуба».

[11] **Принцип невмешательства** – экономическая доктрина, согласно которой экономическое вмешательство и государственное регулирование экономики должно быть минимальным.

[12] https://studme.org/43006/politologiya/pravyy_ili_belyy_konservatizm

В настоящее время на политическом поле России действуют в основном пять политических субъектов (политических партий), а именно:

- Правоцентристская социал-консервативная политическая партия «Единая Россия»;
- «Коммунистическая партия Российской Федерации» - КПРФ (левая политическая партия РФ; позиционирует себя, как прямого наследника КПСС);
- Либерально-демократическая партия- ЛДПР;
- Левая политическая партия «Справедливая Россия» (СР, эсеры);
- Российская объединенная демократическая партия «Яблоко» (оппозиционная политическая партия).

«Единая Россия», как крупнейшая пропрезидентская партия, представляющая политическое большинство в Парламенте[13], должна выполнять роль идеологического лидера, нести на себе основную идеологическую нагрузку в российском обществе.

Однако, в настоящее время, идеология партии «Единая Россия» представлена тремя различными платформами – консервативной (Государственно-патриотическая платформа), социальной (Социально- консервативная платформа) и либеральной (Либерально-консервативная платформа). Однако эти социально-политические платформы не позволяют партии «Единая Россия» системно сформулировать национальную идеологию России, обозначить основные цели, задачи и пути развития общества, понятные и одобряемые большинством гражданского населения.

Идеологические платформы других партий не пользуются поддержкой большинства населения и направлены, либо на реставрацию социализма (КПРФ, СР), либо придерживаются, фактически, леволиберального уклона («Яблоко», ЛДПР) в формах неолиберализма, экономического и культурного либерализма (демократия на западный манер).

2. Общество и власть. Предпосылки создания общенациональной идеологии

Критически важным является отсутствие системы непротиворечивых ценностей, отличающих русский народ и национальный менталитет от прочих народов мира, а также последовательной и целенаправленной деятельности по их транслированию в общество.

Общество в целом не доверяет властной и политической элитам,[14] устойчивой поддержкой населения пользуется лишь В. Путин, как признанный национальный лидер и легитимный Президент РФ, его курс на укрепление государственности и суверенитета страны, а также председатель Правительства РФ В. Мишустин.

Результаты, полученные в ходе майского и июньского мониторинга общественного мнения, показали, что уровень поддержки действий и решений властей в российском обществе после начала СВО на Украине продолжает оставаться достаточно высоким. Конфликт с Украиной и конфронтация с Западом явились мощным фактором консолидации российских граждан, они по-прежнему поддерживают в россиянах ощущение единства и сохраняют социальный запрос на патриотическую направленность риторики и деятельности властных элит.

Однако процессы консолидации, не имея мощной духовной и идеологической основы и обладая в большей степени внешне обусловленным характером, не могут долго быть устойчивыми.

России нужно построить такое общество и такую экономику, где было бы возможным сочетание интересов разных социальных слоев и групп, но при этом все были бы объединены ***общей национальной идеей***, понимали бы, что делают общее дело, строят одну страну и свое будущее связывают именно с ней.

В этом случае, слагаемыми общенациональной идеи могут стать те цивилизационные скрепы, культурные идеалы, цели, планы, которые на определенном историческом этапе сплачивают нацию, мобилизуют и вдохновляют народ на решение конкретных задач.

Подводя итоги XI Рождественских Парламентских встреч, Патриарх Московский и Всея Руси Кирилл заявил о необходимости создания национальной идеологии в стране, которая могла бы объединить всех людей, независимо от партий, образования и культуры: «Национальная идеология – это и есть национальная идея – это то, что реально объединяет всех, скрепляет людей. И

[13] По итогам выборов в Государственную думу РФ в 2021 г. партия Единая Россия получила большинство мест в думе (324 места), как следует из данных ЦИК РФ//www.interfax.ru

[14] По данным опроса, проведенного ВЦИОМ с 30 мая по 5 июня 2022 года, высоким уровнем доверия россиян неизменно пользуется президент РФ Владимир Путин: ему безусловно доверяют и «скорее да, чем нет» **80.8**% опрошенных. Высоким рейтингом доверия пользуется председатель правительства РФ Владимир Мишустин (**63.5**%). Другие представители властных и политических элит не имеют большого кредита доверия у россиян: зампредседатель Совета Безопасности РФ Дмитрий Медведев -**34.1**%; лидер КПРФ Геннадий Зюганов -**33.1**%; глава фракции «Справедливая Россия - За правду» Сергей Миронов- **29.2**%; новый председатель ЛДПР Леонид Слуцкий -**17.9**%; руководитель «Новых людей» Алексей Нечаев -**10,1**%.

что, мы с вами от национальной идеи откажемся? Никак не можем отказаться. Но и с горяча не надо формулировать национальную идею. Она не может быть привязана к какому-то контексту. Национальная идея – это навсегда или на обозримое будущее[15]». Патриарх Кирилл предложил создать общенациональную идею, без которой, по его мнению, не может существовать многонациональное и многоконфессиональное государство. «Важно найти объединяющую идею и объединиться всем: государственной думе, общественным организациям и церкви, и создать национальную идею для Великой страны[16]».

Говоря о народе и будущем России, Президент РФ В. Путин в Послании к Федеральному собранию в 2018 г. отметил: «С точки зрения важнейшей задачи обеспечения качества жизни и благосостояния людей мы, конечно, еще не достигли необходимого нам уровня... Именно здесь нам нужно совершить решительный прорыв».

В интервью программе «Москва. Кремль. Путин», высказывая свое мнение об объединяющей общенациональной идее, В. Путин сказал, что именно «***патриотизм***» является сегодня ***национальной идеей России***».[17]

Президент Р.Ф. В. Путин напомнил также об историческом периоде раздробленности Руси, «которая привела к тому, что с запада подходили одни завоеватели, с востока другие, и народ страдал сотни лет, такое не забывается». Результатом этого исторического опыта, по мнению российского лидера, является «понимание в общественном сознании, что во времена суровых, тяжелых испытаний единственное спасение и условие для движения вперед – единство».[18]

Отдельно отметим, что **семья, род и народ** представляют собой ***триединый источник патриотизма***. Патриотизм опирается на родовые корни и питается любовью ко всему родному – к своей семье, к своему роду в лице предков и потомков, к своему народу, к его истории, культуре и языку [12].

Патриотизм и сегодня действует как объединяющая сила в российском обществе в условиях системного кризиса, жесткого цивилизационного противостояния с консолидированным Западом и проведения СВО на Украине. Так, по данным ВЦИОМ, более 70% опрошенных россиян поддерживают решение президента РФ о проведении СВО на Украине. Общественная поддержка этого решения достаточно устойчива и практически не меняется на протяжении всего года.

Понимание целей проведения спецоперации также остается стабильным. По мнению 38% респондентов, спецоперация преследует цели защитить Россию, разоружить Украину и не дать разместить военные базы НАТО на ее территории. Для каждого пятого (20%) цель заключается в защите населения Донбасса (ДНР и ЛНР). Еще 19% опрошенных назвали целью изменение политического курса Украины и очищение ее от нацистов, и только 8% полагают, что цель -это оккупировать Украину и присоединить ее к России.

Часть российского общества консолидировалась перед лицом опасности самого существования России как суверенного государства. Уровень общественных и личных протестных настроений в России заметно снизился - в декабре 2022 года 83% респондентов заявили, что, скорее всего, не примут участие в акциях протеста в случае, если они состоятся.[19]

Любовь к Родине и реальная угроза национальным интересам, потери независимости объединила все здоровые патриотические силы России – государственников-консерваторов, социалистов, либерал-консерваторов, центристов и др.

На наш взгляд, основными факторами и условиями формирования ***национальной идеологии***[20] России являются:

– определение идеологии как системы ценностей, заявленных государственных установок и взглядов на будущее России, положительно воздействующих на ментальность, моральный комфорт, межличностные отношения, духовное здоровье и позитивные умонастроения в обществе;
– утверждение системы ценностно-целевых установок, направленных на интеграцию общества по принципу «за», а не «против», независимо от политических, конфессиональных, этнокультурных, стратово-классовых и гендерных различий;
– возвращение бесценного исторического опыта обеспечения взаимосвязи и развития культурной самобытности коренных российских этносов в единстве общероссийской культуры и русского языка;
– тщательное изучение и учет традиционных интересов и глобальных притязаний российского государства как государства-лидера Евразийской

[15] Заключительное выступление Святейшего Патриарха Кирилла на XI Рождественских Парламентских встречах в Государственной Думе 26 января 2023г. Источник: Патриархия.ru. 26 января 2023 г.
[16] Там же.
[17] https://tass.ru/obschestvo/8438743?utm_source=yandex.ru&utm_medium=organic&utm_campaign=yandex.ru&utm_referrer=yandex.ru
[18] Там же.
[19] Там же
[20] **Национальная идеология** – система взглядов, представлений, ценностей, основанных на принципах духовного единства, общности нации и приоритета ее интересов во всех сферах общественной жизни. // Крысько В.Г., Фельдштейн Д.И. Этнопсихологический словарь. 1999 г.

локальной цивилизации в последовательной хронологической иерархии в целях обеспечения национальной цивилизационной безопасности и лидерства страны на Евразийском пространстве и в мире (*проектирование идеологии в динамике*);
- обеспечение преемственности исторического и культурного развития государства, этнической и национальной самоидентификации граждан в сохранении и развитии феномена полиэтнической и поликонфессиональной России как уникального целостного явления в многополярном мире;
- активное позиционирование «***важности и необходимости***» России для мирового сообщества в качестве надежного стабилизирующего актора в условиях противостояния между Западом и Востоком.

Национальная идеология в новом понимании должна соответствовать действующей Стратегии национальной безопасности Российской Федерации.[21] Но, прежде всего, необходимо окончательно определиться с пониманием места и роли России в мировом сообществе. Актуальные вопросы места и роли России в Евразийской модели локальной цивилизации изложены в монографии [13].

Пора признать, что Россия не просто региональное государство, а самостоятельный субъект современной цивилизационной структуры мира. В центре российской цивилизационной модели миропорядка стоят: полиэтничность, поликонфессиональность, опыт интеграции цивилизационных полюсов на обширном этнокультурном евразийском пространстве, взаимосогласие и добровольные формы политической организации этносов, общества и социополитических элит [14].

Заключение

Важным условием цивилизационной безопасности России в третьем тысячелетии является формирование общенациональной идеологии, в основу которой авторы предлагают положить следующие принципы.

1. Нужно хорошо понимать, что господствующая ныне либеральная идеология различных направлений и течений базируется на идеях прагматизма, философии постмодернизма, метамодернизма и интерсекциональности, в основе которых лежит результат, выгодный той или иной группе людей, именуемых политической элитой, независимо от того, несет или не несет он в себе истину, а народу можно навязать любую идеологию, что привело к росту ксенофобии, радикализма, русофобии и ненависти к России и Президенту РФ В. Путину.
2. Цивилизационными скрепами России являются: «Традиционные российские духовно-нравственные ценности; Гражданская солидарность; Героический патриотизм; Соборность (религиозная, светская); Коллективизм; Русский язык».
3. Направления общенациональной идеологии РФ включают: «Качественный и инклюзивный рост благосостояния граждан за счет творческого прорыва на новый уровень духовной, материальной и физической культуры, справедливого социального устройства и безопасного инновационного технологического развития».

[21] УтвержденаУказом ПрезидентаРоссийской Федерациот 2 июля 2021 г. № 400

Литература

1. *Пазюк Ю.В., Ефимова В.П.* Концептуальные основы безопасного цивилизационного развития России. Вопросы национальной безопасности. М. 2022. С. 73-75.
2. *Панарин А.С.* Глобальное политическое прогнозирование. М. 2002. С. 249.
3. *Панарин А.С.* Православная цивилизация / Сост., предисл. В. Н. Расторгуев / Отв. ред. О. А. Платонов. М.: Институт русской цивилизации. 2014. С. 24-25.
4. *Нарочницкая Н.А.* Русский код развития. М.: Книжный мир. 2013. С. 101.
5. *Сирота Н.М.* Идеологии и идеологические течения: Классическое наследие и современность.2009// http://window.edu.ru/resource/009/76009/files/Ideologies_and_ideological_currents_by_Sirota.pdf.
6. *Мангейм К.* Идеология и утопия//Мангейм К. Диагноз нашего времени. М.: Юрист. 1994.
7. Русский консерватизм: основные направления и этапы развития / В. А. Гусев; М-во образования Рос. Федерации. Твер. гос. ун-т. Тверь: Твер. гос. ун-т. 2001. 235 с.
8. *Матвейчев О.А.* Виды идеологий в Новое время и место консерватизма// https://matveychev-oleg.livejournal.com/1117190.html
9. *Anna Kende, Peter Kreko.* “Xenophobia, prejudice, and right-wing populism in East-Central Europe”// ”Current Opinion in Behavioral Sciences”. Vol. 34. August. 2020. P. 29-33, online: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352154619301299
10. Русская доктрина. Государственная идеология эпохи Путина. Под общ. Ред. А.Кобякова и В.Аверьянова. М.: Институт русской цивилизации. 2016. 1056 с.

11. *Burke E.* Reflections on the French Revolution. London: J.M. Dent & Sons LTD. 1951.
12. *Ростовцев В.Н.* Гуманитарная основа развития // «Академия Тринитаризма». М. Эл № 77-6567, публ.27976, 13.07.2022.
13. *Пазюк Ю.В., Ефимова В.П.* Стратегическое управление: безопасность развития России как государства-лидера Евразийской локальной цивилизации в третьем тысячелетии. Вопросы национальной безопасности. М. Изд. Технологии. Т. 8. 2021. 825 с.
14. *Андюсев Б.Е.* Национальная идея (национальная идеология) Российской Федерации.// https://topwar.ru/42215-nacionalnaya-ideya-nacionalnaya-ideologiya-rossiyskoy-federacii.html

Пазюк Юрий Васильевич. Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» РАН, г. Москва. Ведущий научный сотрудник. Доктор технических наук., профессор, член-корр. Область научных интересов: стратегическое управление развитием социально-экономических систем (цивилизационный подход), социология, политология, теория цивилизаций, национальная цивилизационная безопасность России. E-mail: rasmet@yandex.ru

Ефимова Вера Петровна. НП ЭКЦ «МЭТ- Сертификация», г. Москва. Начальник аналитического отдела. Кандидат технических наук. Область научных интересов: социология, теория цивилизаций, теория базальных личностных конструктов. E-mail: rasmet@yandex.ru

Осипов Сергей Николаевич. Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» РАН, г. Москва. Ведущий научный сотрудник. Кандидат физико-математических наук. Область научных интересов: математическое моделирование социально-экономических процессов. E-Mail: osipov@isa.ru

The Ideology of Russia in the context of the Russia-West confrontation

Yu.V. Pazyuk[I], V.P. Efimova[II], S.N Osipov[I]

[I] Federal Research Center “Computer Science and Control” of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia;

[II] NP EKC “MET - Certification», Moscow, Russia;

Abstract. The results of the study of the problem of ensuring the safe development of Russia in the XXI century in the context of the creation of a national ideology are presented. It is shown that in the conditions of Russia’s civilizational confrontation with the countries of the Western world and the unprecedented increase in geopolitical tensions, Russia’s security cannot be ensured at the proper level without creating a nationwide ideology capable of consolidating Russian society. We are talking about the very survival of Russia, the protection of our cultural and civilizational code.

Keywords: *ideology, leading state, Eurasian local civilization, conservatism, economic liberalism, socialists, patriotism.*

DOI: 10.14357/20790279230313

References

1. *Pazyuk YU.V., Efimova V.P.* Konceptual’nye osnovy bezopasnogo civilizacionnogo razvitiya Rossii. Voprosy nacional’noj bezopasnosti. M.: 2022. P. 73-75.
2. *Panarin A.S.* Global’noe politicheskoe prognozirovanie. M. 2002. P. 249.
3. *Panarin A.S.* Pravoslavnaya civilizaciya / Sost., predisl. V. N. Rastorguev / Otv. red. O. A. Platonov. – M.: Institut russkoj civilizacii. 2014. P. 24-25.
4. *Narochnickaya N.A.* Russkij kod razvitiya. M.: Knizhnyj mir. 2013. P. 101.
5. *Sirota N.M.* Ideologii i ideologicheskie techeniya: Klassicheskoe nasledie i sovremennost’.2009// http://window.edu.ru/resource/009/76009/files/Ideologies_and_ideological_currents_by_Sirota.pdf.
6. *Mangejm K.* Ideologiya i utopiya//Mangejm K. Diagnoz nashego vremeni. M.: YUrist. 1994.
7. Russkij konservatizm: osnovnye napravleniya i etapy razvitiya / V. A. Gusev; M-vo obrazovaniya Ros. Federacii. Tver. gos. un-t. - Tver’: Tver. gos. un-t. 2001. 235 p.
8. *Matvejchev O.A.* Vidy ideologij v Novoe vremya i mesto konservatizma// https://matveychev-oleg.livejournal.com/1117190.html
9. *Anna Kende, Peter Kreko.* “Xenophobia, prejudice, and right-wing populism in East-Central Europe”// ”Current Opinion in Behavioral Sciences”. Vol.

34. August 2020. Pp. 29-33. online: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352154619301299
10. Russkaya doktrina. Gosudarstvennaya ideologiya epohi Putina. Pod obshch. Red. A.Kobyakova i V.Aver'yanova.-M.: Institut russkoj civilizacii. 2016. 1056 p.
11. *Burke E.* Reflections on the French Revolution. London: J.M. Dent & Sons LTD. 1951.
12. *Rostovcev V.N.* Gumanitarnaya osnova razvitiya // «Akademiya Trinitarizma», M., El № 77-6567, publ.27976, 13.07.2022.
13. *Pazyuk YU.V., Efimova V.P.* Strategicheskoe upravlenie: bezopasnost' razvitiya Rossii kak gosudarstva-lidera Evrazijskoj lokal'noj civilizacii v tret'em tysyacheletii. Voprosy nacional'noj bezopasnosti. -M.: t.8, Izd. Tekhnologii. 2021. 825 p.
14. *Andyusev B.E.* Nacional'naya ideya (nacional'naya ideologiya) Rossijskoj Federacii.// https://topwar.ru/42215-nacionalnaya-ideya-nacionalnaya-ideologiya-rossiyskoy-federacii.html

Pazyuk Yuri Vasilievich. Doctor of technical Sciences, Professor, corresponding member. Russian ecological Academy, leading researcher of the Federal Research Center «Computer Science and Control» of the Russian Academy of Sciences. Research interests: strategic management of development of socio-economic systems (civilizational approach), sociology, political science, theory of civilizations, civilizational security of Russia. Author of a number of monographs, methods and patents, Laureate of the Russian Government Prize in science and technology. E-mail: rasmet@yandex.ru

Efimova Vera Petrovna. Candidate of technical Sciences, head of analytical Department of NP EKC "MET - Certification". Research interests: sociology, theory of civilizations, theory of basal personal constructs. The author of methodology of research of personal capital of the person, a technique of psycho-diagnostic assessment of personal properties of the person, methods of cost estimation of the total human capital. Author of a number of patents for invention, monographs and publications. E-mail: rasmet@yandex.ru

Osipov Sergey Nikolaevich. Leading researcher of Federal Research Center 'Computer Science and Control' of the Russian Academy of Sciences. PhD in Physics and Mathematics-Sciences, senior researcher. Research interests: modeling and forecasting of developing systems. E-mail: isa@isa.ru

Trudy Instituta sistemnogo analiza Rossiyskoy akademii nauk (ISA RAN)
(Proceedings of the Institute for Systems Analysis Russian Academy of Sciences (ISA RAS))

http://www.isa.ru/proceedings/

The journal was founded in 2002
The journal is published quarterly

Founder
Federal Research Center "Computer Science and Control" of Russian Academy of Sciences (FRC CSC RAS)
44/2, Vavilova str., Moscow, 119333, Russia, tel: +7(499)135-62-60,
e-mail: frccsc@frccsc.ru, http://www.frccsc.ru

Editor-in-Chief
Popkov Y.S., Academician of RAS, Professor,
9, Prospekt 60-letiya Oktyabrya, Moscow, 117312, Russia,
tel: +7(499)135-42-22, e-mail: popkov@isa.ru

Editorial Chairs
Popkov Y.S., Academician of RAS, Professor
Chairman of Editorial Board (Moscow, Russia)
Konstantinov I.S., Professor (Belgorod, Russia)
Scherbov S.Y., Professor (Vienna, Austria)
Smuelian B.L., Professor (Tel-Aviv, Israel)
Solovyov A.V., Professor,
Deputy Editor–in-Chief (Moscow, Russia)
van Wissen Leonardus J.G., Professor (Amsterdam, Netherlands)

Editorial Board

Aleskerov F.T., Professor (Moscow, Russia)
Ashimov A.A., Professor (Almaty, Kazakhstan)
Belov S.P., Professor (Belgorod, Russia)
Bulychev A.V., Ph.D., Executive Secretary (Moscow, Russia)
Burkov V.N., Professor (Moscow, Russia)
Gelovani V.A., Academician of RAS, Professor (Moscow, Russia)
Ilin A.V., Corresponding Members of RAS (Moscow, Russia)
Krut'ko V.N., Professor (Moscow, Russia)
Lexin V.N., Professor (Moscow, Russia)
Livshits V.N., Professor (Moscow, Russia)
Magnitsky N.A., Professor (Moscow, Russia)
Mizhidon A.D., Professor (Ulan-Ude, Russia)
Orlova E.R., Professor (Moscow, Russia)
Petrovsky A.B., Professor (Moscow, Russia)
Shvetsov A.N., Professor (Moscow, Russia)
Smirnov A.V., Professor (St. Petersburg, Russia)
Tishenko V.I., Ph.D. (Moscow, Russia)
Voytishek A.V., Professor (Novosibirsk, Russia)

Editorial Office
Shibaeva L.S., managing editor

Editorial address
9, Prospect 60-letiya Oktyabrya, Moscow, 117312, Russia
E-mail: tisa@isa.ru, tel. +7 (499) 135-24-33, +7 (926) 490-87-87

Scientific journal "Trudy Instituta sistemnogo analiza Rossiyskoy akademii nauk (ISA RAN)" publishes materials on a wide range of fundamental problems of developing systems analysis methodology and its applying to solving various problems in the field of science and practice. The journal is destined for scientists, engineers and researches working within the framework of these problems, as well as for politicians, employees of state and municipal departments, specialists of enterprises and representatives of social organizations. The rules for articles submission to the journal, as well as for their review are given at the journal's site

The journal is registered in Federal service of observing and controlling legislation in the area of mass media and protection of cultural heritage in 20 of May 2016. Digital certificate - ПИ № ФС77-65718.
Journal Subscription Index in the Ural-Press e-catalog (http://ural-press.ru) is 36089.

The journal is supported by the Department of Information Technologies and Computing Systems of the Russian Academy of Sciences.
The journal is included in the list of leading peer-reviewed scientific journals recommended by the Higher Attestation Commission.

Permission of the editorial board and authors is required when using data of the journal.

© Federal Research Center "Computer Science and Control" of Russian Academy of Sciences

Vol. 73
Issue 3

ISSN 2079-0279
2023

TRUDY
INSTITUTA SISTEMNOGO ANALIZA ROSSIYSKOY AKADEMII NAUK (ISA RAN)

(PROCEEDINGS OF THE INSTITUTE FOR SYSTEMS ANALYSIS RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES (ISA RAS))

ISBN 978-5-6048784-7-7

9 785604 878477

Отпечатано в ООО «Поли Принт Сервис»
127015, г. Москва, ул. Бутырская, д. 86
127247, г. Москва, Дмитровское шоссе, д. 100, стр. 2
Формат 60x84/8. Зак. № В-606/2
Тираж 100 экз.
Тел.: +7 (495) 797-35-59