Российская академия наук

ЭКОНОМИКА И МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ

Том 58 № 2 2022

Журнал основан в январе 1964 г.
Выходит 4 раза в год
ISSN 0424-7388

Журнал издается под руководством
Отделения общественных наук РАН

Главный редактор

В.Е. Дементьев

Редакционная коллегия:

А.А. Афанасьев, С.А. Афонцев, А.Р. Бахтизин (зам. главн. ред.),
В.А. Волконский, Н.А. Волчкова, Ю.Н. Гаврилец, Г.В. Егоров, Р.С. Ениколопов,
А.В. Захаров, С.Б. Измалков (зам. главн. ред.), В.Л. Квинт, Г.Б. Клейнер, М. Кубонива,
А.М. Либман, В.Н. Лившиц, В.Л. Макаров, В.М. Полтерович, А.Б. Поманский,
А.В. Савватеев, Е.В. Устюжанина (зам. главн. ред.), И.С. Шитова (зам. главн. ред.)

Заведующая редакцией Н.С. Виноградова

Журнал «Экономика и математические методы»
входит в Перечень ВАК, базы данных РИНЦ,
Web of Science (Emerging Sources Citation Index)

Адрес редакции:

117418, г. Москва, Нахимовский просп., 47, ком. 305
Тел.: 8(499) 129-39-33, 8(916) 139-27-26
e-mail: emm@cemi.rssi.ru

Москва

© Российская академия наук, 2022
© Составление. Редколлегия журнала
«Экономика и математические методы», 2022

СОДЕРЖАНИЕ

Том 58, номер 2, 2022

Академику В.Л. Макарову — 85 5

Теоретические и методологические проблемы

Makarov V.L., Bakhtizin A.R., Epstein J.M. Agent-based modeling for a complex world. Part 2 7

Клейнер Г.Б. Универсальная система факторов производства 22

Скрыпник Д.В. Развитие экономического моделирования. Эконометрический аспект 32

Чанлинь Юй. Обзор подходов к трактовке «проблемы Джозефа Нидхэма» 43

Народнохозяйственные проблемы

Монгуш Б.С., Богданов А.И., Чупикова С.А. Логистический подход к организации этноэкономических промышленных кластеров (на примере Республики Тыва) 54

Математический анализ экономических моделей

Машкова А.Л., Дукхи Н., Каур Р., Неволин И.В. Прогнозирование динамики распространения анемии в регионах России на базе агент-ориентированной модели 64

Кораблев Ю.А. Определение параметров процесса образования редких событий в экономике для их последующего прогнозирования 80

Karmalita V.A. Predicting the trajectory of economic cycles 92

Лесик И.А., Перевозчиков А.Г. Статическая модель рынка разработки программного обеспечения на основе транспортной задачи с нефиксированными добавками по времени 97

Методы оптимизации

Смоляк С.А. Доходный подход к задачам оптимизации ремонтной политики 112

* * *

М.Д. Ильменскому — 85 125

Ю.Е. Сцепинский 127

Russian Academy of Sciences

ECONOMICS AND MATHEMATICAL METHODS

VOLUME 58 No. 2 2022

Founded in January 1964
4 issues a year
ISSN 0424-7388

The Journal is run under the supervision of the Department of Social Sciences at RAS

Editor-in-Chief

V.E. Dementiev

Editorial Board:

Afanasiev A.A., Afontsev S.A., Bakhtizin A.R. (Deputy Editor-in-Chief), Egorov G.V., Enikolopov R.S., Gavrilets Yu.N., Izmalkov S.B. (Deputy Editor-in-Chief), Kleiner G.B., Kuboniwa M., Kvint V.L., Libman A.M., Livshits V.N., Makarov V.L., Polterovich V.M., Pomanskiy A.B., Savvateev A.V., Shitova I.S. (Deputy Editor-in-Chief), Ustyuzhanina E.V. (Deputy Editor-in-Chief), Volchkova N.A., Volkonskiy V.A., Zakharov A.V.

Secretary of Editorial Staff N.S. Vinogradova

The journal "Economics and Mathematical Methods" is included in the list of the Higher Attestation Commission (HAC) and indexed in Russian Index of Scientific Citation, Web of Science (Emerging Sources Citation Index)

Editorial Address

Nakhimovskiy Prospect, 47, Office 305, Moscow, Russia, 117418
Tel.: +7(499) 129-39-33; +7(916) 139-27-26;
e-mail: emm@cemi.rssi.ru

Moscow

© Russian Academy of Sciences, 2022
© Composition. Editorial Board of Economics and Mathematical Methods, 2022

CONTENTS

Volume 58, No. 2, 2022

Academician V.L. Makarov — 85 5

Theoretical and methodological problems

Makarov V.L., Bakhtizin A.R., Epstein J.M. Agent-based modeling for a complex world. Part 2 7

Kleiner G.B. Universal system of the production factors 22

Skrypnik D.V. The economic modeling development. An econometric aspect 32

Changlin Yu. An overview of different approaches to the interpretation of "Needham's Grand Question" 43

Problems of national economy

Mongush B.S., Bogdanov A.I., Chupikova S.A. Logistics approach to organizing ethno-economic industrial clusters (case of the Tuva Republic) 54

Mathematical analysis of economic models

Mashkova A.L., Dukhi N., Kaur R., Nevolin I.V. Forecast of anaemia prevalence in the regions of Russia using the agent-based model 64

Korablev Yu.A. Determination of parameters for the formation process of rare events in the economy for their subsequent forecasting 80

Karmalita V.A. Predicting the trajectory of economic cycles 92

Lesik I.A., Perevozchikov A.G. Market's static model for software development based on a transport problem with non-fixed time additions 97

Optimization methods

Smolyak S.A. The income approach to the problems of optimizing the repair policy 112

* * *

M.D. Ilmensky — 85 125

Yu.Ye. Stsepinsky 127

ЭКОНОМИКА И МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ, 2022, том 58, № 2, с. 5–6

Академику В.Л. Макарову — 85

Академик Валерий Леонидович Макаров — ученик нобелевского лауреата и академика Л.В. Канторовича, окончил Московский государственный экономический институт в 1960 г. По распределению он получил направление на работу в Институт экономики и организации промышленного производства СО АН СССР. Именно здесь, в группе, возглавляемой академиком Л.В. Канторовичем, В.Л. Макаров сформировался как самобытный, эффективно и интересно работающий ученый в области математической экономики и экономико-математического моделирования, последовательно пройдя за 20 лет ступени старшего лаборанта, младшего и старшего научного сотрудника, кандидата экономических наук (1965 г.), заведующего лабораторией (1967 г.), доктора физико-математических наук (1969 г.), профессора (1970 г.), заведующего отделением в институте и одновременно заведующего кафедрой кибернетики в Новосибирском государственном университете и, наконец, заместителя директора института по научной работе (1973 г.). В 1979 г. Валерий Леонидович был избран членом-корреспондентом АН СССР, а в 1980 г. Президиум Сибирского отделения АН СССР приглашает его на должность главного ученого секретаря.

В 1983 г. Председатель ГКНТ академик Г.И. Марчук пригласил В.Л. Макарова переехать в Москву и возглавить ВНИИ проблем организации управления ГКНТ. В 1985 г. В.Л. Макаров переходит на работу в Центральный экономико-математический институт АН СССР на должность директора. В этой должности он проработал до 2018 г.

Академик Валерий Леонидович Макаров — известный российский экономист и математик мирового уровня, имеющий высокий научный авторитет в стране и за рубежом. Он обладает широким видением социально-экономических проблем современного мира и России, глубокими знаниями и высокой научной эрудицией в области математической экономики, компьютерного моделирования социально-экономических процессов, создания математического и компьютерного инструментария и его использования при исследовании проблем экономики общественного сектора, науки и образования. Под руководством В.Л. Макарова сложилась научная школа математического и компьютерного моделирования экономики.

За последние 15 лет при непосредственном участии В.Л. Макарова были разработаны теория построения и комплекс агент-ориентированных моделей для суперкомпьютеров; осуществлен запуск крупномасштабной агент-ориентированной модели социально-экономической системы России на суперкомпьютерах «Ломоносов» (МГУ им. М.В. Ломоносова) и «Тяньхэ-2» (Гуанчжоу, Китай). Результаты этой работы были отмечены в качестве важнейших итогов деятельности РАН.

Наиболее известные разработки в сфере агент-ориентированного моделирования были опубликованы Валерием Леонидовичем совместно с А.Р. Бахтизиным и Джошуа Эпштейном (мировым лидером в этой области) в монографии «Agent-based modeling for a complex world». Эта книга является попыткой подвести промежуточный итог в развитии агентного подхода посредством анализа наиболее заметных работ в этой сфере применительно к основным направлениям их использования (эпидемиология,

демография, пешеходное движение, киноиндустрия, транспорт, окружающая среда, землепользование, городское планирование, воспроизведение исторических событий, экономика и др.).

Под руководством В.Л. Макарова была разработана методология построения иерархической системы CGE-моделей (вычислимых моделей общего равновесия), отражающих отраслевые, региональные и институциональные аспекты экономики России. На основе разработанной методологии создания CGE-моделей были построены модели, нашедшие применение в деятельности Министерства экономического развития Российской Федерации, Федеральной службы по тарифам Российской Федерации, Счетной палаты Российской Федерации, Контрольно-счетной палаты г. Москвы, Фонда социального страхования Российской Федерации и др.

В.Л. Макаровым также был разработан теоретико-методологический подход к моделированию социальных процессов с использованием агент-ориентированных моделей, построенных на базе геоинформационных систем. Такой подход существенно дополняет парадигму имитационного моделирования социальных систем и относится к приоритетным направлениям в развитии науки и техники в нашей стране. Помимо этого, он организовал и возглавил исследования в области экономики знаний, прогрессивных технологий, инноваций.

Результаты исследований В.Л. Макарова за последние 10 лет опубликованы во многих научных отечественных и зарубежных периодических изданиях. Общее число его публикаций перевалило за 400 (среди них более 20 монографий).

В 2008 г. академик В.Л. Макаров стал лауреатом одной из высочайших наград в области науки — Демидовской премии, присуждаемой Научным Демидовским фондом за выдающийся вклад в построение компьютерных моделей экономики знаний для решения современных проблем России.

В последние годы В.Л. Макаров предложил и реализовал новые идеи реформы высшего экономического образования в ведущих вузах Москвы. Валерий Леонидович — научный руководитель факультета инноваций и новых технологий Московского физико-технического института, руководитель Высшей школы государственного администрирования МГУ им. М.В. Ломоносова, декан экономического факультета Государственного академического университета гуманитарных наук.

В.Л. Макаров более 30 лет являлся директором ЦЭМИ РАН. За это время ему удалось сохранить научный потенциал института, развить ряд новых научных направлений, укрепить материально-финансовую и вычислительную базу института. Валерий Леонидович активизировал деятельность института в сфере исследований фундаментальных проблем экономической теории, математической экономики и прикладных разработок. Результаты исследований, проводимых сотрудниками ЦЭМИ в рамках руководимого В.Л. Макаровым научного направления, отмечены зарубежными премиями: теоретической премией фон Неймана за совокупный вклад в развитие теории и методов оптимизации (2009 г.) и премией американского математического общества Стефана Бергмана за фундаментальный вклад в теорию функций на комплексных многообразиях, теорию интегральных представлений многих комплексных переменных и многомерных уравнений Коши–Римана (2011 г.).

Много сил и времени отдает В.Л. Макаров научно-организационной и общественной работе в качестве заместителя председателя ученого совета и председателя диссертационного совета ЦЭМИ РАН, члена исполкома Международной экономической ассоциации, члена-учредителя Международного эконометрического общества, главного редактора и члена редколлегии журнала «Экономика и математические методы», члена редколлегии трех иностранных научных журналов, члена Совета по науке, наукоемким технологиям и инновационной деятельности при Председателе Государственной думы Российской Федерации, председателя Экспертного совета Комитета Государственной думы Российской Федерации по науке и образованию.

В.Л. Макаров был награжден медалью «В память 850-летия Москвы» (1997 г.), Почетной грамотой Правительства Российской Федерации «За большой вклад в подготовку и проведение Года Российской Федерации в Китайской Народной Республике и Года Китайской Народной Республики в Российской Федерации» (2009 г.), Почетной грамотой Правительства Российской Федерации «За заслуги в научной работе, значительный вклад в дело подготовки высококвалифицированных специалистов и многолетний добросовестный труд» (2012 г.).

В 2017 г. ФАНО России выразило благодарность В.Л. Макарову за безупречный труд и высокие достижения в профессиональной деятельности, а в 2022 г. Указом Президента РФ он награжден орденом «За заслуги перед Отечеством» II степени.

Коллектив ЦЭМИ РАН и редколлегия журнала сердечно поздравляют Валерия Леонидовича Макарова с 85-летием. Желают ему здоровья и новых творческих успехов!

ЭКОНОМИКА И МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ, 2022, том 58, № 2, с. 7–21

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ

Agent-based modeling for a complex world. Part 2

© 2022 V.L. Makarov, A.R. Bakhtizin, J.M. Epstein

V.L. Makarov,
Academician of the Russian Academy of Sciences, Russia's largest (prominent) specialist in the field of computer modeling of socio-economic processes; Scientific Director of the Central Economics and Mathematics Institute of the Russian Academy of Sciences; President of the Russian School of Economics (New Economic School); Director of the Higher School of Public Administration of the Moscow State University, Moscow, Russia; e-mail: makarov@cemi.rssi.ru

A.R. Bakhtizin,
Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences; Director of the Central Economics and Mathematics Institute of the Russian Academy of Sciences; Professor at the Moscow State University; Certified CGE Modeler (World Bank Institute Certified); Holder of professional certificates from Microsoft Company (Microsoft Certified Professional, Microsoft Certified Application Developer, Microsoft Certified Solution Developer), Moscow, Russia; e-mail: albert.bakhtizin@gmail.com

J.M. Epstein,
Professor of Epidemiology at the New York University (NYU) School of Global Public Health, and founding Director of the NYU Agent-Based Modeling Laboratory, with affiliated faculty appointments to the Courant Institute of Mathematical Sciences, and the Department of Politics.

Received 10.12.2021

The authors thank Elena Boinovich and Milana Sidorenko for their assistance in the technical edition.

The reported study was funded by Russian Science Foundation according to the research project no. 21-18-00136 "Development of a software and analytical complex for assessing the consequences of intercountry trade wars with an application for functioning in the system of distributed situational centers in Russia."

Abstract. The main goal of this paper is to summarize selected developments in the field of artificial societies and agent-based modeling and to suggest, how this fundamentally new toolkit can contribute to solving some of the most complex scientific and practical problems of our time. The entire field of agent-based modeling has expanded dramatically over the last quarter century, with applications across a remarkable array of fields, at scales ranging from molecular to global. The models described in this paper are a small part of worldwide scientific and practical developments in the field of agent-based modelling and related areas. We have attempted to give an impression of the vast range of application areas (epidemiology, economics, demography, environment, urban dynamics, history, conflict, disaster preparedness), scales (from cellular to local to urban to planetary), and goals (simple exploratory models, optimization, generative explanation, forecasting, policy) of agent-based modeling. Agent-based models offer a new and powerful alternative, or complement, to traditional mathematical methods for addressing complex challenges.

Keywords: agent-based models, epidemiology, pedestrian traffic, demographic processes, transport systems, ecological forecasting, land use, urban dynamics, historical episodes, conflict simulation, social networks, economic systems.

JEL Classification: C63, D91.

For reference: **Makarov V.L., Bakhtizin A.R., Epstein J.M.** (2022). Agent-based modeling for a complex world. Part 2. *Economics and Mathematical Methods*, 58, 2, 7–21. DOI: 10.31857/S042473880020009-8

6. GEOGRAPHY AND ENVIRONMENT

Forecasting the state of the environment using an agent-based approach can be distinguished as a separate major area. An overview of the most well-known models simulating the processes of environmental pollution due to human activities, the influence of the environment condition on the morbidity and mortality of the population, as well as the processes of managing the environmental aggravations is given in a recent publication by the staff of Central Economics and Mathematics Institute of the Russian Academy of Sciences (Makarov, Bakhtizin, Sushko, 2020). This article also reviews best practices in socio-ecological and economic agent-based modeling. The CEMI RAS Model includes two types of agents — people and enterprises.

The first type of agents determines the demographic dynamics and participates in the work of enterprises, and the second type of agents produces the products and releases emissions into the ecosystem of the territory (atmosphere and water). The polluted environment affects the level of health and mortality of people, but the model provides a mechanism for regulating emissions, which affects their amounts.

An important challenge is to popularize large-scale climate models with agents whose behaviors affect the climate itself. At the October 8–9, 2020 meeting of the BRICS[1] Working Group on information and communication technologies (ICT) and High-Performance Computing Systems chose the advance of these models as the flagship priority for all participating countries. The project "*Digital modeling of the Earth system*" was unanimously supported, and will couple an agent-based model representing human behaviors to the large scale climate model developed at Moscow State University by M.V. Lomonosov. This model forecasts the weather and climate of the Earth, taking into account a large number of factors (atmosphere, changes in the ocean conditions, ocean biogeochemistry, ionosphere dynamics, ice cover evolution) — for several dozen simulated layers of our planet with a resolution of 10 km (Stepanenko et al., 2020).

It will be among the first similar integrated human-climate models, and will help advance the monitoring and prediction of feedback effects between individual behaviors and environmental effects on worldwide scales.

7. LAND USE

Agent-based modeling of land use methods should be recognized as a special area. An early example is a model of irrigation systems in Indonesia (Lansing, Kremer, 1993). Since then, many agent-based land use models were developed (Matthews, Gilbert, Roach, 2007).

Interesting results were obtained by researchers from the University of Edinburgh, Heriot–Watt University (United Kingdom), the University of Waterloo (Canada), and the University of Ljubljana (Slovenia). The scientists developed an agent-based model for the municipality of Koper (Slovenia), considering the impact of changes in the land use regime on the quality of life of population. In particular, it showed an important trade-off, while industrial development results in the loss of high-quality agricultural land. However, the new residential areas improve the quality of life of the population (Murray-Rus et al., 2013).

An extended model including international effects was built by the scientists form five countries — USA, Netherlands, UK, Brazil, China (Dou et al., 2019). To study how changes in the land use regimes were influenced by international trade of agricultural products, an agent-based model (TeleABM) was developed. It was applied to the trade of soybeans between China and Brazil. One of the model's most important parameters was the price of a traded product, which influenced decisions on land use made at the farm-agent level. Recalling the micro-macro gap discussed earlier, the following feedback was found — changes in land use at the micro level affect the balance of supply and demand at the macro level.

To say more about the trading mechanics, farmer agents in the receiving system allocate their resources to grow soybeans, rice, and corn. Farmer agents in the sending system allocate their resources to grow a single-season soybeans, a double-season soybeans and corn, and/or a double-season soybeans and cotton (Dou et al., 2019). Fig. 11 shows the interface of the TeleABM model designed to change the control parameters and view the results. The screen displays two municipalities: (a) Sinop, Mato Grosso, Brazil and (b) Gannan, Qiqihaer, China, where land use regime depends on the values of exogenous parameters input by the user (panels (c) and (d)). It thus permits carrying many experiments.

Another related field is natural disaster resilience. Damage minimization against possible floods was studied with an agent-based model developed at RWTH[2] Aachen University (Germany). Micro-level agent (farmer) makes decisions on land use based on climat conditions, crop yields, price levels, and anticipated flood damage (Nabinejad, Schüttrumpf, 2017). Fig. 12 displays the operation window of the model, showing how agents (farmers, in yellow) are distributed over the territory, areas of which are partially flooded (highlighted in red). Each farmer communicates with his neighbours within a certain radius. Incoming information influences the decisions of the agents who receive it.

The diversity of agent-based land use models prompted researchers from three countries (USA, UK, Germany) to suggest using a common ODD (Overview, Design concepts, and Details) protocol to categorize many developed simulators (Polhill et al., 2008).

[1] BRICS is the acronym coined to associate five major emerging economies: Brazil, Russia, India, China, and South Africa.

[2] Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule.

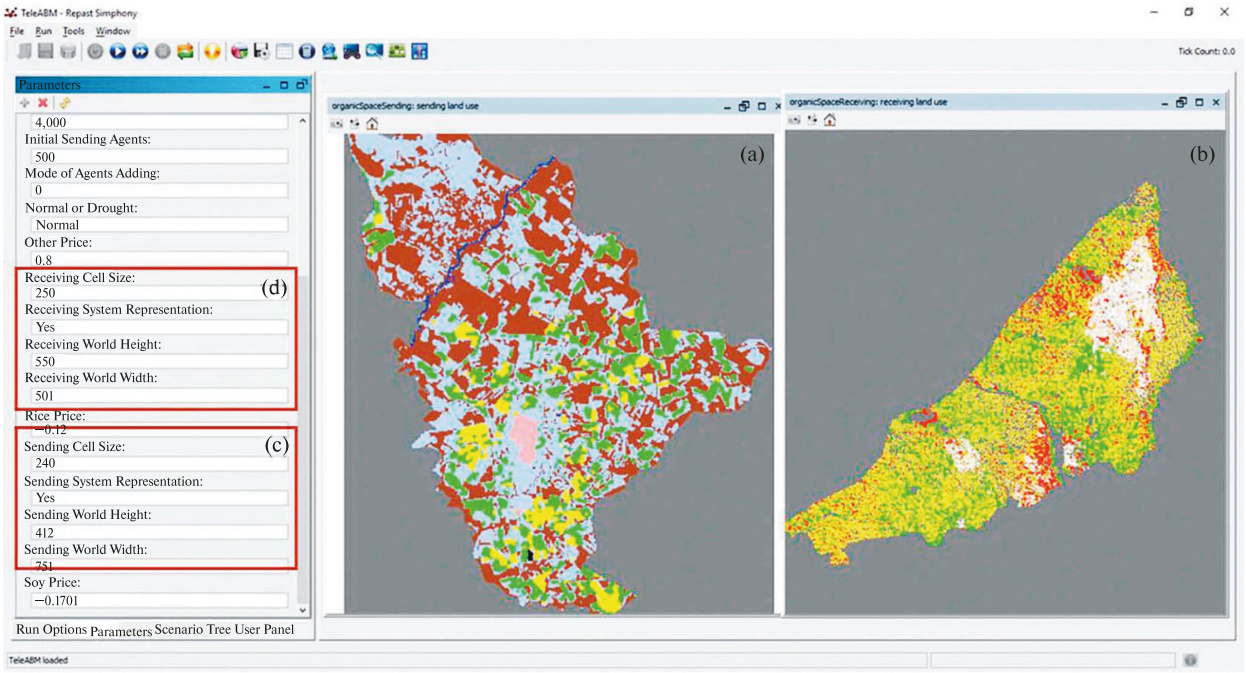


Fig. 11. TeleABM model interface: on the left panel (a): light blue — grassland, brown — forest, green–yellow — soybean corn, black — cotton; on the right panel (b): blue — water, green — soybean land, yellow — corn, white — rice paddy, and brown — built-up land

Source: Image from "Land-use changes across distant places: design of a telecoupled agent-based model" (Dou et al., 2019).

Fig. 12. Operation window of the model: agricultural land (damaged and used), farmers and their social networks

Source: Image from "An agent-based model for land use policies in coastal areas" (Nabinejad, Schüttrumpf, 2017).

8. URBAN DYNAMICS

We turn now to agent-based models of urban agglomeration, being closely related to the previous discussions. Recall that strength of ABMs is to give a formal account of how interactions at the micro-scale generate the macro-scale patterns and dynamics of interest, in this case — at the city level. Ideally, these ABMs would include micro modules simulating social, transport, environmental/ecological and other systems, interacting within a unified model. These would reveal how aggregate urban dynamics emerge 'from the bottom up'.

An example is a paper by researchers from several French research centers: "*Exploring intra-urban accessibility and impacts of pollution policies with an agent-based simulation platform*" (Fosset et al., 2016).

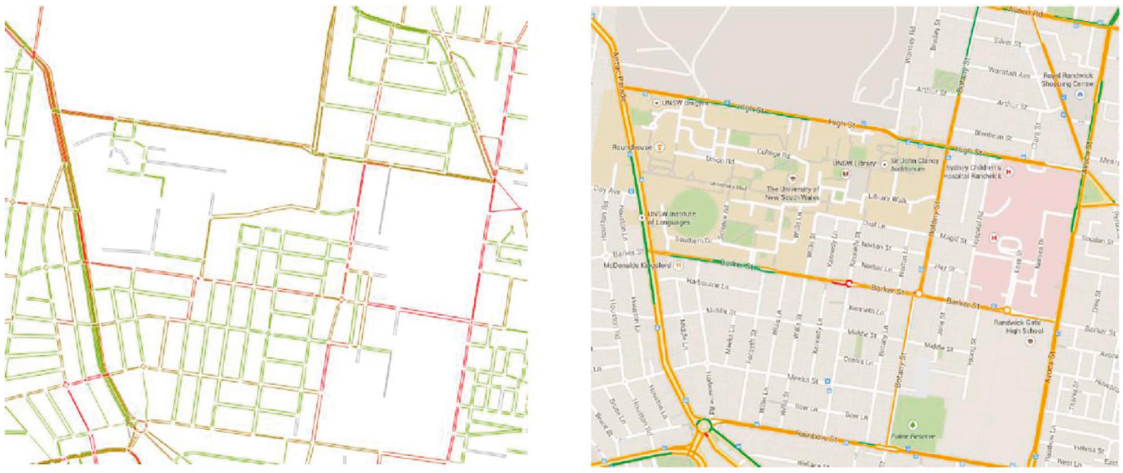
It represents a digital twin of Grenoble, a city of 160,000 inhabitants. The agents of the model reproduce daily activities of the townspeople (trips from home to work or school, business trips, walks, etc.) in accordance with the schedules compiled from surveys and statistical data collected from various sources. The simulator contains infrastructure facilities (schools, enterprises, etc.), a transport system, houses, etc., implemented on a geographic information system.

A module of the system calculates the changing environmental situation in the city and its impact on the residents. This project is demanding both in terms of resources and time, and has been underway for more than 15 years (Fosset et al., 2016).

Relatedly, a team of researchers from the University of Wollongong, Australia, describes an agent-based TransMob simulator that examines people living in Southeast Sydney and their needs for housing, transportation and social infrastructure. One of the output parameters of the model is the level of satisfaction of residents, which depends on a number of influencing factors. The authors note that TransMob is one of a few models that combine population dynamics, a traffic simulator, various land use modes, and other modules (Huynh et al., 2015). This ABM reproduces the daily life of the city quite accurately (Fig. 13). Planned extensions include traffic of freight transport and non-working trips of agent residents.

This research area was actively developing, within the international conferences dedicated to urban dynamics studied with the use of agent-based models. For example, one of the latest conferences on this topic — The 6th International Workshop on Agent-Based Modeling of Urban Systems — was held in May 021, and abstracts of selected reports are available at: http://modelling-urban-systems.com/abmus2021/proceedings/main.pdf

A common feature in this field is the use of geo-information technologies; here we would mention an aggregator site that collects information about projects implemented in this area: "*GIS and Agent-Based Modeling*."[3]



(a) (b)

Fig. 13. Traffic density around the University of New South Wales at 8:00 am: (a) screenshot of the TransMob simulator; (b) screenshot of Google Traffic Map.

Source: Image from "Simulating transport and land use interdependencies for strategic urban planning — An agent based modeling approach" (Huynh et al., 2015).

[3] https://www.gisagents.org

9. COMPUTATIONAL RECONSTRUCTION OF HISTORICAL EPISODES

The Artificial Anasazi Project, origins were recounted in (Epstein, 2006) was collaboration between the Brookings Institution, the Santa Fe Institute, and the World Resources Institute. It sought to model the rise and fall of the American Kayenta Anasazi over the period 900 AD to 1350 AD, at which point this civilization vanished from its lands. For archaeologists, the central question was, why? On the model of Sugarscape (Epstein, Axtell, 1996), the project digitized the entire environmental history (hydrology, soil fertility, maize potential, drought severity) and settlement patterns of the Anasazi from data accumulated by the Tree Ring Laboratory at the University of Arizona. Then, Artificial Anasazi households were built, with ethnographically based nutritional requirements, and rules for the founding of new families and households. Left to their own devices, the Artificial Anasazi replicated the main population and spatial dynamics of the true history over the entire period, with populations tracking the rise and fall of environmental conditions. The model showed that the environment could have sustained a small population of Anasazi, pointing to a combination of purely environmental and social factors to explain their enigmatic abandonment of the Longhouse Valley study area (see (Axtell et al., 2002)). For a colorful popular account of the research in "*Nature*", see "*Life with the artificial Anasazi*" (Diamond, 2002). Note that agent-based archaeology has grown into a vibrant field (e.g., (Kohler, Gumerman, 2000)).

The Anasazi model has been replicated many times (Janssen, 2009). This is an important point. Not only are agent-based models frequently calibrated to data, they are also replicated. Indeed, it is a strong norm in the agent-based modeling community that code should be an open source. And, in fact, the open source libraries available are now extensive (e.g., Netlogo, OpenABM).

Ancient warfare. Ancient warfare is another area where the agent-based computational reconstruction of historical events is promising. An impressive example is "*Modelling medieval military logistics: An agent-based simulation of a Byzantine army on the march*" by (Murgatroyd et al., 2012). This is part of their larger modeling project, "Medieval Warfare on the Grid" (MWGrid). They write: "MWGrid seeks to study behaviour dynamics at a larger scale, involving tens of thousands of agents, all within the context of modelling logistical arrangements relating to the march of the Byzantine army to the battle of Manzikert (AD1071). The defeat of Emperor Romanus Diogenes' IV army at Manzikert was a key event in Byzantine history, resulting in the collapse of Byzantine power in central Anatolia" (Haldon, 2005).

Needless to say, in explaining this crucial military outcome, historians face many gaps in the data, notably regarding the size of the Byzantine army. Without the check of a model, a consensus can form around certain assumptions despite a lack of hard evidence. Models can function as checks on these assumptions. One notable example is the assumption that the Manzikert army of Emperor Romanus Diogenes IV numbered up to 100 thousand people. Is this plausble, given what *can* be reconstructed?

As the authors write, "This was a major logistical challenge that involved the largest Byzantine army in over 50 years travelling more than 700 miles across what is now part of the modern state of Turkey, from near Constantinople (modern Istanbul) to Manzikert (modern Malazgirt) just north of Lake Van" (Fig. 14).

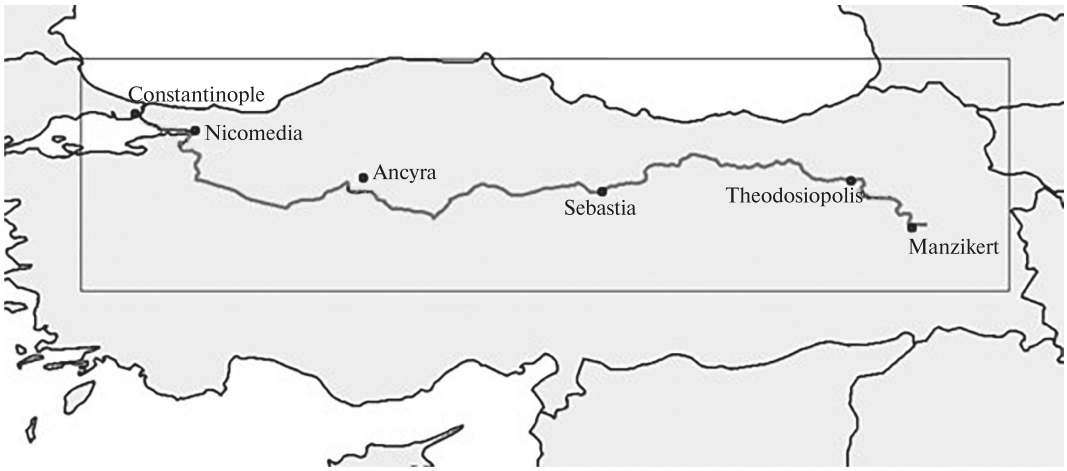


Fig. 14. Anatolia: possible route of a Byzantine army

Source: Image from "Modelling medieval military logistics: An agent-based simulation of a Byzantine army on the march" (Murgatroyd et al., 2012).

Through a very careful reconstruction of the landscape proper, the food supplies available from settlements along the route, cattle, grain and other logistical demands and constraints, their agent-based modeling (conducted at full population scale) calls the prevailing wisdom into question. And the difficulty of sustaining large armies over such great distances sheds new light on the calamitous defeat of the Byzantine army.

This kind of imperial over-reach has foundered on logistics more recently, the failed invasions of Russia by Napoleon and Hitler being examples. On the centrality of logistics in military history see Martin van Crevald "*Supplying War: Logistics from Wallenstein to Patton*" (Crevald, 1977). Agent-based models have also illuminated the size distribution of wars between states (Cederman, 2003).

10. SIMULATION OF CIVIL CONFLICT

Turning from inter-state to intra-state conflict, agent-based models have been used to explain revolutions and rebellions. Epstein's civil violence model has been replicated many times (Epstein, 2002). An implementation of it downloads with "Netlogo" was extended and calibrated empirically by (Lemos, 2017; Lemos, Coelho, Lopes, 2013). In the original model, there are civilian agents and cop agents. These agents move and interact on a landscape of sites.

Civilians can be actively rebellious or quiescent; they rebel if their grievance against the central authority exceeds their (risk-adjusted) likelihood of arrest.[4] A civilian estimates his arrest probability as the ratio of cops to active rebels within his vision. Specifically, he asks, "Were I to rebel, what would be the ratio of Cops to Actives within my vision (so the denominator can never be zero)."[5] Grievance is the product of economic hardship and the perceived illegitimacy of the regime. If grievance exceeds the arrest probability, the agent rebels. Otherwise, the one remains quiescent.

The theoretical model produces several stylized dynamics and counterintuitive results. Among the former are punctuated equilibrium in outbursts, and their spatially localized occurrence. A core experiment compares its two runs. In the first, the regime's legitimacy is reduced from its maximum (100) all the way to zero, but *in small increments*. Each time legitimacy falls incrementally, some agent's threshold is exceeded, and he rebels. But he rebels alone and is picked off. No rebellion occurs.

By contrast, if from the maximum of 100, legitimacy is reduced only to 80, *but in a single shock*, many agents go active at once, reducing the Cop-to-Active ratio for others, who then join and amplify the rebellion. It is not the absolute legitimacy reduction, but the shock that drives the rebellious cascade. Or, as S. Levitsky and D. Ziblatt warned us in their 2018 book, "*How Democracies Die*" (Levitsky, Ziblatt, 2018), it is precisely the slow incremental imperceptible erosion of liberties that requires vigilance.

11. RESEARCH ON SOCIAL NETWORKS

Social networks have long been recognized central in the study of group formation, information diffusion, and disease transmission, for example. Agent-based modeling is changing the study of social networks as well.

Researchers from the University of Surrey, in their paper "*Social Circles: A Simple Structure for Agent-Based Social Network Models*" built an agent-based framework for the creation of social networks with various topologies (Hamill, Gilbert, 2009). In addition to traditional network models (e.g., regular lattice, random network, small world network, scale-free network), their program uses a geometric property of circles (hence their title). As they write, "Taking the idea of social circles, it incorporates key aspects of large social networks such as low density, high clustering and assortativity of degree of connectivity. The model is very flexible and can be used to create a wide variety of artificial social worlds." Network topology can also be dynamic, as the duration of ties (friends, sexual partners) is heterogeneous and drawn from distributions, or generated endogenously (as in (Epstein, 2013)).

By contrast to the transient ties above, the GECS-Research Group on Experimental and Computational Sociology is focused on permanent changes in social network stucture related to the level of trust between market exchange participants. Their experiments on network topologies showed how dynamically changing networks can lead to increased collaboration between agents. Indeed, this suggests that dynamic networks generated endogenously can outperform those with a fixed topology (Bravo, Squazzoni, Boero, 2012).

---

[4] Technically, grievance minus arrest probability must exceed a threshold, normally set to zero.

[5] This is misunderstood by several commentators, who correct for the alleged division by zero, which is not possible if the agent includes itself in the denominator, as stipulated.

An overview of agent-based models applied to study social networks is given by the German scholars M. Will, J. Groeneveld, K. Frank and B. Müller in "*Combining social network analysis and agent-based modeling to explore dynamics of human interaction: A review*" (Will et al., 2020). More than 120 scientific publications on this topic were analyzed. The central conclusion is: the quantitative analysis of causal relationships between agent behaviors and network structures can illuminate their coevolution.

12. ECONOMICS

Agent-based modeling is changing the field of economics, at scales from the micro to the macro. At the micro-scale, there is a strong effort to develop next-generation agents that are more realistic cognitively than the canonical rational (expected utility maximizing) actor of traditional economics and game theory. Well-established human departures from textbook rationality include: base rate neglect, asymmetric weighting of gains and losses (Prospect theory), framing effects, anchoring, conformity effects, confirmation bias, contagious fear, and violations of the standard preference axioms (e.g., 'more is preferred to less') as in the Ultimatum Game and other experiments studied in behavioral economics. Moreover, the cognitive underpinnings of these departures from rationality are being identified by neuroscientists in the field of Neuroeconomics (Glimcher, Fehr, 2013). Agent-based modelers are building these cognitive mechanisms into next-generation agents. One recent attempt to incorporate cognitive drivers into an advanced agent is Epstein's Agent-Zero (Epstein, 2013), discussed earlier.

At a far larger scale, one of the most famous agent economics projects is a massively parallel agent-based model of the European economy — EURACE (Europe Agent-based Computational Economics). This is a collaboration of scientists from eight research centers in Great Britain, Germany, France and Italy, as well as the 2001 Nobel Laureate in economics Joseph Stiglitz (Deissenberg, van der Hoog, Dawid, 2008).

There are three types of agents in the model — households (tens of millions), manufacturing enterprises (hundreds of thousands), and financial organizations (hundreds). Regulators (government, central bank, etc.) are specified as a set of restrictions for the agents listed above. The model includes five types of markets (consumer, investment, labor, financial, and credit). For greater realism, agents are geo-referenced and data for model initialization is presented in the form of a geographic information system, which also contains infrastructure facilities — roads, educational institutions, shops, etc.

The calculations using the EURACE basic module made it possible to assess the degree of impact of the quantitative easing mechanism (after the 2008 financial crisis) on the duration of the economic downturn and the effectiveness of this method of monetary policy in combination with fiscal measures (Raberto, Cincotti, Teglio, 2014; Teglio et al., 2015).

On another topic, markets and inequality, German sociologist Niklas Luhmann famously hypthesized that economic systems amplify, and must amplify, initial inequalities in order to persist (Luhmann, 1988, p. 112). His ideas were tested in an agent-based Luhmann Economy model by A. Fleischmann (Fleischmann, 2005). The author is very guarded in his support of Luhmann's hypothesis, writing that "This timeframe may be long enough (our example with only 36 agents, 3 goods altogether 900 in number, needed more than 150,000 trade runs) to justify Niklas Luhmann's observation that the economy produces unevenness from unevenness." Fleischmann goes on to note several important qualifications and to suggest extensions required for a more decisive test. This illustrates how ABMs are being used not just to generate hyothesies, but to challenge them.

Agent-based modeling of financial markets should be singled out as a separate area. The Web of Science and SCOPUS bibliographic databases show that hundreds of agent-based models related to financial markets have been developed. The use of this tool is illuminating the micro-mechanisms of financial market operation through simulation[6]. Among the most cited agent-based modelers of financial markets is Thomas Lux, a professor at Keele University (U.K.). In his recent public lecture "*Agent-Based Models in Finance: Foundations, Explanatory Power and Application*" delivered on February 3, 2021, he noted that over the past decade, the validation of agent-based finance models has progressed dramatically with our ability "to extract information on 'hidden' variables such as sentiment which constitutes a salient building block of such models."[7] For a thorough review of agent-based computational models in finance see (LeBaron, 2006). More recently, Blake LeBaron (LeBaron, 2019) obtained fundamental results relating the trajectory of stock indices to expansions in the strategy sets available to traders.

[6] Agent-based modeling for central counterparty clearing risk, April, 2020. https://www2.deloitte.com/uk/en/pages/audit/articles/agent-based-modelling-for-central-clearing-risk.html

[7] https://wilmott.com/agent-based-models-in-finance-foundations-explanatory-power-and-applications

In 2016, Robert Axtell published a model in which 120 million agents self-organize into 6 million firms (Axtell, 2016). This built on his earlier agent model of firm formation dynamics, which successfully generated the observed Zipf distribution of firms' sizes in the US Economy, a statistical regularity that he also established and published in *"Science"* (Axtell, 2001). In contrast to classical models, which assume that the economy is in the state of equilibrium, in reality there is significant flux in almost all areas. For example, Axtell notes that (at the time of his publication) in the United States about 3 million employees find new jobs every month, i.e. about 1 of 40 employees change his job and 1 of 60 firms were closed. Indeed, for example, one of Axtell's results is: there are no stable equilibrium states in the labor market (Axtell, 2015). Yet, despite this turbulence at the micro level, the skewed Zipf distribution of firms' sizes is stationary.

The emergence of stationary distributions in the economy is the central concern of Econophysics, another recent development, which uses the tools of statistical mechanics to understand emergent phenomena in agent economies, with power law distributions in financial markets being a prominent topic. This approach was well-illustrated in "Colloquium: Statistical mechanics of money, wealth, and income" (Yakovenko, Rosser, 2009).

In this connection, a very interesting study was carried out by Robert Peckham (Peckham, 2013) at the University of Hong Kong. He investigated the spread of various kinds of infections (H1N1, H5N1, SARS, HIV/AIDS, etc.) *in conjunction with* the development of financial crises. This author identifies pairing these processes noting the similarity of their transmission mechanisms. His research indicates that problems in financial markets, conjoined with the spread of a pandemic, cause panic and economic instability, suggesting that the tools of epidemiology may offer economists promising avenues to "inoculate" agents against financial panics, often stimulated by speculators (the initial infectious agents).

According to the physicist, and chairman, and head of research at Capital Fund Management (Paris) Jean-Philippe Bouchaud (Agent-based economic models offer more realism. FT, 2018): "The study of '*complex physical systems'* made significant progress in the last 40 years and offers new ideas and methods. It is relevant for economics because it gained some success in modeling many systems exhibiting abrupt phenomena and tipping points that closely resemble crises. One of the best adapted tools to address these complex systems is agent-based models, which offers much more realism and flexibility than purely formal models from classical economics. Unlike these models, agent-based models are able to encapsulate the inherent 'human desires and misunderstandings' that lead to 'manias and panics.' Advanced economies are still dealing with the fallout from the 2008 crisis and economists still do not agree on its fundamental causes. We can certainly do better" (Bouchaud, 2018).

In applied economics, Agent Based Computational Economics (ABCE), should not go without mention. Leigh Tesfatsion, at Iowa State University, one of the pioneers in this sphere, defines the process of building models according to the ACE methodology as analogous to laboratory biological experiments with the use of a Petri dish. It is assumed that the developer sets the initial conditions and agent rules for the modeled system including its goals. Then the dynamics of this virtual world are generated endogenously, exclusively through the interaction of its agent constituents. L. Tesfatsion emphasizes that the ACE approach was developed as an addition to modern economic theory but without presupposing classic rationality, optimal choice, or equilibrium (Tesfatsion, 2002). For example, ACE posits unpredictable behavior by agents in relation to one other, and also models their adaptation to exogenous macro shocks. Many researchers are involved in the ACE project with several results available at http://www2.econ.iastate.edu/tesfatsi/ace.htm.

Since Alan Kirman's influential critique of the Representative Agent model of macroeconomics (Kirman, 1992), there was an attempt to develop Heterogeneous Agent Macroeconomics.

Included in this general movement, there are some attempts to relax several assumptions of Computable General Equilibrium Theory (CGET) and its extension, Dynamic Stochastic General Equilibrium Theory (DSGET), to obtain more realistic results. Central to this is a replacement of the single Representative Agent of macroeconomics with a larger number of heterogeneous agents. Diverse efforts were collected in "*Computational economics: Heterogeneous agent modeling*" (Hommes, LeBaron, 2018).

All of this led to several highly visible popular calls for agent modeling in Economics. In the 2003 article "*Agents of creation*"[8] in the *"*The Economist*"*, agent-based models were advocated as a new tool for modeling complex systems, an appeal reiterated in the 2010 "*The Economist*" article "*Agents of change*."[9] There, agents are considered as an alternative to dynamic stochastic general economic equilibrium models. In an editorial in the

[8] Article from "*The Economist*" magazine published in 2003: https://www.economist.com/science-and-technology/2003/10/09/agents-of-creation

[9] Article from "*The Economist*" magazine, published in 2010: https://www.economist.com/finance-and-economics/2010/07/22/agents-of-change

journal "*Nature*", agent-based modeling was advocated as a promising tool for studying complex socio-economic processes including markets (Farmer, Foley, 2009).

Agent-based modeling in the private sector

The agent-based approach is also used in modeling business processes. In their paper "*Agent-based modeling in marketing: Guidelines for rigor*" (Rand, Rust, 2011) discussed agent-based applications. They wrote: "Agent-based modeling can illuminate how complex marketing phenomena emerge from simple decision rules. Marketing phenomena that are too complex for conventional analytical or empirical approaches can often be modeled using this approach. Agent-based modeling investigates aggregate phenomena by simulating the behavior of individual 'agents' such as consumers or organizations". The authors used an agent-based model to replicate the Bass model of the diffusion of innovations. They also showed how extensions of the Bass model could be executed with a rigorous agent-based approach, but difficult to implement using traditional marketing research techniques.

At a more detailed level, researchers (Halaška, Šperka, 2018) from Silesian University (Czech Republic) with colleagues from Denmark developed a Multi-Agent Resource-Event-Agent (MAREA) framework integrated with an ERP (Enterprise Resource Planning) system. Their paper, "*Is there a need for agent-based modeling and simulation in business process management?*" presents the results of a model simulating a trading company selling computer cables. The impact of changes in a set of various kinds of input resources on the company's financial results was specifically assessed. Calculations showed that even small mico-level input changes have a statistically significant effect on the company's aggregate output and financial performance.

Software-analytical complex "MÖBIUS"

Over the course of many years, the Central Economics and Mathematics Institute of the Russian Academy of Sciences has developed methodological principles for constructing complex software-analytical complexes combining approaches to model. socio-economic processes, agent-based being prominent. Evolutionarily, CEMI RAS built a model complex "MÖBIUS"[10], which incorporated the advantages of different approaches and consisted of several blocks (Fig. 15).

All blocks of the MÖBIUS complex, although they were originally developed separately, are closely related to one another and represented a single integrated entity. The demographic agent module is the basic

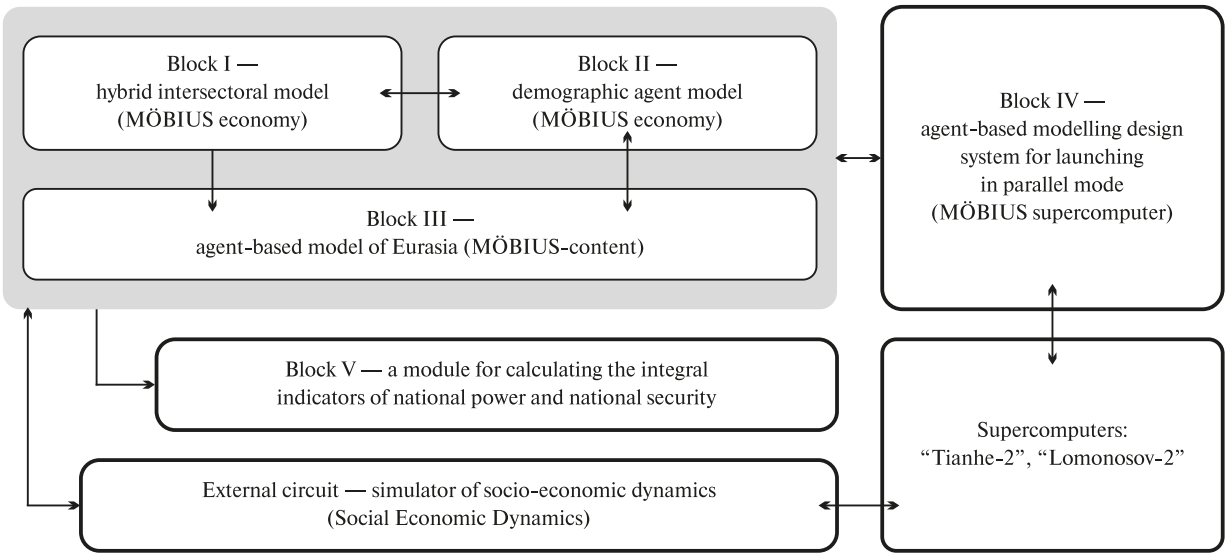


Fig. 15. Schema of the software-analytical complex "MÖBIUS"

Source: Image from "Software and analytical complex 'MÖBIUS' — a tool for planning, monitoring and forecasting the socio-economic system of Russia" (Bakhtizin, Ilyin, Khabriev et al., 2020).

[10] The name of the software-analytical complex is associated with two circumstances. First, the Möbius strip is the main symbol of the Central Economics and Mathematics Institute of the Russian Academy of Sciences, and its high relief adorns the Institute building. Secondly, this sign is the physical embodiment of infinity, which corresponds to the scale of the computational capabilities of one of the modules — "MÖBIUS-supercomputer", capable of technically implementing models with about 10^9 agents on the world's most productive systems (including exascale supercomputers).

element for the agent-based model of the Eurasian continent, and also governs the dynamics of households for the inter-sectoral block "MÖBIUS-economy." This, in turn, is linked to the Eurasian scale model. To speed up the calculations, the "MÖBIUS-supercomputer" system can be connected to the tools which automatically distribute the executable program code over a user-specified number of processors for parallel execution (Bakhtizin et al., 2020).

Diverse calculations were carried out using MÖBIUS, including the following:

- forecast of changes in the age-sex structure of the population in the Russian regions (Bakhtizin et al., 2021);
- demographic changes in the European Union, taking into account such important factors, as the attitudes of people, influencing their reproductive behavior, as well as in-migration (Makarov et al., 2019);
- dynamics of labor migration between Russia and China (Makarov et al., 2017);
- the level of pollution in some regions of the Russian Federation, taking into account the spatial location of industries and stationary sources of emissions (Makarov, Bakhtizin, Sushko, 2020);
- forecast of the main macroeconomic indicators of Russia and its constituent entities as a result of changes in the rates of basic taxes, budget subsidies, the amount of money supply, key interest rate, prices for basic energy resources, dollar exchange rate, and other variables (Makarov, Bakhtizin, Khabriev, 2018).

A separate block is a module for calculating integral indicators of national power and national security for 193 UN member states. The weights of several dozen selected factors were calculated using methods of multivariate statistics.

Conclusion

The models described in this paper are a small part of the worldwide scientific and practical developments in the field of agent-based modelling and related areas. We have attempted to give an impression of the vast range of application areas (epidemiology, economics, demography, environment, urban dynamics, history, conflict, disaster alert), scales (from cellular to local to urban to planetary), and goals (simple exploratory models, optimization, generative explanation, forecasting, policy) of agent-based modeling. Agent-based models offer a new and powerful alternative, or complement, to traditional mathematical methods for addressing complex challenges. Ubiquitous processes in which heterogeneous individuals interact in space and in networks, driven by internal cognitive and external social, dynamics invite the use of agent-based models.

There are specialized journals publishing agent-based models developed for various spheres (for example, "*Journal of Artificial Societies and Social Simulation*"), and a growing number of Centers internationally. At our Centers specifically, on the Russian side, an international online-seminar "Artificial societies and information technologies" [11] was held at the premises of CEMI RAS since 2020. Scientists from many countries made reports on the developed agent-based models during the first year of its operation:

1) Russia (over 10 organizations);

2) China (Guangdong Science & Technology Infrastructure Center, Milestone software company, Joint Center for Mathematical and Economic Research, Sichuan Normal University, Guangdong University of Finance & Economics, Shanghai company Tianjin, University of Chinese Academy of Sciences);

3) Switzerland (Swiss Federal Institute of Technology, Zurich);

4) Germany (Technical University of Munich, University of Hamburg);

5) India (National Institute of Technology Durgapur, West Bengal);

6) Bulgaria (American University in Bulgaria (AUBG));

7) Kazakhstan (L.N. Gumilyov Eurasian National University, Nur-Sultan);

8) Ireland (University College, Dublin);

9) France (Institute National de la Recherche Agronomique);

10) Korea (Korea Advanced Institute of Science and Technology, Department of Industrial and Systems Engineering);

11) Canada (University of Alberta);

[11] https://www.abm-online.org

12) Brazil (Institute for Applied Economic Research, Pontifical Catholic University of Rio de Janeiro, Federal University of Juiz de Fora);

13) Colombia (Pontificia Universidad Javeriana);

14) Sweden (The Institute for Analytical Sociology);

15) Japan (Computational design studio ATLV);

16) United Kingdom (Simudyne) etc.

In the US, Epstein's New York University (NYU) Agent-Based Modeling Lab offers a two-semester curriculum, plus an online Introductory Course, on Agent-Based Modeling. NYU also held International conferences on Agent-based modeling in global health and recently formalized collaboration with the New Approaches to Economic Challenges (NAEC) initiative at the OECD in Paris to apply *Agent_Zero* epidemiology to economic and financial dynamics. In collaboration with NYU's Courant Institute for Mathematical Science, Epstein plans to build very large-scale epidemic models populated with cognitively plausible agents to forecast the effects of behavioral adaptation on global pandemic dynamics.

A cautionary note

While the future of agent-based modeling is bright, an important imperative — in terms of model transparency and statistical testing — is to follow Einstein's admonition to keep the models "as simple as possible, but no simpler." Freely adjustable parameters and agent decision rules should be added only if they truly add explanatory power. It is too easy to make complex agent models using the friendly development environments that have emerged of late. This temptation need be avoided. Even with elegant parameter sampling approaches (a simple example being Latin Hypercube), the evaluation of large-scale models with many parameters, each of which assuming many values, with many stochastic realizations for each combination quickly becomes computationally daunting. While large mathematical models are rarely interpreted analytically, large agent-based ones should be, in this sense, "interpretable computationally" if they are to fill the gap.

Important directions and challenges

The main goal of this paper was to summarize selected developments in artificial societies and agent-based modeling and to suggest how this fundamentally new toolkit can contribute to solving some of the most complex scientific and practical problems of our time.

Clearly, the entire field of Agent-Based Modeling expanded dramatically over the last quarter of a century, with applications across a remarkable array of fields, at scales ranging from molecular to global. The early (ca. 1990s) computational challenges to large-scale explanatory modeling have been largely overcome, with real-time policy modeling visible on the horizon. Of the many fruitful directions the field might take, we feel that three are especially effective.

One of them is to continue building models at the scale of entire economic, ecological, and epidemiologic regions — whether these correspond to the present political units or not. Obviously, pandemic diseases like COVID-19 are oblivious to political boundaries in a highly connected world, but so are climate changes and other forces.

Second, many of these phenomena are coupled. Disease epidemics affect economic dynamics. Climate change pushes mosquito ranges north, driving new diseases to mega-cities of the northern hemisphere. How would urbanization affect access to health and economic opportunity, as well as the political stability? These are important questions. While the data landscape is changing dramatically with the advent of massive global and social media, we cannot wait for "validation data" to these models. They are essential headlights in a highly uncertain future.

Third, we need propagating models with cognitively plausible agents. In some settings, human behavior is canonically rational, with well-informed individuals maximizing utility subject to budget constraints. But in other settings, non-deliberative emotional forces, like contagious fear, can eclipse deliberations, igniting collective behaviors like financial panics, ethnic violence, and the refusal of safe and effective vaccines (which WHO ranks in the top ten threats to global health) that are very far from optimal.

While focused calibrated agent-based models will continue to advance specific fields, we urge the development of coupled large-scale agent-based models populated by cognitively plausible agents. At the very least, these can inspire an integrated vision of our interconnected future and perhaps help us shape it in equitable and peaceful directions.

REFERENCES/СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Agents of change (2010). Conventional economic models failed to foresee the financial crisis. Could agent-based modelling do better? *The Economist,* July 24. Available at: https://www.economist.com/finance-and-economics/2010/07/22/agents-of-change

Agents of creation (2003). Artificial "agents" can model complex systems. *The Economist,* October 11. Available at: https://www.economist.com/science-and-technology/2003/10/09/agents-of-creation

Axtell R.L., Epstein J.M., Dean J.S., Gumerman G.J., Swedlund A.C., Harburger J., Chakravarty S., Hammond R., Parker J., Parker M. (2002). Population growth and collapse in a multiagent model of the Kayenta Anasazi in Long House Valley. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, May, 99 (suppl. 3), 7275–7279. DOI: 10.1073/pnas.092080799

Axtell R.L. (2015). Endogenous dynamics of multi-agent firms. *SSRN Electronic Journal*. DOI: 10.2139/ssrn.2827059

Axtell R.L. (2016). 120 million agents self-organize into 6 million firms: A model of the U.S. private sector. In: *Proceedings of the 2016 International Conference on Autonomous Agents & Multiagent Systems* (AAMAS '16). International Foundation for Autonomous Agents and Multiagent Systems. Richland, SC, 806–816. Available at: https://dl.acm.org/doi/10.5555/2936924.2937042

Axtell R.L. (2001). Zipf distribution of U.S. Firm Sizes. *Science*, 293 (5536), 1818–1820.

Bakhtizin A.R., Ilyin N.I., Khabriev B.R., Makarov V.L., Sushko E.D. (2020). Software and analytical complex "MÖBIUS" — a tool for planning, monitoring and forecasting the socio-economic system of Russia. *Artificial Societies*, 15 (4). DOI: 10.18254/S207751800012303-2 (in Russian). [**Бахтизин А.Р., Ильин Н.И., Хабриев Б.Р., Макаров В.Л., Сушко Е.Д.** (2020). Программно-аналитический комплекс «МЁБИУС» — инструмент планирования, мониторинга и прогнозирования социально-экономической системы России // *Искусственные общества*. Т. 15. № 4. DOI: 10.18254/S207751800012303-2]

Bakhtizin A.R., Makarov V.L., Maksakov A.A., Sushko E.D. (2021). Demographic agent-based model of Russia and assessment of its applicability for solving practical management problems. *Artificial Societies,* 16, 2 (in Russian). DOI: 10.18254/S207751800015357–1 [**Бахтизин А.Р., Макаров В.Л., Максаков А.А., Сушко Е.Д.** (2021). Демографическая агент-ориентированная модель России и оценка ее применимости для решения практических управленческих задач // *Искусственные общества*. Т. 16. Вып. 2. DOI: 10.18254/S207751800015357-1]

Bravo G., Squazzoni F., Boero R. (2012). Trust and partner selection in social networks: An experimentally grounded model. *Social Networks*, 34, 4, 481–492. DOI: 10.1016/j.socnet.2012.03.001

Cederman L.E. (2003). Modeling the size of wars: From billiard balls to sand piles. *American Political Science Review*, 97 (1), 135–150.

Crevald M. van (1977). Supplying war: Logistics from Wallenstein to Patton. New York: Cambridge University Press.

Deissenberg C., Hoog S. van der, Dawid H. (2008). EURACE: A massively parallel agent-based model of the European economy. *Applied Mathematics and Computation*, 204, 541–552. DOI: 10.1016/j.amc.2008.05.116

Diamond J. (2002). Life with the artificial Anasazi. *Nature,* 419, 567–568. DOI: 10.1038/419567a

Dou Y., Millington J.D.A., Bicudo Da Silva R.F., McCord P., Viña A., Song Q., Yu Q., Wu W., Batistella M., Moran E., Liu J. (2019). Land-use changes across distant places: Design of a telecoupled agent-based model. *Journal of Land Use Science*, 14, 3, 191–209. DOI: 10.1080/1747423X.2019.1687769

Epstein J.M. (2013). *Agent_Zero: Toward neurocognitive foundations for generative social science*. Princeton: Princeton University Press. 249 p.

Epstein J.M. (2002). Modeling civil violence: An agent-based computational approach. *Proceedings of the National Academy of Sciences.* May, 99 (suppl. 3), 7243–7250. DOI: 10.1073/pnas.092080199

Epstein J.M. (2006). *Generative social science: Studies in agent-based computational modeling*. Princeton: Princeton University Press. 352 p.

Epstein J.M., Axtell R. (1996). *Growing artificial societies: Social science from the bottom up*. Washington: Brookings Institution Press. The MIT Press.

Farmer J., Foley D. (2009). The economy needs agent-based modelling. *Nature*, 460, 685–686. DOI: 10.1038/460685a

Fleischmann A. (2005). A model for a simple Luhmann economy. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 8, 2. Available at: https://www.jasss.org/8/2/4.html

Fosset P., Banos A., Beck E., Chardonnel S., Lang C., Marilleau N., Piombini A., Leysens T., Conesa A., Andre-Poyaud I., Thevenin T. (2016). Exploring intra-urban accessibility and impacts of pollution policies with an agent-based simulation platform: GaMiroD. *Systems*, 4 (1), 5. DOI: 10.3390/systems4010005

Glimcher P.W., Fehr E. (Eds.) (2013). *Neuroeconomics: Decision making and the brain*. Second Edition. Academic Press. 577 p. ISBN-13: 978-0124160088.

Halaška M., Šperka R. (2018). Is there a need for agent-based modelling and simulation in business process management? *Organizacija*, 51 (4), 255–269. DOI: 10.2478/orga-2018-0019

Haldon J.F. (Ed.) (2005). General issues in the study of medieval logistics: Sources, problems, methodologies. Leiden, Boston: Brill.

Hamill L., Gilbert N. (2009). Social circles: A simple structure for agent-based social network models. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 12 (2), 3. Available at: http://jasss.soc.surrey.ac.uk/12/2/3.html

Hommes C., LeBaron B. (Eds.) (2018). *Computational economics: Heterogeneous agent modeling*. Handbook in Economics. Elsevier.

Huynh N., Perez P., Berryman M., Barthélemy J. (2015). Simulating transport and land use interdependencies for strategic urban planning — an agent based modelling approach. *Systems*, 3 (4), 177–210. DOI: 10.3390/systems3040177

Kirman A.P. (1992). Whom or what does the representative individual represent? *Journal of Economic Perspectives*, 6 (2), 117–136.

Kohler T.A., Gumerman G.J. (2000). *Dynamics in human and primate societies: Agent-based modeling of social and spatial processes*. Oxford University Press. Published to Oxford Scholarship Online. November. DOI: 10.1093/oso/9780195131673.001.0001

Lansing J.S., Kremer J.N. (1993). Emergent properties of Balinese water temple networks: 2 coadaptation on a rugged fitness landscape. *American Anthropologist*, 95, 97–114.

LeBaron B. (2006). Agent-based Computational Finance. In: H.M. Amman, D.A. Kendrick, J. Rust (Eds). *Handbook of Computational Economics*. Vol. 2. Ch. 24, 1187–1233. Elsevier. Available at: https://EconPapers.repec.org/RePEc: eee: hecchp:2–24

LeBaron B. (2019). Microconsistency in simple empirical agent-based financial models. *Computational Economics*, 1, 19. DOI: 10.1007/s10614-019-09917-8

Lemos C. (2017). *Agent-based modeling of social conflict: From mechanisms to complex behavior*. Berlin: Springer Verlag.

Lemos C., Coelho H., Lopes R.J. (2013). Agent-based modeling of social conflict, civil violence and revolution: State-of-the-art-review and further prospects. *CEUR Workshop Proceedings,* 1113, 124–138.

Levitsky S., Ziblatt D. (2018). *How democracies die*. New York: Broadway Books.

Luhmann N. (1988). *Die Wirtschaft der Gesellschaft (Suhrkamp taschenbuch wissenschaft)*. Frankfurt: Suhrkamp Verlag. 112 p.

Makarov V.L., Bakhtizin A.R., Beklaryan G.L., Akopov A.S. (2019). Development of software framework for large-scale agent-based modeling of complex social systems. *Software Engineering (Programmnaya Ingeneria)*, 10, 4, 167–177 (in Russian). [**Макаров В.Л., Бахтизин А.Р., Бекларян Г.Л., Акопов А.С.** (2019). Разработка программной платформы для крупномасштабного агент-ориентированного моделирования сложных социальных систем // *Программная инженерия*. Т. 10. № 4. С. 167–177. DOI: 10.17587/prin.10.167-177]

Makarov V.L., Bakhtizin A.R., Khabriev B.R. (2018). Performance evaluation of the mechanisms strengthening the state sovereignty of Russia. *Finance: Theory and Practice*, 22 (5), 6–26. DOI: 10.26794/2587-5671-2018-22-5-6-26 (in Russian). [**Макаров В.Л., Бахтизин А.Р., Хабриев Б.Р.** (2018). Оценка эффективности механизмов укрепления государственного суверенитета России // *Финансы: теория и практика*. Т. 22. № 5. С. 6–26. DOI: 10.26794/2587-5671-2018-22-5-6-26]

Makarov V.L, Bakhtizin A.R., Sushko E.D., Ageeva A.F. (2017). Agent-based approach for modelling the labour migration from China to Russia. *Economy of Region*, 13, 331–341. DOI: 10.17059/2017-2-1 (in Russian). [**Макаров В.Л., Бахтизин А.Р., Сушко Е.Д., Агеева А.Ф.** (2017). Агент-ориентированный подход при моделировании трудовой миграции из Китая в Россию // *Экономика региона*. Т. 13. Вып. 2. С. 331–341. DOI: 10.17059/2017-2-1]

Makarov V.L., Bakhtizin A.R., Sushko E.D. (2020). Agent-based model as a tool for controlling environment of the region. *Journal of the New Economic Association*, 45, 151–171. DOI: 10.31737/2221-2264-2020-45-1-6 (in Russian). [**Макаров В.Л., Бахтизин А.Р., Сушко Е.Д.** (2020). Агент-ориентированная модель как инструмент регулирования экономики // *Журнал Новой экономической ассоциации*. № 45. С. 151–1712. DOI: 10.31737/2221-2264-2020-45-1-6]

Matthews R.B., Gilbert N.G., Roach A., Polhill J.G., Gotts N.M. (2007). Agent-based land-use models: A review of applications. *Landscape Ecology*, 22, 1447–1459. DOI: 10.1007/s10980-007-9135-1

Murgatroyd P., Craenen B., Theodoropoulos G., Gaffney V., Haldon J. (2012). Modelling medieval military logistics: An agent-based simulation of a Byzantine army on the march. *Computational and Mathematical Organization Theory*, December, 18, 4, 488–506.

Murray-Rust D., Rieser V., Robinson D.T., Miličič V., Rounsevell M. (2013). Agent-based modelling of land use dynamics and residential quality of life for future scenarios. *Environmental Modelling & Software*, 46, 75–89. DOI: 10.1016/j.envsoft.2013.02.011

Nabinejad S., Schüttrumpf H. (2017). An agent-based model for land use policies in coastal areas. *Coastal Engineering Proceedings*, 1 (35), Management. 9. DOI: 10.9753/icce.v35.management.9

Peckham R. (2013). Economies of contagion: Financial crisis and pandemic. *Economy and Society*, 42, 2, 226–248. DOI: 10.1080/03085147.2012.718626

Polhill J.G., Parker D., Brown D., Grimm V. (2008). Using the ODD protocol for describing three agent-based social simulation models of land-use change. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 11 (2), 3. Available at: http://jasss.soc.surrey.ac.uk/11/2/3.html

Raberto M., Cincotti S., Teglio A. (2014). *Economic policy and the financial crisis. Routledge Frontiers of Political Economy*. Taylor & Francis, ch. 9.

Rand W., Rust R.T. (2011). Agent-based modeling in marketing: Guidelines for rigor. *International Journal of Research in Marketing*, 28, 3, September, 181–193. DOI: 10.1016/j.ijresmar.2011.04.002

Stepanenko V.M., Bopape M.J., Glazunov A.V., Gritsun A.S., Lykosov V.N., Mortikov E.V., Porto F., Rivin G.S., Sithole H., Tolstykh M.A., Vilfand R.M., Volodin E.M., Voevodin V.V. (2020). *HPC and Weather/Climate/Environment applications: Global challenges and opportunities for BRICS-cooperation*. Presentation on 4th Meeting of the BRICS Working group on Information and Communication Technology and High Performance Computing. Nizhny Novgorod, Russia, 2020 October 8–9 Available at: https://istina.msu.ru/conferences/presentations/338451642/

Teglio A., Mazzocchetti A., Ponta L., Raberto M., Cincotti S. (2015). *Budgetary rigor with stimulus in lean times: Policy advices from an agent-based model*. Working Papers 2015/04. Economics Department. Universitat Jaume I, Castellón (Spain). Available at: https://ideas.repec.org/p/jau/wpaper/2015-07.html

Tesfatsion L. (2002). Agent-based computational economics: Modelling economies as complex adaptive systems. December. Available at: http://www.econ.iastate.edu/tesfatsi (http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.64.7064&rep=rep1&type=pdf).

Will M., Groeneveld J., Frank K., Müller B. (2020). Combining social network analysis and agent-based modelling to explore dynamics of human interaction: A review. *Socio-Environmental Systems Modelling*, 2, 16325. DOI: 10.18174/sesmo.2020a16325

Yakovenko V.M., Rosser J.B. (2009). Colloquium: Statistical mechanics of money, wealth, and income. *Rev. Mod. Phys*. 81, 1703 (December 2).

Агент-ориентированное моделирование для сложного мира. Часть 2

© 2022 г. В.Л. Макаров, А.Р. Бахтизин, Дж.М. Эпштейн

В.Л. Макаров,
академик РАН, крупнейший в России специалист в области компьютерного моделирования социально-экономических процессов; научный руководитель Центрального экономико-математического института РАН; президент Российской экономической школы; директор Высшей школы государственного администрирования МГУ, Москва; e-mail: Makarov@cemi.rssi.ru

А.Р. Бахтизин,
член-корреспондент РАН; директор Центрального экономико-математического института РАН; профессор Московского государственного университета; сертифицированный специалист по CGE моделям (сертификат Всемирного банка); обладатель профессиональных сертификатов компании Microsoft (Microsoft Certified Professional, Microsoft Certified Application Developer, Microsoft Certified Solution Developer), Москва; e-mail: albert.bakhtizin@gmail.com

Дж.М. Эпштейн,
профессор эпидемиологии в Школе глобального общественного здравоохранения Нью-Йоркского университета и директор-основатель Лаборатории агентного моделирования Нью-Йоркского университета, аффилированной с Курантовским институтом математических наук.

Поступила в редакцию 10.12.2021

Авторы благодарны Елене Бойнович и Милане Сидоренко за помощь в технических вопросах подготовки материалов к изданию.

Исследование подготовлено при материальной поддержке Российского научного фонда (проект 21-18-00136 «Разработка программно-аналитического комплекса для оценки последствий межстрановых торговых войн с приложением для функционирования в системе распределенных ситуационных центров России»).

Аннотация. Основная цель статьи состоит в обобщении избранных разработок в области искусственных обществ и агент-ориентированного моделирования и определении того, как этот принципиально новый инструментарий может способствовать решению некоторых из самых сложных научных и практических проблем нашего времени. Сфера применения агентного моделирования значительно расширилась за последнюю четверть века, вобрав множество направлений в самых разных масштабах — от молекулярного до глобального. Описанные в статье модели являются лишь небольшой частью накопленных в мире научных и практических разработок в сфере агент-ориентированного моделирования. Дается представление о широком спектре областей применения моделей этого класса (эпидемиология, экономика, демография, окружающая среда, городская динамика, история, конфликты, стихийные бедствия и др.), масштабах использования (от биологических клеток до планетарного уровня) и целях разработки (исследовательских, генерации искусственных обществ, решения оптимизационных задач, прогнозирования, оценки геополитических сценариев и т.д.). Агент-ориентированные модели предлагают, с одной стороны, новую и мощную альтернативу, а с другой, дополняют традиционные математические методы решения сложных задач.

Ключевые слова: агент-ориентированные модели, эпидемиология, пешеходное движение, демографические процессы, транспортные системы, экологическое прогнозирование, землепользование, городская динамика, исторические эпизоды, моделирование конфликтов, социальные сети, экономические системы.

Классификация JEL: C63, D91.

Для цитирования: **Makarov V.L., Bakhtizin A.R., Epstein J.M.** (2022). Agent-based modeling for a complex world. Part 2 // *Экономика и математические методы*. Т. 58. № 2. С. 7–21. DOI: 10.31857/S042473880020009-8

ЭКОНОМИКА И МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ, 2022, том 58, № 2, с. 22–31

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ

Универсальная система факторов производства

© 2022 г. Г.Б. Клейнер

Г.Б. Клейнер,
ЦЭМИ РАН, Финансовый университет при Правительстве РФ, Государственный университет управления; Москва; e-mail: george.kleiner@inbox.ru

Поступила в редакцию 12.01.2022

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 20-010-00835).

Аннотация. В данной статье, основываясь на новой теории экономических систем, мы предлагаем универсальную концепцию факторов экономической деятельности, пригодную для моделирования экономических систем различного масштаба, характера и назначения. Принятая в настоящей статье концепция указывает на объективный генезис единой системы агрегированных факторов производства, частными случаями которой являются классическая теория факторов производства, характерная для индустриальной экономики; маржиналистская теория факторов, характерная для индустриальной и постиндустриальной экономики; интеллектуальная теория факторов, характерная для экономики знаний и интеллектуальной экономики. Уточняются понятия фактора и системы факторов производства, представляющей совокупность независимых процессов, необходимых в целом и достаточных для реализации производства; уровень агрегирования при описании этих процессов должен соответствовать уровню агрегирования описания результатов производства. При разработке универсальной системы факторов производства мы модернизируем также понятия экономического явления и экономического пространства-времени, служащего вместилищем для этих явлений. Тем самым экономическое пространство-время уподобляется физическому пространству-времени, в каждой точке которого сосредоточены запасы материи (в экономическом пространстве — благ) и энергии (в экономическом пространстве — способностей эффективно использовать пространственно-временные ресурсы). Исследуются возможности сопряжения действия внутренних и внешних универсальных факторов на функционирование предприятия. Приводится пример построения параметрической производственной функции на базе системы универсальных факторов производства.

Ключевые слова: теория факторов производства, системная парадигма, неоклассическая система факторов производства, интеллектуальная система факторов производства, универсальная система факторов производства, экономические явления, производственная функция.

Классификация JEL: C00, D20, D24.

Для цитирования: **Клейнер Г.Б.** (2022). Универсальная система факторов производства // *Экономика и математические методы*. Т. 58. № 2. С. 22–31. DOI: 10.31857/S042473880020011-1

ВВЕДЕНИЕ

Понятие «*фактор*» относится к числу ключевых понятий экономики. Едва ли не вся экономическая теория может быть описана в терминах факторов и результатов экономических явлений. При этом результаты экономической деятельности одних экономических объектов и систем служат факторами деятельности других подобных объектов и систем. Таким образом, определение, идентификация и измерение факторов составляют основу экономической теории, а вместе с изучением возможностей управления факторами — основу экономической науки в целом. Стандартным на сегодняшний день является представление о системе факторов производства как о четверке факторов «земля», «труд», «капитал», «предпринимательство».

Вопрос о факторах производства в целом далеко выходит за пределы чисто экономического дискурса и существенно затрагивает принципы социального, политического, экологического подходов к организации общественной жизни (Cato, North, 2015). Теория факторов производства относится к числу фундаментальных концепций экономики (см., например, (Xu, Chaudhry, Li, 2009; Papava, 2017; Chang, Yang, 2011)). В начале развития она опиралась на классическую триаду: труд, земля,

капитал (А. Смит, Ж.-Б. Сэй, Д. Рикардо). Марксистская теория также выделяла три фактора: рабочую силу, средства труда и предметы труда. Маржиналистская теория расширила состав факторов до четырех: труд, земля, капитал, предпринимательская деятельность (А. Маршалл, Й. Шумпетер). При этом земля трактовалась как совокупность природных условий осуществления производственной деятельности. В дальнейшем теория факторов развивалась главным образом в сторону детализации и уточнения указанных факторов, включая выделение информационных, когнитивных, координационных, экологических и др. факторов. Современные взгляды на состав факторов производства отличаются разнообразием. Информационную составляющую, включая big data, ряд экономистов рассматривают как непременный фактор производства (Gentile, 2011; Xu, 2021; Brynjolfsson, Hitt, 1995). Другие исключают информацию из числа факторов производства (Papava, 2017). Неоднозначно и отношение экономистов к такому фактору, как природные ресурсы. С одной стороны, территория данной страны создает потенциал для социально-экономического развития, с другой — требует усилий для минимизации таких негативных явлений, как парниковый эффект и другие источники загрязнения воды и воздуха на территории данной страны. В некоторых источниках можно найти предложения радикального расширения перечня факторов, в том числе за счет включения фактора времени (Gentile, 2011). Взгляды на состав факторов производства изменяются также в зависимости от уровня управления экономикой. Обычно чем ближе этот уровень к микроэкономическому, тем более детальной выглядит система факторов (Złoty, 2019).); чем ближе этот уровень к макроэкономическому, тем более узким становится набор факторов, в то время как охват явлений, учитываемых каждым фактором, расширяется. Иными словами, уровень агрегирования факторов растет по мере повышения уровня управления экономикой. Наконец, в рамках одного уровня управления система рассматриваемых факторов производства меняется в зависимости от того, какой именно производственный объект рассматривается, какова его отраслевая, территориальная или организационно-правовая принадлежность. Такая ситуация крайне затрудняет бенчмаркинг и сравнение эффективности деятельности одного экономического объекта по сравнению с другими. Все это выводит постановку задачи построения более или менее универсальной системы факторов производства в число наиболее актуальных задач современной экономической науки.

Основываясь на системной парадигме и новой теории экономических систем, мы предлагаем универсальную концепцию факторов экономической деятельности, пригодную для изучения экономических систем различного масштаба, характера и назначения. Поиск такой системы аналогичен поиску универсальной системы циклов экономической динамики, объединяющей кратко-, средне- и длинноволновые экономические циклы (Румянцева, 2012). Принятая в настоящей статье концепция указывает на объективный генезис единой системы агрегированных факторов производства, частными случаями которой являются: классическая теория факторов производства, характерная для индустриальной экономики; маржиналистская теория факторов, характерная для индустриальной и постиндустриальной экономики, и интеллектуальная теория факторов, характерная для экономики знаний и интеллектуальной экономики (Клейнер, 2020, 2021). При этом мы уточняем понятия «фактор производства» и «система факторов производства», представляющие совокупность независимых процессов, в целом необходимых и достаточных для реализации производства и имеющих сходный с описанием результатов экономической деятельности уровень агрегирования. При разработке универсальной системы факторов производства мы модернизируем также понятия «экономическое явление» и «экономическое пространство-время», служащее вместилищем для этих явлений. Тем самым экономическое пространство-время уподобляется физическому пространству-времени, в каждой точке которого сосредоточены запасы материи (в экономическом пространстве — благ) и энергии (в экономическом пространстве — способностей эффективно использовать пространственно-временные ресурсы). Исследуются возможности сопряжения воздействия внутренних и внешних универсальных факторов на функционирование хозяйствующего субъекта. Приводится пример построения параметрической производственной функции на базе системы универсальных факторов производства.

1. УНИВЕРСАЛЬНАЯ СИСТЕМА ФАКТОРОВ ПРОИЗВОДСТВА: ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Вопрос об универсальности таких широко используемых в настоящее время экономических категорий, как «собственность», «предприятие», «эффективность» и т.п., неоднократно рассматривался в литературе (Papava, 2017; Cato, North, 2015). Отмечалось, что на различных этапах развития экономики в различных странах понимание содержания этих категорий было различным;

при этом экономическая система (уклад), характерная для данной страны в данный период, определяла содержание этих категорий, в то время как характеристика данной системы зависела от трактовки этих категорий. Иными словами, теоретическое микроописание экономики и ее теоретическое макроописание представляют собой неразрывное целое. Это обстоятельство ставит под сомнение возможность формирования универсальной системы факторов производства. Тем не менее решить эту проблему можно, если отойти от терминологии и концепций неоклассической и институционально-эволюционной парадигм и повысить уровень абстракции — подняться на уровень абстракции, присущий *системной экономической теории и системной парадигме в целом*. Центральным элементом в данной парадигме является понятие «система», объединяющее такие категории, как «предприятие», «отрасль», «регион», «процесс», «проект», «среда» и т.п. Цель состоит в том, чтобы, используя системную парадигму в контексте пространственно-временного анализа, выявить системные факторы функционирования производственных процессов.

Такое рассмотрение надо начинать с описания пространства-времени (экономического универсума), в котором имеют место (возникают, происходят, протекают) разнообразные экономические явления. Каждое явление связано с движением (в частном случае — отсутствием движения) экономической материи, т.е. экономических благ, имеющих, подобно физической материи, объем (аналог массы), локализацию и протяженность в пространстве и во времени. К числу экономических явлений относятся изменения состава, состояния или положения фрагментов реального или воображаемого мира, рассматриваемого с точки зрения экономики, в том числе такие феномены, как создание, функционирование, реорганизация, группировка и ликвидация фирм; установление или, наоборот, разрыв долговременных хозяйственных связей между экономическими агентами; планирование, инициация и реализация инвестиционных проектов; процессы или акты трансакций; локальные и глобальные институциональные сдвиги, значимое изменение цен, тарифов, налоговых и иных нормативов; инновационная деятельность и т.п.

Явления имеют пространственные и временные координаты, а также характеризуются условиями экономической деятельности, в том числе институтами, которые распространяются на определенный класс явлений. Таким образом, роль точек, или элементов, экономического пространственно-временного универсума исполняют экономические явления, каждое из которых идентифицируется положением в многомерной системе координат. Такая координатная система в общем случае имеет весьма сложный характер и состоит из множества разноречивых количественных и качественных признаков, характеризующих данное экономическое явление, включая такие показатели, как интенсивность производства, распределения, обмена и потребления экономических благ, данные реестра юридических лиц, законодательные и иные регуляторные акты, перечни применяемых технологий и т.п.

На сегодняшний день единая система описания координат экономических явлений отсутствует. Это вызывает серьезные трудности как в сфере мониторинга, так и в сфере регулирования развития экономики. Задача построения обобщенной типологии экономических явлений относится к числу междисциплинарных и требует для своего решения существенного повышения уровня абстракции экономической теории, включая терминологию, аксиоматику, эмпирику и методы обоснования результатов. Парадигмальный арсенал современной экономической науки по большому счету состоит из четырех парадигм: неоклассической (А. Маршалл), институциональной (Т. Веблен, Р. Коуз), эволюционной (Р. Нельсон, С. Уинтер, Дж. Дози, Дж. Ходжсон), системной (Я. Корнаи и его последователи). Междисциплинарный характер описания экономических явлений определяет выбор системной парадигмы как основы «координатной сетки» идентификации таких явлений.

Важным является вопрос об однородности, в том числе изотропности экономического пространства. Если абстрагироваться от различий в масштабе, характере, местоположении и целевой ориентации наполняющих пространство экономических явлений, то возникнет представление об экономическом пространстве-времени как об однородной среде, своеобразной экономической Вселенной. Снижая уровень абстрагирования, мы приходим к совокупности функционирующих экономических систем, допускающих группировки по различным признакам.

В масштабе экономики в целом экономическое пространство, в отличие от экономического времени, является изотропным. По отношению к конкретному экономическому объекту экономическое пространство является анизотропным, поскольку функционирование такого объекта связано с преобразованием «ресурсы → результаты» производства. Это дает возможность изучать факторы производства, рассматривая те или иные составляющие ресурсов как самостоятельные факторы производства. В общем случае под фактором некоторого экономического явления понимается

другое экономическое явление, объем (уровень, интенсивность, распространенность, длительность) которого влияет на первое явление. Под системой факторов данного экономического явления следует понимать совокупность факторов, являющуюся необходимой и достаточной для описания данного явления.

Таким образом, говоря о системе факторов производства на уровне фирмы, мы должны указать совокупность факторов, исследование которых позволяет сделать вывод об объеме производства продукции фирмы в тот или иной период.

Какие требования следует предъявлять к универсальной системе (комплексу) факторов производства? Прежде чем переходить к ответу на этот вопрос, отметим, что основным объектом и центром изучения является экономическая система, осуществляющая производство и реализацию продукции, удовлетворяющей внешнесистемный спрос. Таким образом, мы разделяем процесс предложения, результатом которого является готовый к реализации продукт (выпуск) и процесс формирования внешнего спроса. Комплекс факторов производства ориентируется на описание внутрисистемного процесса производства (производственной функции), в то время как комплекс факторов спроса ориентируется на описание процесса формирования внешнесистемного спроса (функции спроса). Отметим также двойственность понятия «производство»: с одной стороны, оно отражает процесс трансформации исходных ресурсов в продукцию, с другой — результат этого процесса, подлежащий реализации за пределами объекта (Клейнер, 2019).

Общие требования к системе (комплексу) факторов производства можно выразить следующим образом.

1. *Универсальность.* Каждый фактор, входящий в искомую систему, является в той или иной мере необходимым для функционирования производства. Совокупность этих факторов является достаточной для функционирования всех видов производства.

2. *Агрегированность.* Уровень обобщения (агрегирования) факторов примерно одинаковый и совпадает с уровнем обобщения (агрегирования) результата производства.

3. *Измеримость.* Каждый фактор допускает измерение своего объема в порядковой или более сильной качественной/количественной шкале. Результат производства также допускает измерение своего объема в порядковой или более сильной качественной/количественной шкале.

4. *Влиятельность.* Объем производства зависит от объемов факторов.

Легко убедиться, что ни одна из известных систем факторов производства не удовлетворяет данному набору требований. В этой ситуации встает задача разработки единой универсальной системы факторов производства для любых производственных объектов.

2. ИСТОЧНИКИ ФОРМИРОВАНИЯ ФАКТОРОВ ПРОИЗВОДСТВА

Системная парадигма в современной аранжировке акцентирует внимание исследователей на пространственно-временной локализации экономических явлений, связывая с каждым таким явлением одну или несколько экономических систем, имеющих пространственную протяженность и временную продолжительность. Тем самым пространственно-временные координаты рассматриваются как ведущие по отношению к остальным координатным элементам, а природа и поведение экономических систем связываются с особенностями их пространственно-временной локализации.

В рамках системной парадигмы движение экономической материи отождествляется прежде всего с двумя ключевыми динамическими процессами — *концентрацией (сгущением)* и *диссипацией (рассеянием)* экономической материи (экономических благ) в пространственно-временном универсуме. Можно усматривать аналогию между этой парой процессов и парой процессов «упорядочение — хаотизация», а также парой процессов «гетерогенизация — гомогенизация» пространства-времени. Комбинируя два вида базовых процессов — концентрации и диссипации с двумя видами измерений экономических явлений — пространственным и временным, мы получаем четыре группы базовых явлений в экономическом пространстве-времени: концентрация в пространстве — диссипация во времени; концентрация в пространстве — концентрация во времени; диссипация в пространстве — концентрация во времени; диссипация в пространстве — диссипация во времени. Применительно к движению экономических систем эти явления можно охарактеризовать следующим образом:

– «развитие» — неограниченное расширение в пространстве и продолжение во времени;

– «экспансия» — неограниченное расширение в пространстве при концентрации на определенном временном интервале;

– «пролонгация» — ограниченное распространение в пространстве при неограниченном движении во времени;

– «уплотнение» — концентрация движения в ограниченной пространственной области на ограниченном временном интервале.

Таким образом, мы получаем четыре вида факторов, определяющих движение (изменение) функционирующих экономических систем: «развитие», «экспансия», «пролонгация», «уплотнение».

Для функционирования предприятий воздействие фактора «развитие» означает расходование имеющихся ресурсов как на расширение занимаемых предприятием площадей (если в качестве пространства локализации предприятия рассматривается часть рынка продукции, занимаемая продукцией данного предприятия, то на увеличение доли рынка), так и на воспроизводственные или инвестиционные проекты, обеспечивающие работу предприятия в будущем. Воздействие фактора «экспансия» выводит на первый план задачи расширения площади локализации предприятия в экономическом пространстве (например, расширение доли рынка, занимаемой предприятием), в то время как инвестиционные проекты отходят на второй план. Воздействие фактора «пролонгация» означает, что приоритетной сферой расходования ресурсов предприятия являются воспроизводственные и инвестиционные проекты, в то время как цели расширения площади локализации предприятия отступают на второй план. Воздействие фактора «уплотнение» предполагает отказ предприятия от расширения границ локализации предприятия в пространстве и во времени и сосредоточение усилий на более интенсивном использовании имеющихся пространственно-временных ресурсов.

Варианты совместного действия процессов концентрации и диссипации в сферах пространственной и временной динамики отражены в табл. 1, в клетках которой расположены результаты сочетания этих процессов. В ряде случаев такое сочетание невозможно, если речь идет об альтернативных процессах в рамках одной и той же сферы, например концентрация и диссипация в пространстве или во времени. В таких случаях соответствующая клетка отмечается звездочкой. Соединение двух факторов, отражающих один и тот же процесс в одной и той же сфере, приводит нас к тому же фактору (диагональ таблицы).

Очевидно, что первопричиной этих четырех бинарных процессов (концентрация в пространстве — диссипация во времени; концентрация в пространстве — концентрация во времени; диссипация в пространстве — концентрация во времени; диссипация в пространстве — диссипация во времени) является проявление определенных сил, действующих в пространственно-временном континууме. Источником этих сил является деятельность экономических систем. Соответственно, природа этих сил обусловлена особенностями экономических систем, порождающих данные силы. Именно пара «концентрация в пространстве — диссипация во времени» возникает как следствие функционирования объектной системы, поддерживающей локализацию системы в пространстве и пролонгацию ее функционирования во времени; пара «концентрация в пространстве — концентрация во времени» — как следствие функционирования проектной системы, поддерживающей локализацию системы в пространстве и во времени; пара «диссипация в пространстве — концентрация во времени» — как следствие функционирования процессной системы, поддерживающей экспансию системы в пространстве и локализацию во времени; пара «диссипация

Таблица 1. Результаты совместного воздействия процессов концентрации и диссипации в пространстве и во времени на функционирование предприятия

	Концентрация во времени	Диссипация во времени	Концентрация в пространстве	Диссипация в пространстве
Концентрация во времени	Концентрация во времени	–	«Уплотнение»	«Экспансия»
Диссипация во времени	–	Диссипация во времени	«Пролонгация»	«Развитие»
Концентрация в пространстве	«Уплотнение»	«Пролонгация»	Концентрация в пространстве	–
Диссипация в пространстве	«Экспансия»	«Развитие»	–	Диссипация в пространстве

Таблица 2. Факторы производства и источники их действия

Пространство	Время	
	Концентрация	Диссипация
Концентрация	γ-фактор (проектный фактор)	δ-фактор (объектный фактор)
Диссипация	β-фактор (процессный фактор)	α-фактор (средовой фактор)

Таблица 3. Внешние и внутренние функции факторов производства

Влияние фактора	α-фактор	β-фактор	γ-фактор	δ-фактор
Внешние функции	Развитие	Экспансия	Уплотнение	Пролонгация
Внутренние функции	Целостность	Связность	Инновационность	Безопасность

в пространстве — диссипация во времени» — как следствие функционирования средовой системы, поддерживающей экспансию системы в пространстве и во времени. Это дает нам основание характеризовать фактор «развитие» как α-фактор; фактор «экспансия» — как β-фактор; фактор «уплотнение» — как γ-фактор; фактор «пролонгация» — как δ-фактор.

В итоге возникает концепция своеобразного экономического поля — экономического пространственно-временного континуума, каждая точка которого находится под действием в том или ином объеме четырех экономических факторов (сил): соответственно объектного, проектного, процессного и средового. Учитывая обозначения этих факторов, связанные с ролью соответствующих систем в функционировании экономики (Клейнер, 2011), мы можем говорить также о действии α-фактора (средового), β-фактора (процессного), γ-фактора (проектного) и δ-фактора (объектного) (табл. 2).

Интерпретация факторов функционирования производственных систем в виде результатов их воздействия на систему (развитие, экспансия, пролонгация, уплотнение) определяет взаимоотношения системы с ее окружением: развитие предполагает расширение границ в пространстве и во времени; экспансия — расширение границ в пространстве; пролонгация — изменение границ во времени; уплотнение — сохранение или сужение границ. Нормальное функционирование предприятия предполагает продолжение его деятельности как производственного комплекса. Это означает, что внутренняя жизнь предприятия не должна прекращаться под действием любых факторов. Для этого каждый фактор должен изменять не только внешние границы предприятия, но и обеспечивать условия функционирования внутри предприятия. Следующее распределение функций между факторами реализует это требование: внутренняя функция α-фактора — обеспечение внутренней целостности предприятия в пространстве-времени; внутренняя функция β-фактора — обеспечение связности внутреннего наполнения предприятия в пространстве; внутренняя функция γ-фактора — обеспечение инновационности предприятия; внутренняя функция δ-фактора — обеспечение безопасности границ предприятия и преемственности его работы во времени (табл. 3).

Приведенные в табл. 3 характеристики можно рассматривать как обобщенное описание факторной бизнес-модели деятельности предприятия, в которой отражается связь между действием факторов на внутреннее наполнение и на внешнее окружение предприятия (см. также (Клейнер, 2019)). Данная модель дает также ключ к измерению объемов факторов через характеристики внутренней целостности, связности, пролонгированности и плотности предприятия.

Приведенный анализ дает возможность сделать некоторые общие выводы относительно связи между конструкцией экономических систем и их взаимодействием с окружающей средой. Понятие «фактор производства» естественным образом распространяется с систем объектного типа, к числу которых относятся предприятия, осуществляющие обмен продуктами производства с окружающим пространством, на системы процессного и проектного типов. Объектные системы отграничены от пространственной части среды и не отграничены от ее временнóй части. Это означает, что для проникновения во внутреннее пространство объектной системы потоков внешних материальных, трудовых, информационных и институциональных ресурсов (так же, как и для обратного проникновения) необходимо пересечь границы объектной системы в пространстве. Таким образом, возникает возможность регистрировать входящие и выходящие потоки, а также внутрисистемный запас соответствующих благ. В частности, внутренняя институциональная среда состоит из внутренних институтов, характерных для данного предприятия, и внешних институтов, индуцированных извне и характерных для широкого круга предприятий. Процессные системы отграничены от временной части среды и не отграничены

от пространственной части среды; проектные системы отграничены как от временной, так и от пространственной частей внешней среды; средовые системы не отграничены ни от временной, ни от пространственной частей среды. Таким образом, формирование экономических систем происходит путем создания границ в пространстве/времени — своеобразных мембран с ограниченной проницаемостью для тех или иных видов экономических явлений.

В социально-экономических системах благодаря имманентной энергии социальных участников возникает концентрация энергии в отграниченных в пространстве/времени отсеках системы. В проектных (замкнутых) системах внутренняя энергия накапливается; в объектных (полуоткрытых) — находит свой выход в продолжении (пролонгации) жизненного цикла; в процессных (полуоткрытых) — находит свой выход в экспансии системы в пространстве; в средовых — распространяется во времени и в пространстве. Таким образом, проектные системы осуществляют функции пространственно-временной дифференциации (гетерогенизации) универсума; средовые системы — пространственно-временной интеграции (гомогенизации) универсума. Структура системы факторов функционирования экономических систем определяется конфигурацией границ этих систем в пространственно-временном континууме, а формирование этих границ — своеобразных перегородок в пространстве-времени — фактором процесса системообразования.

3. ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ ФУНКЦИЯ ПРЕДПРИЯТИЯ НА БАЗЕ УНИВЕРСАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ФАКТОРОВ ПРОИЗВОДСТВА

В системной экономической теории показывается, что каждая экономическая система может рассматриваться как тетрада (четырехэлементный комплекс), составленная из четырех систем средового, процессного, проектного и объектного типов. Отсюда следует, что комплекс α-, β-, γ- и δ-факторов, отражающих типологию экономических систем, является необходимым и достаточным условием функционирования производственной системы. Таким образом, данный комплекс факторов удовлетворяет первому требованию из числа сформулированных в разд. 1.

По тем же причинам α-, β-, γ- и δ-факторы относятся к тому же уровню агрегирования, что и сама производственная система. Таким образом, выполнено и второе требование.

Перед нами стоит задача сопоставить предложенный комплекс факторов с известными вариантами системы факторов производства.

Традиционную (неоклассическую) систему факторов деятельности предприятия, характерную для индустриальной и постиндустриальной экономики, а также интеллектуальную систему факторов деятельности фирмы, характерную для экономики знаний и интеллектуальной экономики, как следует из табл. 4, можно рассматривать как частные случаи предложенной универсальной системы факторов экономической деятельности. В табл. 4 приведена интерпретация указанных факторов, позволяющая ассоциировать каждый из них с α-, β-, γ- и δ-факторами универсальной системы и тем самым определить системную природу этих факторов.

Таблица 4. Соответствие элементов традиционной, интеллектуальной и универсальной систем факторов производства

Универсальная система факторов производства	Традиционная система факторов производства	Интеллектуальная система факторов производства
α-фактор (средовой фактор)	Земля (объем производственных площадей)	Эрудированность (насыщенность знаниями внутрифирменной среды)
β-фактор (процессный фактор)	Капитал (обеспечение наличия и взаимодействия элементов производственного процесса)	Координируемость (согласование функционирования различных компонент предприятия)
γ-фактор (проектный фактор)	Предпринимательская способность (решение задач управления и координации отдельных компонент производства)	Целенаправленность (возможность достижения конкретных целей конкретными участками производства к определенному моменту)
δ-фактор (объектный фактор)	Труд (совокупность субъектов, использующих свои физические и интеллектуальные возможности для производственной деятельности)	Интеллект (способность предприятия корректно определять цели и пути их достижения)

Модельным выражением действия факторов производства является производственная функция — зависимость между объемом выпуска продукции предприятия и объемами факторов производства. Для случая универсальных факторов производства соответствующая (универсальная) функция производства записывается в виде

$$Y = F(X_\alpha, X_\beta, X_\gamma, X_\delta), \tag{1}$$

где Y — объем производства; X_α — объем (уровень) средового фактора α; X_β — объем (уровень) процессного фактора β; X_γ — объем (уровень) проектного фактора γ; X_δ — объем (уровень) объектного фактора δ.

Для определения возможного вида функции F заметим, что факторы X_α, X_β, X_γ, X_δ соответствуют компонентам тетрады «средовая подсистема — процессная подсистема — проектная подсистема — объектная подсистема — средовая подсистема» (Клейнер, 2011). Эластичности замещения факторов производственной функции $F(X_\alpha, X_\beta, X_\gamma, X_\delta)$ отражают в первую очередь положение факторов внутри тетрады (соседнее или диагональное). Поскольку обмен ресурсами происходит в основном между соседними членами тетрады: X_α и X_β, X_β и X_γ, X_γ и X_δ, X_δ и X_α, — эластичности замещения факторов X_α и X_γ, а также X_β и X_δ минимальны (близки к нулю).

Для спецификации вида универсальной производственной функции примем следующие предположения. Существует зависимость между показателем результативности тетрады Y и показателями мощности подсистем $Y = F(X_\alpha, X_\beta, X_\gamma, X_\delta)$. Частные эластичности замещения показателей X_α, X_β, X_γ, X_δ в функции F в смысле Аллена–Узавы являются постоянными, т.е. F принадлежит к классу CESA (Клейнер, 1986).

Теперь согласно теореме Х. Узавы (Uzawa, 1962; Клейнер, 1986) множество переменных функции CESA может быть представлено в виде объединения нескольких непересекающихся подмножеств, внутри которых частные эластичности замещения между факторами постоянны, в то время как частные эластичности замещения между переменными, входящими в разные группы, равны 1.

Существует только одно разбиение множества переменных $\{X_\alpha, X_\beta, X_\gamma, X_\delta\}$ на подмножества, удовлетворяющее сформулированным требованиям, а именно $\{X_\alpha, X_\beta, X_\gamma, X_\delta\} = \{X_\alpha, X_\gamma\} \cup \{X_\beta, X_\delta\}$. В соответствии с теоремой Узавы при принятых предпосылках производственная функция тетрады имеет вид $Y = c \min (X_\alpha, X_\gamma)^a \min (X_\beta, X_\delta)^b$, где $a > 0$, $b > 0$, $c > 0$ — постоянные параметры.

Мы видим, что четырехфакторная производственная функция тетрады принимает форму композиции функции Леонтьева и функции Кобба–Дугласа. В таком виде она может использоваться для дальнейшей декомпозиции аргументов или, наоборот, для агрегирования производственных функций различных микроэкономических систем и построения мезо- и макроэкономических производственных функций на основе универсальных факторов производства.

Отметим, что измерение объема универсальных системных факторов представляет собой сложную и не до конца решенную научную проблему. В частности, объем каждого фактора может быть косвенно определен через число работников, занятых в системах соответствующего типа, а также через размер затрат, необходимых для функционирования таких систем (Клейнер, Рыбачук, 2017). В последнем случае для измерения объема соответствующего класса систем на основе финансовых показателей могут использоваться методы, аналогичные применяемым при стоимостной оценке активов, а именно — метод восстановительной стоимости и метод остаточной стоимости (применение доходного метода затруднительно, поскольку прямого способа измерения дохода от внутренних подсистем предприятия не существует).

Могут быть также применены методы, аналогичные применявшимся на предприятиях в период создания систем полного внутрихозяйственного расчета. Если обозначить через c_α, c_β, c_γ и c_δ удельные затраты на функционирование условной единицы систем соответственно средового, процессного, проектного и объектного типов, то общие затраты C на функционирование структуры внутрифирменных подсистем будут иметь вид $C = c_\alpha X_\alpha + c_\beta X_\beta + c_\gamma X_\gamma + c_\delta X_\delta$. Объем используемых на предприятии универсальных факторов производства не является постоянным и может изменяться как за счет реализации внутрифирменных мероприятий, так и за счет привлечения факторов производства со стороны. В частности, силами предприятия могут организовываться новые подразделения, пополняющие структуру и объем объектного фактора; инициироваться новые проекты, увеличивающие объем проектного фактора; реализовываться новые процессы, расширяющие возможности процессного фактора; развиваться новые компоненты внутрифирменной среды.

В общем случае мы имеем дело с четырехсекторным рынком системных факторов. Трансакции на этом рынке осуществляются в виде операций слияния, поглощения и разделения хозяйствующих субъектов (предприятий). Благодаря подобным операциям предприятие может приобретать

и инкорпорировать существующие вне предприятия объектные, средовые, процессные и проектные системы. Кроме того, предприятие может покупать и продавать компоненты, необходимые для функционирования этих подсистем. В итоге возникает баланс взаимоотношений предприятия с окружающим пространственно-временным континуумом в сфере обмена универсальными факторами: объем каждого из факторов за определенный период складывается из имеющегося запаса с учетом приобретения внешних факторов и продажи факторов на внешнем рынке.

Управление универсальными факторами производства отличается от управления традиционными факторами — трудом, капиталом, природными ресурсами, предпринимательскими возможностями — в связи с необходимостью сохранения и развития системных свойств каждого из универсальных факторов. Это объясняется тем, что в состав каждого из универсальных факторов входят в той или иной мере все компоненты традиционной системы факторов. В целом опора на использование универсальной системы факторов для управления ведет к переходу на более высокий уровень системности функционирования предприятия.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Несмотря на то что универсальная система факторов строилась для процесса производства как основного процесса экономики, полученные результаты могут быть применены и для моделирования процессов обмена, распределения и потребления. В целом указанная система факторов производства может играть роль системы факторов любой экономической деятельности — формально более широкой сферы, чем производство, поскольку она включает также процессы распределения, обмена и потребления.

Разработка универсальной системы факторов производства, релевантной для производственных систем различного масштаба, структуры и назначения, находится в русле развития относительно нового направления в экономической теории, которое может быть названо «фундаментальная экономика». Усложнение и дифференциация организационно-экономических, технологических и информационно-коммуникационных условий функционирования современной экономики требует не только более детальной классификации характеристик работы каждого индивидуального хозяйствующего субъекта, холдинга, экосистемы, а также производимой ими продукции, но и существенно более высокого уровня обобщения и углубления экономических понятий, закономерностей, взаимосвязей. В последние десятилетия внимание к этой основополагающей части экономической теории ослабело, а центр тяжести исследований переместился в сторону поверхностных эмпирических модельных расчетов без попыток проникновения в фундаментальные свойства экономической материи, энергии, пространства и времени. Представляется желательным, чтобы развитие экономической науки без потери ее целостности шло бы как в направлении феноменологической поведенческой экономики, так и в направлении развития фундаментальной экономической теории. Есть основания надеяться, что развитие системной экономики сможет стать связующим звеном между фундаментом и верхними этажами многоуровневого высотного здания экономики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

Клейнер Г.Б. (1986). Производственные функции: теория, методы, применение. М.: Финансы и статистика. [**Kleiner G.B.** (1986). *The Production functions: Theory, methods and application.* Moscow: Finansy i Statistika (in Russian).]

Клейнер Г.Б. (2011). Новая теория экономических систем и ее приложения // *Вестник Российской академии наук*. Т. 81. № 9. С. 794–808. [**Kleiner G.B.** (2011). New theory of economic systems and its applications. *Herald of the Russian Academy of Sciences*, 81, 9, 794–808 (in Russian).]

Клейнер Г.Б. (2019). Принципы двойственности в свете системной экономической теории // *Вопросы экономики*. № 11. С. 127–149. DOI: 10.32609/0042-8736-2019-11-127-149 [**Kleiner G.B.** (2019). The principles of duality in the light of the system economic theory. *Voprosy Ekonomiki*, 11, 127–149. DOI: 10.32609/0042-8736-2019-11-127-149 (in Russian).]

Клейнер Г.Б. (2020). Интеллектуальная экономика цифрового века // *Экономика и математические методы*. Т. 56. № 1. С. 18–33. DOI: 10.31857/S042473880008562-7 [**Kleiner G.B.** (2020). Intellectual economy of the digital age. *Economics and Mathematical Methods*, 56, 1, 18–33. DOI: 10.31857/S042473880008562-7 (in Russian).]

Клейнер Г.Б. (2021). Интеллектуальная теория фирмы // *Вопросы экономики*. № 1. С. 73–97. DOI: 10.32609/0042-8736-2021-1-73-97 [**Kleiner G.B.** (2021). Intelligence-based theory of the firm. *Voprosy Ekonomiki,* 1, 73–97. DOI: 10.32609/0042-8736-2021-1-73-97 (in Russian).]

Клейнер Г.Б., Рыбачук М.А. (2017). Системная сбалансированность экономики. М.: ИД «Научная библиотека». 320 с. [**Kleiner G.B., Rybachuk M.A.** (2017). *System balance of the economy.* Moscow: Nauchnaya biblioteka (in Russian).]

Румянцева С.Ю. (2012). Проблема движения экономической материи и механизм экономического цикла // *Проблемы современной экономики*. № 1 (41). С. 29–34 [(in Russian).] [**Rumyantseva S. Yu.** (2012). Problems of economic substance movement and mechanism of economic cycle. *Problems of Modern Economics*, 1, 41, 29–34 (in Russian).]

Brynjolfsson E., Hitt L. (1995). Information technology as a factor of production: The role of differences among firms. *Economics of Innovation and New Technology*, 3 (4) (Special Issue on Information Technology and Productivity Paradox), 183–200.

Cato M.S., North P. (2015). Rethinking the factors of production for a world of common ownership and sustainability: Europe and Latin America compared. *Review of Radical Political Economics*, 48, 1. DOI: 10.1177/0486613415586981

Chang Y., Yang S.Q. (2011). Literature review on endowments of factor of production. *Advanced Materials Research,* 347–353. W. Pan, J. Ren, Y. Li (Eds.), 2884–2888. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.347-353.2884

Gentile B. (2011). The new factors of production and the rise of data-driven applications. *Forbes*. October 31. Available at: https://www.forbes.com/sites/ciocentral/2011/10/31/the-new-factors-of-production-and-the-rise-of-data-driven-applications/?sh=4a36c7dc17da

Papava V. (2017). On production factors. *Bulletin of the Georgian National Academy of Sciences*, 11, 4, 145–149.

Uzawa H. (1962). Production functions with constant elasticities of substitution. *The Review of Economic Studies*, 29 (October), 91–99.

Xu X. (2021). Research prospect: Data factor of production. *Journal of Internet and Digital Economics*, 1, 1, 64–71. DOI: 10.1108/JIDE-09-2021-005

Xu B., Chaudhry S., Li Ya. (2009). Factors of production: Historical theories and new developments. *Systems Research and Behavioral Science*, 26, 2 (Special Issue: Systems Science and Enterprise Integration, Technological Economics and the Theory of Material Flow), 219–224.

Złoty M. (2019). Factors influencing the innovativeness of the global economy in the 21th century. In: *Annales Universitatis Mariae Curie-Skłodowska. Sectio H Oeconomia*. DOI: 10.17951/h.2018.52.4.143-151

Universal system of the production factors

© 2022 G.B. Kleiner

G.B. Kleiner,
Central Economics and Mathematics Institute, Russian Academy of Sciences, Financial University under the Government of the Russian Federation, State University of Management, Moscow, Russia; e-mail: george.kleiner@inbox.ru

Received 12.01.2022

This study was supported by the Russian Foundation for Basic Research (project 20-010-00835).

Abstract. In this article, based on the new theory of economic systems, we propose a universal concept of the factors of economic activity, suitable for modeling economic systems of various scales, nature, and purpose. The concept described in the article indicates the objective genesis of a unified system of aggregated factors of production, particular cases of which are the classical theory of factors of production, marginal theory of factors, and intellectual theory of factors. The first case is characteristic of the industrial economy; the second is characteristic of the industrial and post-industrial economy; the third is characteristic of the knowledge economy and the intellectual economy. At the same time, we refine the concept of a factor of production and a system of factors, representing a set of independent processes that are generally necessary and sufficient for the implementation of production and have a similar aggregation level to a description of the results of economic activity. When developing a universal system of factors of production, we also modernize the concept of an economic phenomenon and the economic space-time that serves as a container for these phenomena. Thus, economic space-time is like the physical space-time, at each point of which the reserves of substance (in the economic space — goods) and energy (in the economic space — the ability to use space-time resources effectively) are concentrated. The possibilities of conjugation of the action of internal and external universal factors on the enterprise functioning are explored. An example of constructing a parametric production function based on a system of universal factors of production is given.

Keywords: theory of production factors, system paradigm, neoclassical system of production factors, intelligence system of production factors, universal system of production factors, economic phenomena, production function.

JEL Classification: C00, D20, D24.

For reference: **Kleiner G.B.** (2022). Universal system of the production factors. *Economics and Mathematical Methods*, 58, 2, 22–31. DOI: 10.31857/S042473880020011-1

ЭКОНОМИКА И МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ, 2022, том 58, № 2, с. 32–42

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ

Развитие экономического моделирования. Эконометрический аспект

© 2022 г. Д.В. Скрыпник

Д.В. Скрыпник,
ЦЭМИ РАН, Москва; email: skrypnikdv@gmail.com

Поступила в редакцию 18.02.2022

Автор выражает признательность анонимному рецензенту, чьи замечания позволили улучшить работу.

Аннотация. Рассмотрен опыт развития прикладного, преимущественно макроэкономического, моделирования. Проведено сопоставление так называемого неструктурного подхода — не являющегося строго обоснованным экономической теорией — со структурным подходом, где такое обоснование является основой. Показано, что достижения структурного и неструктурного моделирований во многом способствовали размыванию четкой грани между этими двумя направлениями. Анализ мирового опыта также позволяет сделать вывод, что бурное развитие неструктурного моделирования привело к появлению эффективных методов моделирования, демонстрирующих хорошие прогностические свойства, зачастую превосходящие качество структурных моделей. Кроме того, показано, что возникающие на определенном этапе развития неструктурного подхода трудности зачастую устранялись в рамках этого же подхода, но с появлением новых методов. Обосновано наличие тесной связи между структурным и неструктурным подходами; также обоснована необходимость гибридного подхода к моделированию реальных экономических систем и процессов, т.е. подхода, в рамках которого некоторые поведенческие механизмы и соответствующие им структурные параметры явно вводятся в модель, в то время как остальные элементы идентифицируются на основе методов неструктурного подхода.

Ключевые слова: структурные модели, неструктурные модели, критика Лукаса, кривая Филипса.

Классификация JEL: C0, C18, B40.

Для цитирования: **Скрыпник Д.В.** (2022). Развитие экономического моделирования. Эконометрический аспект // *Экономика и математические методы.* Т. 58. № 2. С. 32–42. DOI: 10.31857/S042473880020013-3

1. ВВЕДЕНИЕ

Прикладное макроэкономическое моделирование принято разделять на структурный и неструктурный подходы. В первом случае основу моделирования составляют теоретические представления об экономической системе, как правило, микроэкономические, во втором — внимание в большей мере уделяется анализу реальных данных и решению проблемы идентификации параметров. Принято считать, что параметры, не являющиеся обоснованными экономической теорией (ad hoc), могут уловить только отдельно взятый режим, в котором находится экономическая система под действием мер политики либо внешних сил. Вместе с тем, как демонстрируют многие наблюдения, в рамках микроэкономического обоснования пока не удается предъявить модели, параметры которых оказывались бы всегда более стабильными во времени и более устойчивыми к смене режимов политики по сравнению с параметрами неструктурных моделей. Кроме того, структурные модели зачастую обладают низким прогнозным качеством. При этом структурное моделирование требует более жестких предположений, справедливость которых требует специальной проверки, в особенности в отношении стран, обладающих рядом особенностей, — таких как Россия.

Достижения структурного и неструктурного моделирований во многом способствовали размыванию четкой грани между этими двумя направлениями, и многие результаты и наблюдения, полученные в рамках одного направления, находили подтверждение и объяснение в другом, а неструктурные модели стали содержать элементы структурных моделей, и наоборот. В настоящее время предпринимаются попытки интегрировать эти два направления в рамках гибридного подхода, где недостатки одного направления компенсируются преимуществами другого. Можно выделить подход, в котором некоторые поведенческие механизмы и соответствующие им структурные параметры явно вводятся в модель, в то время как остальные элементы структуры модели соответствуют

зависимостям, возникающим на макроэкономическом уровне, идентификация которых, наряду с идентификацией параметров поведенческих механизмов, осуществляется на основе методов неструктурного подхода.

Целью настоящей работы является обзор опыта прикладного макроэкономического моделирования и рассмотрение некоторых положений критики Лукаса с позиции современных представлений о предмете и достижениях неструктурного подхода.

2. ИСТОРИЯ МАКРОЭКОНОМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Макроэкономическое моделирование с разной степенью интенсивности развивается уже около 80 лет. Ряд исследователей предлагают считать началом этого научного направления работу голландского экономиста Я. Тинбергена (Tinbergen, 1937), в которой были предприняты попытки построения и оценивания малой макроэкономической модели. Именно здесь автор формализовал теоретические изыскания экономической науки того времени в виде системы динамических уравнений и, по всей видимости, впервые использовал аппарат математической статистики для оценивания параметров уравнений. Последнее обстоятельство служило цели сделать привязку стилизованной модели к реальной экономической системе[1].

Конец 1930-х годов — время зарождения, развития и последующего господства кейнсианских идей в экономической теории и экономической политике. Общая теория Кейнса была далека от формализованных построений, однако давала ответы на многие вопросы и вызовы того времени, закладывая фундамент первого поколения макроэкономических моделей. Именно на 1940–1950-е годы приходится первый эпизод бурного развития так называемого структурного макромоделирования. В работу, связанную с созданием моделей (стохастических дифференциальных уравнений), были вовлечены сильнейшие представители экономической науки, математики, статистики. При Чикагском университете создана специальная исследовательская организация (Cowles Commission for Research in Economics), в которую вошли ученые с мировым именем К. Эрроу (K. Arrow), Дж. Дебре (G. Debreu), Т. Хаавелмо (T. Haavelmo), Л. Гурвиц (L. Hurwicz), Л. Клейн (L.R. Klein), А. Вальд (A. Wald) и др., было образовано «Эконометрическое общество» и учрежден журнал. На многие годы вперед формировалась исследовательская парадигма макроэкономики. На этот период приходится ряд важнейших результатов, дошедших и до наших дней. Мощнейший импульс получила эконометрика, обязанная многими современными методами именно усилиям ученых и исследователей того времени. Свет увидели работы Л. Клейна, в будущем нобелевского лауреата по экономике, завершившие формирование подхода к моделированию на основе систем одновременных уравнений. Были обнаружены проблемы идентификации параметров больших систем и предложены решения. Получены условия идентифицируемости структурной формы на основе приведенной; разработаны методы оценки структурных параметров, широко применяющиеся и в наши дни (двухшаговый, трехшаговый МНК, FIML-оценивание).

В первые годы успех макроэкономики был выдающимся. В академическом сообществе царило единодушие относительно научной парадигмы, а обсуждения и споры велись относительно таких деталей, как конкретный наклон кривых IS или LM. Фундамент пошатнулся в конце 1960-х годов. К тому моменту неудовлетворенность отсутствием обоснования используемых при моделировании конкретных форм уравнений достигла своего предела — как известно, все положения кейнсианства просто постулировались. Критика велась по двум основным направлениям. Первое связано с отсутствием понимания причин неравновесной динамики — было ясно, что рыночное равновесие если и существует, то не достигается системой мгновенно. Объяснения же этому предъявлено не было. В результате почти все усилия экономической мысли были сосредоточены на отыскании микроэкономического оснований ценовой жесткости и негибкости заработных плат. Второй фронт критики связан с моделированием механизма ожиданий. Дж.Ф. Мут (Muth, 1961, p. 315–335), в работах которого впервые появилась идея рациональности ожиданий, показал, что адаптивно устроенные ожидания могут быть рациональными лишь в исключительно редких обстоятельствах. Было предложено несколько способов введения рациональности ожиданий в прикладные макроэкономические модели.

[1] Ряд исследователей полагают, что основательно математическая статистика вошла в экономическую науку с появлением работы (Haavelmo, 1944).

Однако дело не только и не столько в интеллектуальной неудовлетворенности экономистов. Существовавшие модели начали демонстрировать плохое прогнозное качество и, что более существенно, оказались несостоятельными при объяснении фактической реакции экономики на различные шоки, в частности на значительное изменение цен на нефть. Серьезное влияние оказал период массовой безработицы и одновременно высокой инфляции, подорвавший уверенность в том, что между двумя этими показателями существует стабильная линейная связь.

Наибольшую силу критика господствующей парадигмы набрала в серии работ известного экономиста Р. Лукаса — также впоследствии лауреата Нобелевской премии. Критика Лукаса указывала на то, что существующие подходы не вскрывают экономических законов, а являются, что называется, *ad hoc*,— параметры в постулируемых зависимостях не отражают фундаментальных, структурных характеристик экономики, поэтому уравнения способны описать лишь отдельные режимы функционирования системы. При смене же политики, предпочтений агентов либо технологий параметры моделей также будут меняться. Действительно, накопившиеся к тому времени свидетельства как раз подтверждали, что оцененные прежде параметры уравнений (кейнсианской функции потребления, кривой Филипса) меняются на новых временных интервалах. Объяснение же, предложенное Лукасом, выглядело правдоподобным и поэтому было принято почти безо всякого сопротивления, положив начало новому этапу (второй волне) развития макроэкономического моделирования, во многом определив его будущий ход.

В работе (Lucas, 1976) содержалась не только критика, но и предложены основы нового подхода, в соответствии с которыми модель должна основываться на фундаментальных параметрах экономической системы. Это означало, что главной целью моделирования должно стать отыскание таких параметров[2]. Фундаментальность здесь понимается как стабильность параметров во времени, в том числе и при изменении режимов политики. Естественным развитием предложенного подхода стало моделирование поведения отдельных экономических агентов, потребителей и фирм. Представлялось, что структурными, фундаментальными параметрами экономики являются параметры, описывающие или, точнее, определяющие поведение отдельного агента. Само же поведение полагалось оптимальным. Подобные модели стали называться микроэкономически обоснованными, а способ описания поведения агентов — микроэкономическими основаниями. Уравнения теперь начали выводиться из решения оптимизационных задач (межвременной оптимизации). Классической работой, окончательно оформившей этот подход, является работа (Kydland, Prescot, 1982). В ней показано, что неоклассические модели, где представлен единственный шок, технологически объясняют большую долю вариации выпуска в США.

Более радикальная критика господствующей парадигмы, связанная с К. Симсом, привела к возникновению альтернативной ветви макроэкономического моделирования — неструктурного подхода. Симс (Sims, 1980) отвергал технику моделирования, когда априори, до того как исследователь обращается к анализу конкретной экономической системы, предполагается тот или иной характер связей в экономике (на основе положений теории). Это, по его мнению, накладывает избыточные ограничения, справедливость которых зачастую не подтверждается. Предложенный Симсом подход в каком-то смысле представлял противоположный, крайний, взгляд на моделирование, и, возможно, именно поэтому его развитие спустя время осветило предметную область под иным углом, что позволило дать альтернативное объяснение несостоятельности моделей первого поколения.

3. НЕСТРУКТУРНЫЕ МАКРОЭКОНОМИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ

В отличие от структурных методов, развитие которых следовало за экономической мыслью, появлением одних теорий и сменой их на новые, неструктурные методы развивались почти монотонно. В начале прошлого века было замечено, что простое линейное дифференциальное уравнение достаточно неплохо воспроизводит динамику реальных экономических рядов. Сейчас конечно-разностный аналог такого уравнения принято называть авторегрессионной моделью временного ряда. Серьезный импульс развития неструктурные методы получили в 1970-е годы благодаря очевидному к тому времени провалу кейнсианских структурных моделей.

[2] Собственно, критика Лукаса по сути была формой предложения нового подхода. И здесь, по всей видимости, нельзя не учитывать взглядов Лукаса — представителя Чикагской экономической школы,— а они были во многом противоположными идеям Кейнса.

Одной из определяющих здесь стала работа (Box, Jenkins, 1970), в которой впервые вводится понятие стохастического тренда. Было замечено, что многие экономические ряды невозможно описать ни линейным, ни квадратичным, ни каким-либо иным детерминированным трендом. Для моделирования подобных временных рядов была предложена теоретическая конструкция, в соответствии с которой воздействие всякого прошлого возмущения со временем не затухает, а продолжает вносить вклад в будущую динамику, и любая область пространства, таким образом, становится достижимой на бесконечности с единичной вероятностью. В частности, из этого следует отсутствие сходимости к какому-либо детерминированному тренду. Процессы, удовлетворяющие описанной схеме, называются рядами с единичным корнем.

Несмотря на впечатляющие успехи неструктурного моделирования, его главным недостатком продолжала оставаться одномерность, в то время как основной интерес состоял как раз в выявлении механизмов влияния переменных друг на друга. Закономерно, что следующим шагом стало появление векторных моделей авторегрессии. Основной вклад здесь, как уже отмечалось, принадлежит К. Симсу. Предложенный им в (Sargent, Sims, 1977) подход не опирался на положения экономической теории. В нем даже не существовало априорного деления переменных на эндогенные и экзогенные. Напротив, если какие-либо переменные были связаны между собой, то подход выявлял прямое и обратное влияние одной переменной на другую, не добавляя, впрочем, знаний о характере связей между ними. Это также позволяло обойти проблему эндогенности, характерную для систем одновременных уравнений и требующую применения специальной эконометрической техники.

Многомерные неструктурные модели стали основой для новых открытий. Вскоре в (Engle, Granger, 1987) было предложено основополагающее для современного прикладного макроэкономического моделирования понятие коинтеграции, или совместного стохастического тренда. Удивительным образом понятие, имеющее отношение исключительно к статистическим свойствам многомерных процессов (и определяемое чисто технически), оказалось тесно связано с моделями коррекции ошибками — направлением моделирования, независимо развиваемым Лондонской научной школой (Sargan, 1964).

В основе моделей коррекции ошибками лежит предположение, что направление и интенсивность изменения показателей определяются отклонением текущего состояния системы от равновесного. Модели, таким образом, наряду с равновесной допускают и неравновесную динамику. Равновесная же структура при этом постулировалась. С появлением понятия коинтеграции все характеристики системы стали извлекаться из реальных данных. Временные ряды представлялись в виде векторного стохастического процесса, и на основе собственных векторов и собственных значений оцененной матрицы перехода восстанавливалась равновесная структура и определялись динамические свойства системы. В результате получалась структурная модель в виде системы одновременных уравнений, не требующая априорного включения теоретических положений. Напротив, анализ следовал в определенном смысле в обратном направлении — идентифицировалась приведенная форма (возможная интерпретация модели векторной авторегрессии) и уже на ее основе строилась структурная.

Как показал опыт моделирования, параметры подобных моделей оказались стабильными (в том числе к изменению режимов политики), а сами модели способными объяснять реальные экономические процессы.

4. КРИТИКА ЛУКАСА

Микрообоснованные оптимизационные модели начали развиваться вслед за критикой Лукаса и являются ответом на нее. В знаменитой работе Р. Лукаса заложены основы направления, в соответствии с которым задача моделирования должна состоять в отыскании глубинных, структурных параметров экономической системы, остающихся стабильными достаточно долгое время. Неструктурные же параметры, не являющиеся параметрами микрообоснованных моделей, оставаться стабильными и не должны в силу, например, рациональности агентов.

Пусть экономика описывается структурной моделью общего вида $y_{t+1} = F(y_t, x_t, \theta, \varepsilon_t)$, где x_t — набор экзогенных переменных, среди которых — инструменты политики; y_t — набор эндогенных переменных модели; θ — параметры модели, а ε_t — случайные шоки. Правильная модель, по мнению Лукаса,— когда и F, и θ остаются инвариантными при изменении структурных характеристик

процесса x_t. Для моделей же первого поколения это свойство не выполнялось и параметры регулярно менялись. Лукас полагал, что в действительности политику государства можно представить в виде $x_t = G(y_t, \lambda, \eta_t)$, где λ — структурные параметры экономики, которыми определяется экономическая политика, а η_t — случайные возмущения. Задача моделирования состоит в отыскании связи между параметрами θ и структурными параметрами λ, поскольку при изменении последних меняется не только политика x_t, но и режим функционирования экономики. Решение этой задачи позволяет переписать модель в стабильной форме $y_{t+1} = F(y_t, x_t, \theta(\lambda), \varepsilon_t)$, устойчивой к смене политики. И только после этого модель следует оценивать эконометрически.

С момента появления критики было разработано множество теоретических (стилизованных) моделей, в какой-то мере отвечающих предложенному подходу. Вместе с тем, моделирование реальных экономических систем на их основе вызвало определенные затруднения. Выяснилось, что модели, не учитывающие критику, остаются стабильными в те периоды, когда их стабильность, согласно Лукасу, должна нарушаться (в периоды серьезных сдвигов режимов политики).

Дело здесь состоит в том, что изменения в экономической политике в действительности могут не обладать достаточной силой воздействия, которая бы приводила к значимым изменениям структурных связей в экономике. Иными словами, связь между θ и λ — очень слабая на конкретном интервале времени. Более того, связь в этот период может совсем отсутствовать. Так, например, если инфляционные ожидания остаются в силу различных причин адаптивными, то инфляция при смене режима монетарной политики может оставаться прежней дольше, чем это бы происходило, будь агенты полностью рациональны. Критику Лукаса, таким образом, следует рассматривать не как бесспорный теоретический результат, а как эмпирическую гипотезу, подлежащую проверке при выборе той или иной спецификации модели для решения прикладных задач.

В работе (Estrella, Fuhrer, 1999) рассматриваются два оппозитных типа моделей и тестируется их стабильность. Первая группа моделей представляет так называемую назадсмотрящую спецификацию для агрегированного спроса и аналогичную спецификацию для кривой Филипса. Вторая группа — также уравнения агрегированного спроса и кривой Филипса, но теперь полученные на основе оптимизационных задач и впередсмотрящих, рациональных ожиданий. Каждая группа моделей включает функцию реакции монетарной политики.

Рассматривая временной интервал со структурным сдвигом в монетарной политике (идентифицированный в том числе эконометрическими тестами), авторы выяснили, что назадсмотрящие модели не только намного лучше оптимизационных описывают историческую динамику показателей (общее свойство подобных спецификаций), но и превосходят качество объяснения динамики показателей на интервале после структурного сдвига. Впередсмотрящие оптимизационные модели, наоборот, резко ухудшали статистическое качество на интервале после сдвига. При этом параметры моделей первого типа продолжали оставаться стабильными, в то время как параметры моделей второй группы свойство стабильности теряли.

К интересному выводу приводит анализ критики Лукаса в статье (Marcellino, Salmon, 2001). Авторы замечают, что Лукас исключает из обсуждения возможные причины, заставляющие правительство резко менять режим политики. Иными словами, неявным образом предполагается бóльшая нерациональность правительства по сравнению с другими экономическими агентами, например потребителями. Если же рассматривать правительство и остальных агентов с точки зрения динамического взаимодействия, то критика начинает терять силу.

Как известно, устойчивая связь между инфляцией и безработицей, начиная с определенного момента, стала регулярно нарушаться. Считалось, что объяснить это явление можно, только если ввести в модель рациональные ожидания. Явное моделирование рациональности привело к появлению вертикальной кривой Филипса. К. Симс (Sims, 1981) на основе статистических методов (индексных моделей) и теории линейных систем построил модель, намеренно полностью лишенную каких-либо теоретических оснований, воспроизводившую свойство вертикальной кривой Филипса.

Несмотря на то что новые модели содержали положения, отсутствие которых в моделях первого поколения считалось причиной их несостоятельности, модели, учитывающие критику Лукаса, на практике оказались гораздо слабее (при объяснении реальных процессов) моделей первого поколения. Иными словами, ответив в рамках новой парадигмы на один вопрос, исследователи встали на почву, где неопределенность теоретических оснований оказалась еще выше.

5. СОВРЕМЕННЫЙ ВЗГЛЯД НА ПРОБЛЕМУ

Объект моделирования — экономическая система — представляет собой непрерывно качественно меняющуюся среду (появляются новые товары, технологии, меняются поведенческие модели агентов). Вряд ли существуют такие характеристики системы, которые бы оставались стабильными на длительном временном интервале. В свете приведенных обсуждений возникает вопрос, если говорить нестрого, насколько нефундаментальными были параметры моделей, в отношении которых критика Лукаса считается справедливой.

5.1. MPC или APC?

Одним из центральных вопросов макроэкономики является вид и форма функции потребления (агрегированного). Кейнсианская функции потребления является первой успешной попыткой описания агрегированного поведения потребителя. В 1950-е годы было, однако, замечено, что предельная склонность к потреблению (marginal propensity to consume, MPC) — коэффициент при доходе в функции потребления, который для целей прикладного анализа рассчитывался как коэффициент регрессии потребления на доход,— стабильно оказывается меньшим, чем показатель средней склонности к потреблению (average propensity to consume, APC). Последний рассчитывался как отношение накопленного потребления к накопленному доходу. Более того, выяснилось, что MPC серьезно меняется на различных интервалах времени в отличие от APC. Соответственно, модели, основанные на кейнсианской функции потребления, перестали быть состоятельными. В 1957 г. Фридман показал, что домохозяйства, принимая решения о потреблении, ориентируются на перманентный, а не на текущий располагаемый доход, как считалось ранее. Используемый при вычислении средней склонности к потреблению накопленный доход является оценкой перманентного дохода и поэтому показатель APC достаточно близок к оценке фундаментального структурного параметра экономики, определяющего процесс потребления. Коэффициент MPC, таким образом, оказывается лишенным смысла, как и попытки его оценивания. Модели же, основанные на кейнсианской функции потребления, оказались под прицелом критики Лукаса за нефундаментальность параметра MPC, нестабильность которого объяснялась рациональностью потребителя, предвидящего изменения своего будущего дохода.

Дж. Сток (Stock, 1988), располагая современным эконометрическим инструментарием, нашел иное объяснение. Как потребление, так и располагаемый доход (а значит, и перманентный) являются нестационарными временными рядами, имеющими, вместе с тем, общий стохастический тренд (являются коинтегрированными). А значит, и MPC, и APC являются состоятельными оценками одного и того же коэффициента коинтеграционного соотношения, задающего структурное (устойчивое в долгосрочном периоде) соотношение между доходом (перманентным) и потреблением. Различие же между показателями, которое расценивалось исследователями того времени как несостоятельность кейнсианской структурной модели, оказалось обычным смещением оценок коэффициентов регрессии, возникающим при слишком малом объеме выборки (small sample bias). При этом даже такое свойство оценок коинтегрирующей комбинации, как суперсостоятельность, не успевало реализоваться на рассматриваемых интервалах. Оценка же APC в силу способа вычисления оказывалась смещенной в меньшей степени. Запись модели в форме коррекции ошибками, разделяющей краткосрочные и долгосрочные эффекты, позволила получить несмещенную оценку коинтегрирующего коэффициента — структурного параметра экономики, определяющего потребление, не прибегая к микроэкономическому обоснованию и не вводя рациональные ожидания. Объяснение несостоятельности кейнсианской функции потребления было получено вне Критики.

В середине 1980-х годов в ряде европейских стран произошли масштабные реформы, направленные на снижение избыточного регулирования финансового сектора, что, в частности, привело к значительному росту потребления в этих странах. Применявшиеся тогда для анализа политики макроэкономические модели не смогли ни предсказать, ни объяснить этот эпизод *ex post*. Это было расценено как подтверждение критики и свидетельство в пользу альтернативного класса моделей, основанных на рациональных ожиданиях и оптимизирующих агентах. Предполагалось, что произошли изменения в неописанной прежними моделями части экономики — изменились ожидания агентов.

5.2. Спецификация

В работе (Eitrheim, Jansen, Nymoen, 2000) подробно анализируется этот эпизод. Авторы формализуют два противоположных подхода в виде моделей. В соответствии с первым строится модель, где функция потребления задается коинтеграционной связью между потреблением и доходом. В соответствии со вторым функция потребления в модели основывается на межвременном уравнении Эйлера. Крайняя форма этого подхода предполагает, что любая прошлая информация относительно соотношения между потреблением и доходом не имеет значения для текущего и будущего потребления. Иными словами, потребление описывается моделью случайного блуждания, а приращения потребления являются ортогональными к своим прошлым значениям. Если описанный структурный сдвиг, связанный с финансовым регулированием, меняет коэффициенты коинтеграционной связи (так как это неструктурный параметр экономики), то прогноз на основе моделей первого типа должен быть заметно более смещенным (с прежними коэффициентами) относительно фактических данных, чем прогноз на основе моделей второго типа, поскольку построение последнего — более устойчиво к такого рода изменениям. Действительно, в работе этому находится эмпирическое подтверждение. Вместе с тем было замечено, что на более позднем интервале времени модели первого типа начинали демонстрировать лучшее качество прогноза по сравнению с оптимизационными моделями. Возможное объяснение этому выглядело странным: несмотря на структурный сдвиг, прежнее коинтеграционное соотношение постепенно восстанавливается.

Выяснилось, что если в коинтерационное соотношение (для потребления) ввести всего одну дополнительную переменную, то оценки коэффициентов коинтеграционного соотношения для интервала до структурного сдвига и после него оказываются идентичными. Иными словами, структурный сдвиг вызвал изменение этой новой *переменной*, оставив *коэффициенты* модели неизменными (стабильными). Несостоятельность прежних моделей, таким образом, крылась в неверной (неполной) спецификации. При этом новая спецификация не только улучшала прогнозные свойства модели, но и, что важнее, выявляла реальную структуру экономики, не накладывая априори ограничений, пусть даже и как-то обоснованных экономической теорией. Эконометрический поиск (основная составляющая немикрообоснованных моделей) зависимостей, таким образом, снизил в данном случае вероятность ошибочной спецификации и имплементации ей соответствующей экономической политики (разумеется, неверной в этом случае).

5.3. Кривая Филипса

Одним из классических примеров того, как далеко может завести экономическая политика, при разработке мер которой имелось неверное представление о характере связей в экономике, является история эволюции кривой Филипса. Именно здесь отчетливо прослеживается то, как форма политики менялась вслед за сменой принципов теории и стала видна важность правильной и адекватной спецификации макроэкономических моделей.

В своей знаменитой статье 1958 г., анализируя данные английской экономики, Филипс (Philips, 1958) заметил, что между безработицей и темпами роста номинальных заработных плат существует выраженная статистическая регулярность. Объясняя возникновение зависимости естественным несовершенством рынка труда, экономисты взяли ее за основу при выработке рекомендаций для мер политики (в первую очередь стимулирующей монетарной). Со временем обнаружилось, что регулярность не является устойчивой. Ряд авторов объясняли это тем, что, помимо краткосрочной кривой Филипса, существует долгосрочная, представляющая вертикальную прямую на плоскости, где по горизонтальной оси отложены уровни безработицы, а по вертикальной — темпы роста номинальных заработных плат. Определяемый этой прямой естественный уровень безработицы как раз и будет тем стационарным состоянием, сходимость к которому будет обеспечиваться в долгосрочном периоде, и поэтому длительное стимулирование экономики со стороны спроса невозможно.

Позднее к кейнсианской интерпретации кривой Филипса добавилась неоклассическая (Lucas, 1972), в соответствии с которой связь между безработицей и инфляцией имеет обратную зависимость. Цены, а значит, и заработные платы, в силу случайных причин могут оказаться выше или ниже ожидаемых значений. В ответ на это производители будут изменять объем производства, увеличивая либо сокращая занятость. Зависимость была выведена Лукасом на основе микроэкономической теории и гипотезы рациональных ожиданий. Во многом именно неудачные попытки оценить инвертированную кривую Филипса привели Лукаса к выводам, что рациональность агентов не позволяет этой связи установиться и она изменяется всякий раз вслед за попытками стимулировать экономику мерами монетарной политики.

Существует еще один взгляд. Рассмотрим следующую форму краткосрочной кривой Филипса (Eitrheim, Jansen, Nymoen, 2005):

$$\Delta w_t = \beta_{w,0} - \beta_{w,1} u_t + \beta_{w,2} \Delta a_t + \beta_{w,3} \Delta q_t + \varepsilon_{w,t},$$

где u_t — уровень безработицы; a_t — производительность труда; q_t — цены производителей. Естественная безработица находится из условия $\Delta w_t = 0$ и часто называется уровнем безработицы, не ускоряющим инфляцию (non-accelerating inflation rate of unemployment, NAIRU):

$$u_t^{NAIRU} = u_0 + \frac{\beta_{w,2} - 1}{\beta_{w,1}} \Delta a_t + \frac{\beta_{w,3} - 1}{\beta_{w,1}} \Delta q_t.$$

Долгое время существовало убеждение, что NAIRU является аттрактором, обеспечивающим сходимость рынка труда в долгосрочной перспективе. Во многом благодаря идее, согласно которой естественный уровень безработицы можно определить на основе анализа лишь одного уравнения, кривая Филипса обрела большую популярность в академических и политических дискуссиях.

Очевидно, что рассчитанный на основе кривой Филипса естественный уровень безработицы если и является стационарным состоянием для рынка труда, то динамические свойства (скорость подстройки к равновесию) системы «безработица–заработная плата» невозможно определить, ограничивая рассмотрение одним уравнением. Анализ поэтому стал со временем дополняться уравнением, описывающим динамику безработицы: $\Delta u_t = \beta_{u,0} - \beta_{u,1} u_{t-1} + \beta_{u,2} \left(w - q - a\right)_{t-1} - \beta_{u,3} z_t + \varepsilon_{u,t}$. Здесь механизмом, определяющим динамику занятости и обеспечивающим подстройку к равновесию, является доля заработных плат в стоимости конечной продукции — устойчивое соотношение между показателями (коинтегрированы). Если безработица оказывается, например, ниже естественного уровня, то заработная плата начинает расти и рано или поздно становится выше уровня, соответствующего устойчивой доли заработных плат в стоимости конечной продукции. В ответ на это, в соответствии с уравнением для безработицы, занятость начинает снижаться до естественного уровня, а вслед за ней снижается и номинальная заработная плата.

Дополнив кривую Филипса уравнением для безработицы, экономистам так и не удалось описать поведение реального рынок труда (безработицы и инфляции заработных плат). К примеру, для большинства европейских стран попытки оценивания приводили к следующему результату: если естественный уровень безработицы и является аттрактором, то время сходимости к нему должно занимать десятки лет (исходя из оценок параметров).

Нестабильность естественного уровня безработицы также подпадала под критику Лукаса, и макроэкономика стала интенсивно искать микроэкономические основания кривой Филипса — вводились впередсмотрящие ожидания, появились неоклассические, неокейнсианские версии кривой. Но насколько верной была постановка задачи поиска естественного уровня безработицы в терминах столь ограниченной спецификации модели? Если ответ на этот вопрос отрицательный, то объяснения несостоятельности подобных моделей вновь находятся вне критики Лукаса.

Рассмотрим уравнение для динамики заработных плат вида $\Delta w_t = \theta_w (w^b_{q,t-1} - w_{q,t-1}) + \psi_q \Delta q_t - \varphi u_{t-1} + \varepsilon_t$, где $w^b_{q,t-1} = m_b + \iota a_t - \varpi u_t$ — долгосрочное (равновесное) соотношение, связывающее предложение труда домохозяйств, u_t, с желаемым уровнем реальной заработной платы. При этом будет предложено соответствующее количество труда; $w_{q,t}$ — реальная заработная плата, представляющая собой отношение номинальной заработной платы, w_t, к ценам. В равновесии реальные заработные платы совпадают с желаемыми домохозяйствами. Несоответствие же между ними задает направление и интенсивность изменения номинальных заработных плат, за счет которых происходит подстройка к равновесию. Аналогичный корректирующий механизм выписывается для ценовой динамики, но теперь подстройку обеспечивает разность между реальными заработными платами и заработными платами, предлагаемыми фирмами. Важное отличие от предыдущей версии кривой Филипса состоит в том, что безработица теперь прямо включается в коинтеграционное соотношение.

Оказывается, что при достаточно общих условиях на коэффициенты системы существует условное стационарное состояние для реальной заработной платы, зависящее от уровня безработицы $w_{q,ss}(t) = a_{ss}(t) + \eta_0 u_{ss} + \delta_0$, или $ws_{ss} = \eta_0 u_{ss} + \delta_0$, где $ws_{ss} = w_{q,ss}(t) - a_{ss}(t)$ — доля заработных плат в стоимости продукции. Иными словами, значений безработицы, при которых не происходит ускорения инфляции, может быть множество (для каждого уровня безработицы существует свое стационарное состояние заработных плат). При этом доля стоимости труда также обусловлена уровнем занятости. Безработица же определяется вне системы «безработица–заработная плата» и зависит от

ряда факторов. Это означает, что поиск естественного уровня безработицы на основе прежней версии кривой Филипса (системы) не имел смысла. Действительно, при такой (и только такой) спецификации модель остается стабильной на интервале, включающем как смену режимов политики, так и значимые структурные сдвиги, и объясняет фактическую динамику заработных плат и безработицы в 1960–2000 гг., чего не удавалось сделать в рамках прежней спецификации.

Из этого следует любопытное эконометрическое объяснение нестабильности инвертированной кривой Филипса, которую пытался оценить Лукас (Лукас, 1972). Рассмотрим известное соотношение $\beta\beta^* = r_{xy}$, где r_{xy} — коэффициент корреляции между x и y, β — коэффициент в регрессии y на x, а β^* — коэффициент в инвертированной регрессии. Структурный сдвиг можно определить как изменение характера связи между переменными x и y, а значит, изменение коэффициента корреляции составляет r_{xy}. Если в силу, например, суперэкзогенности x по отношению к параметру β коэффициент β оказывается стабильным при смене политики, то коэффициент β^* не может также одновременно оставаться неизменным на этом интервале. Это означает, что обнаруженная Лукасом нестабильность инвертированной кривой Филипса уже не может однозначно интерпретироваться как отсутствие связи между безработицей и инфляцией.

Таким образом, модели, не учитывающие критику Лукаса, верно специфицированные и включающие недостающие элементы, оказываются стабильными, демонстрируют лучшее качество прогнозов и становятся состоятельными при описании тех экономических процессов, которые, как считалось, можно объяснить только на основе моделей, учитывающих критику. Это указывает на неполноту теоретических оснований моделей нового поколения.

5.4. Макро- и микроуровень

Один из главных изъянов таких моделей особенно отчетливо проявился в период недавних финансово-экономических кризисов, в особенности кризиса 2008–2009 гг. Как известно, сильным допущением современных макроэкономических моделей является предположение о полном соответствии микро- и макроэкономического уровней. Благодаря этому становится возможным в качестве теоретического основания моделирования использовать понятие репрезентативного агента, оптимизирующего свое межвременное поведение в отношении потребления одного товара (также используется допущение об изоморфности микро- и макроуровней). Прибегая к этому, однако, мы редуцируем неоднородную экономическую структуру до единственного потребителя, исключая тем самым из рассмотрения все многообразие связей, посредством которых в экономике осуществляется взаимодействие разнородных агентов. В частности, подход не предполагает описания структуры финансового рынка, где характер и многообразие связей между кредиторами и заемщиками (в особенности через производные финансовые инструменты) играет ключевую роль.

Считается, что чем шире возможности для диверсификации портфелей и перераспределения индивидуального риска, тем лучше функционирует экономическая система — положение, стоящее в основе бурного развития института секьюритизации в последнее время. В работе (Battiston et al., 2009) было показано, что возникающие в процессе секьюритизации каналы перераспределения риска действительно способствуют снижению уровня индивидуального риска в экономике, но одновременно повышают уровень системного риска, поскольку по тем же самым каналам происходит стремительное распространение и мультипликация кризисных потрясений в случае их возникновения. Иными словами, связь между сложностью (развитостью) финансового рынка и уровнем системного риска в экономике не является монотонно убывающей. Именно в особенностях нынешней финансовой архитектуры и механизмов взаимодействия между гетерогенными агентами кроются причины недавнего кризиса. Подход же на основе репрезентативного потребителя исключает подобные эффекты из рассмотрения и оказывается, таким образом, здесь полностью бессильным.

В действительности взаимодействие гетерогенных агентов на микроуровне, в соответствии с индивидуальными поведенческими правилами, порождает на макроуровне принципиально иную регулярность, которая не только имеет обратный эффект на индивидуальный уровень, но и, что важнее, придает абсолютно новые свойства экономической системы. Редукция многообразия связей в экономике до размера одного агента подобные эффекте полностью исключает и является поэтому грубым искажением действительности.

Несмотря на то что основные подходы к прикладному моделированию экономических процессов предлагались в зарубежной научной литературе, в России, в особенности после смены экономической формации, появились заслуживающие внимания работы, целью которых являлась

проверка и развитие теоретических подходов при моделировании российской экономики. Одной из них является цикл исследований по верификации различных эконометрических моделей на основе российских данных, осуществленный в 1990-х годах и в начале 2000-х годов А.А. Петровым и И.Г. Поспеловым (Петров, Поспелов, 2009). Эта научная школа развила подход, интегрирующий структурные и неструктурные модели. Так, наряду с соотношениями модели, полученными на основе решения оптимизационных задач, было предложено использовать, так называемые институциональные ограничения, которые, в частности, могут быть получены на основе эконометрического оценивания (Поспелов и др., 2013). Определенные шаги в сторону построения гибридной модели были предприняты в работе (Скрыпник, 2016).

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрение мирового опыта макроэкономического моделирования позволяет сделать вывод, что бурное развитие неструктурного моделирования привело к появлению вполне эффективных методов моделирования, демонстрирующих хорошие прогностические свойства, зачастую превосходящие качество структурных моделей. Кроме того, достижения структурного и неструктурного моделирований во многом способствовали стиранию четкой грани между этими двумя направлениями и многие результаты и наблюдения, полученные в рамках одного направления, находили подтверждение и объяснение в другом. В настоящее время предпринимается ряд попыток интегрировать два направления в рамках гибридного подхода, где недостатки одного направления компенсируются преимуществами другого. На наш взгляд, именно на пути гибридного моделирования следует ожидать в ближайшее время новых прорывных результатов. Построению структурной модели экономики должно предшествовать эмпирическое изучение особенностей структурных связей и лежащих в их основе экономических механизмов, в первую очередь — механизмов подстройки к равновесию. Неструктурное моделирование способно предложить ряд подходов и методов, не требующих сильных допущений в отношении характера структурных связей, что позволяет сконструировать гибкий модельный аппарат.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

Андреев М.Ю., Вржещ В.П., Пильник Н.П., Поспелов И.Г., Хохлов М.А., Жукова А.А., Радионов С.А. (2013). Модель межвременного равновесия экономики России, основанная на дезагрегировании макроэкономического баланса // *Труды семинара имени И.Г. Петровского*. Т. 29. С. 43–145. [**Andreev M. Yu., Vrzheshch V.P., Pilnik N.P., Pospelov I.G., Khokhlov M.A., Zhukova A.A., Radionov S.A.** (2013). The intertemporal equilibrium model of the Russian economy based on the macroeconomic balance disaggregation. *Proceedings of the seminar named after I.G. Petrovsky*, 29, 43–145 (in Russian).]

Петров А.А., Поспелов И.Г. (2009). Математические модели экономики России // *Вестник РАН*. Т. 79. № 6. С. 492–506. [**Petrov A.A., Pospelov I.G.** (2009). Mathematical models of the Russian economy. *Herald of the Russian Academy of Sciences*, 79, 6, 492–506 (in Russian).]

Скрыпник Д.В. (2016). Макроэкономическая модель российской экономики // *Экономика и математические методы*. Т. 52. № 3. С. 92–113. [**Skrypnik D.V.** (2016). A macroeconomic model of the Russian economy. *Economics and Mathematical Methods*, 52, 3, 92–113 (in Russian).]

Battiston S., Gatti D., Gallegati M., Greenwald B., Stiglitz J. (2012). Default cascades: When does risk diversification increase stability? *Journal of Financial Stability*, 8, 3, 138–149.

Box G.E.P., Jenkins G.M. (1970). *Time series analysis: Forecasting and control*. San Francisco: Holden-Div.

Eitrheim Ø., Jansen E.S., Nymoen R. (2005). *The econometrics of macroeconomic modelling*. Oxford: Oxford University Press.

Eitrheim Ø., Jansen E., Nymoen R. (2000) Progress from forecast failure — the Norwegian consumption function. *The Econometrics Journal*, 5, 1, 40–64.

Engle R.F., Granger C.W.J. (1987). Co-integration and error correction: Representation, estimation, and testing. *Econometrica: Journal of the Econometric* Society, 55, 2, 251–276.

Estrella A., Fuhrer J.C. (1999). *Are "deep" parameters stable? The Lucas critique as an empirical hypothesis*. Boston: Federal Reserve Bank of Boston, 99.

Haavelmo T. (1944). The probability approach in econometrics. *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, 12, Supplement (July, 1944), iii–vi+1–115.

Kydland F.E., Prescott E.C. (1982). Time to build and aggregate fluctuations. *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, 50, 6, 1345–1370.

Lucas R.E. (1972). Expectations and the neutrality of money. *Journal of Economic Theory*, 4, 2, 103–124.

Lucas R.E. (1976). Econometric policy evaluation: A critique. *Carnegie-Rochester Conference Series on Public Policy*, 1, 19–46.

Marcellino M., Salmon M. (2002). Robust decision theory and the Lucas critique. *Macroeconomic Dynamics*, 6, 01, 167–185.

Muth J.F. (1961). Rational expectations and the theory of price movements. *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, 29, 3, 315–335.

Philips A.W. (1958). The relation between unemployment and the Rate of change of money wage rates in the United Kingdom, 1861–1957. *Economica. New Series*, 25, 100, 284–295. DOI: 10.2307/2550759. Available at: https://www.jstor.org/stable/2550759

Sargan J.D. (1964).Wages and prices in the United Kingdom: A study in econometric methodology. *Econometric Analysis for National Economic Planning*, 16, 25–54.

Sargent T.J., Sims C.A. (1977). Business cycle modeling without pretending to have too much a priori economic theory. *New Methods in Business Cycle Research*, 1, 145–168.

Sims C.A. (1980). Macroeconomics and reality. *Econometrica: Journal of the Econometric* Society, 48, 1, 1–48.

Sims C.A. (1981). An autoregressive index model for the US1948–1975. *Large-Scale Macro–Econometric Models: Theory and Practice.* North-Holland Pub. Co.

Stock J.H. (1988). A reexamination of Friedman's consumption puzzle. *Journal of Business & Economic Statistics*, 6, 4, 401–407.

Tinbergen J. (1937). An econometric approach to business cycle problems. Paris: Hermann & Cie.

The economic modeling development. An econometric aspect

© 2022 D.V. Skrypnik

D.V. Skrypnik,
Central Economics and Mathematics Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia; e-mail: skrypnikdv@gmail.com

Received 18.02.2022

Author thanks the anonymous Reviewer for the critical observation and remarks, improving the article.

Abstract. The experience of development of applied predominantly macroeconomic modeling is considered. A comparison is made of the so-called non-structural approach, which is not strictly substantiated by economic theory, with the structural approach, where such a justification is the basis. It is shown that the achievements of structural and non-structural modeling have largely contributed to the blurring of the clear line between these two approaches. An analysis of researches also allows us to conclude that the rapid development of non-structural modeling led to the emergence of effective modeling methods that demonstrate good predictive properties, often surpassing the quality of structural models. In addition, it is shown that the difficulties arising at a certain stage in the development of the non-structural approach were often eliminated within the framework of the same approach, but with the advent of new methods. The presence of a close connection between the structural and non-structural approaches and the need for a hybrid approach to modeling real economic systems and processes,— that is, an approach in which some behavioral mechanisms and their corresponding structural parameters are explicitly introduced into the model, while the remaining elements are identified on the basis of methods of non-structural approach.

Keywords: structural models; non-structural models; Lucas' critique; Phillips's curve.

JEL Classification: C0, C18, B40.

For reference: **Skrypnik D.V.** (2022). The economic modeling development. An econometric aspect. *Economics and Mathematical Methods*, 58, 2, 32–42. DOI: 10.31857/S042473880020013-3

ЭКОНОМИКА И МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ, 2022, том 58, № 2, с. 43–53

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ

Обзор подходов к трактовке «проблемы Джозефа Нидхэма»

© 2022 г. Юй Чанлинь

Юй Чанлинь,
РЭУ им. Плеханова, Москва, e-mail: zjuycl@163.com

Поступила в редакцию 20.01.2022

Аннотация. Развитие науки и технологические нововведения являются важными факторами экономического процветания любой страны. После многих веков опережающего научного и технологического развития Китай в течение нескольких столетий явно отставал от европейских стран как в области фундаментальных научных исследований, так и в сфере технологических инноваций. В статье систематизируются и анализируются точки зрения ученых разных стран, изучавших так называемую проблему Джозефа Нидхэма, которая формулируется в виде двух взаимосвязанных вопросов: «Почему китайская цивилизация была успешнее западной в приобретении естественных знаний и применении их для нужд человеческой практики с I до XV в. нашей эры?» и «Почему, начиная с XVI в., наука развивалась в европейской, а не в китайской (или индийской) цивилизациях?». На основании проведенного исследования делается вывод о том, что объяснения данного феномена, которое дают китайские и зарубежные ученые, можно с некоторой степенью условности разделить на три блока: ментальные особенности китайского общества (органическое понимание природы, чрезмерное уважение к традициям, философия духовности в сочетании с прикладным прагматизмом, презрение к физическому труду), природно-климатические факторы (большая территория, благоприятный климат, слабо развитая транспортная инфраструктура) и институциональная структура (жесткая сословно-бюрократическая система с четко выстроенными социальными лифтами, система имперских экзаменов, академическая стагнация).

Ключевые слова: проблема Джозефа Нидхэма, китайская экономика, китайская цивилизация, наука, технологии, ментальные модели, институциональная структура, природно-климатические факторы экономического развития.

Классификация JEL: A14, O11, O43, P48.

Для цитирования: **Чанлинь Юй** (2022). Обзор подходов к трактовке «проблемы Джозефа Нидхэма» // *Экономика и математические методы*. Т. 58. № 2. С. 43–53. DOI:10.31857/S042473880018316-6

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

В настоящее время китайская экономика и китайская наука демонстрируют впечатляющие успехи в развитии. Одним из объяснений данного феномена, помимо грамотной экономической политики правительства и высокого уровня доверия в социуме, является апелляция к сложившимся в китайском обществе институциональным структурам. На наш взгляд, изучение данного вопроса невозможно в терминах исключительно сегодняшнего дня, поскольку изменение взаимной скорости экономического и технологического развития европейской и китайской цивилизаций имело место и раньше. По свидетельству многих исследователей, китайская наука активно развивалась и достигла значимых результатов в период с I до XV в. нашей эры. И это — не только порох, бумага, фарфор, компас, книгопечатание, но и передовые технологии в металлургии, включая доменные печи. Однако затем произошел перелом, который привел к существенному отставанию научного и технологического развития китайского общества (Castells, 2010).

Одним из первых, кто сформулировал данную проблему, был британский ученый Джозеф Нидхэм, автор 15-томного труда «Наука и цивилизация в Китае». Позднее американский экономист Кеннет Боулдинг назвал поднятую Нидхэмом тему для обсуждения «проблемой Джозефа Нидхэма». В классическом варианте проблема Нидхэма формулируется в виде двух взаимосвязанных вопросов: «Почему китайская цивилизация была успешнее западной в приобретении естественно-научных знаний и применении их для нужд человеческой практики с I в.н.э. до XV в.?» и «Почему

современная наука развивается в европейской, а не в китайской (или индийской) цивилизации?» (Needham, 1986, p. 67).

Отметим, что европейские и китайские ученые обсуждали проблему отставания китайской науки от западной еще за 300 лет до того, как Нидхэм сформулировал свои вопросы. Но именно он впервые озвучил ее в явном виде.

Иезуитские миссионеры прибыли в Китай во времена правления династии Мин (конец XVI в.). Распространяя христианские доктрины, они также принесли в Китай новую систему знаний — западную науку и западные технологии. Сильный культурный шок заставил китайских и западных ученых начать изучать различия в области науки и технологий. Итальянский католический миссионер-иезуит Маттео Риччи, французский иезуит Доминик Парренин, французские мыслители эпохи Просвещения Вольтер и Дидро, британский философ Юм и другие западные ученые участвовали в обсуждении этой проблемы.

Среди китайских ученых можно назвать имена Янь Фу, Жэнь Хунцзюянь, Лян Цичао, Ван Цзинь, Фэн Юлань. В первой половине XX в., в связи с новым витком развития китайской науки и технологий, группа китайских ученых заново стала исследовать причины отсталости науки и технологий в Китае в Средние века. В число этих ученых входили Чжу Кечжэнь, Сюй Мо, Тан Цзюньи, Ху Вэйбай и др.

В 1930-е годы немецкий исследователь К.А. Виттфогель написал книгу «Экономика и общество Китая», в которой также рассматривал данную проблему. Дискуссия достигла пика в 1944 г., и именно в это время Нидхэм участвовал в обсуждении данного вопроса. В октябре 1944 г. Нидхэм прочитал лекцию под названием «Наука и культура в Китае» в Чжэцзянском университете, где высказал предположение, что суть проблемы заключается в особенностях современной экспериментальной науки и в теоретической системе науки.

В 1980-х годах исследования «проблемы Нидхэма» достигли нового пика. В 1982 г. в Чэнду была проведена «Конференция о причинах отсталости современной китайской науки», которая вызвала новую волну энтузиазма китайских ученых в исследовании «проблемы Нидхэма». Согласно предварительной статистике Ван Цяньгочжуна в ходе внутренних дискуссий по «проблеме Нидхэма» с 1980 по 1998 г. было опубликовано более 260 статей и более 30 книг (Wang, 2000, p. 212). И в настоящее время «проблема Нидхэма» остается актуальной темой, обсуждаемой в обществе и научных кругах. К ее обсуждению подключились социологи, экономисты, историки, философы, математики, а также специалисты в конкретных прикладных областях науки — географии, медицины, астрономии.

Задачей настоящей работы является обзор и систематизация подходов различных исследователей к обсуждению «проблемы Нидхэма». По мнению автора, выделяемые различными учеными причины с некоторой степенью условности можно разделить на три группы: ментальные (логика научного познания); природно-климатические (экономические); институциональные (социальные особенности структурирования китайского общества). Отдельно обсуждаются взгляды ученых, которые отрицают существование самой «проблемы Нидхэма».

1. МЕНТАЛЬНОСТЬ И ЛОГИКА РАЗВИТИЯ НАУЧНОГО ПОЗНАНИЯ

Сначала рассмотрим наиболее распространенные объяснения отставания китайской науки и технологий в течение XVI–XIX вв.н.э. с точки зрения ментальных особенностей китайского социума.

Гипотеза примата коллективистских начал и уважения к прошлому (подавления индивидуальной инициативы)

Психолог Чень Ли выдвинул гипотезу, согласно которой основной причиной отставания китайской науки является традиционное китайское коллективное самосознание. «Мы живем коллективной жизнью, и я — всего лишь член этого коллектива — семьи, я не существую независимо» (Chen, 2002, p. 288). Он считает, что китайская цивилизация основана на сыновней почтительности. Китайцы не уважают собственных мыслей, что является одной из причин, негативно влияющих на развитие науки.

Макс Вебер считал, что в конфуцианской культуре сыновняя почтительность рассматривается как источник всех других моральных качеств человека, а также является основным свойством, которым должны обладать чиновники в бюрократической системе. Он объяснял сплоченность китайских кланов поклонением предкам. Независимо от обстоятельств, самая фундаментальная

вера в сердцах китайцев — вера в силу предков, а души предков также стали средством общения потомков с богами. За этим явлением стоит основное различие в историческом мировоззрении между Китаем и Западом. Запад поощряет и пропагандирует инновации, Китай ориентирован на уважение традиций и истории.

Цянь Му выразил схожую точку зрения: «Историческое развитие Китая является продолжением единой цивилизации. На исторической сцене Китая был единственный исторический субъект — китайская нация; в то время как историческое развитие Запада является смешением различных цивилизаций — греки, римляне и немцы действовали на одной и той же исторической стадии и сменяли друг друга. Это различие заставляет Китай и Запад по-разному осознавать исторические законы “движения времени” и “прогресса”. В Китае в древности люди верили, что история стабильна и что есть нечто вечное и неизменное, что затем превратилось в циклический взгляд на исторические изменения. Исторический процесс может быть только унаследован и продолжен, и самое бóльшее — там будут какие-то изменения, но нет кардинального изменения социальной системы и концепции, и нет прогресса и развития» (Qian, 2017, p. 18–20).

Гипотеза органического понимания природы

Син Чжаолян полагал, что китайская наука отличается от западной двумя параметрами: объектами изучения и способам мышления. С одной стороны, китайское естествознание на протяжении почти всей своей истории было ориентировано на возможность применения своих результатов на практике; и это определило основные области исследования — сельское хозяйство, арифметика, медицина, астрономия и другие практические технологии. С другой — китайская наука характеризуется специфическим способом познания, в основе которого лежит совокупность базовых представлений о природе и обществе: изначальное признание таинства (непознаваемости) мира, представление о единстве природы и человека, доктрина взаимного влияния и аналогичной структуры всех вещей.

Согласно Син Чжаоляну: «Научное познание в древнем Китае оставалось на уровне наблюдения с точки зрения научной практики и понимания... Визуальное описание и принцип предположений (гипотез), которые подтверждаются или не подтверждаются наблюдениями, составляют основное содержание древних китайских исследований. Формы мышления и интерпретации жизненной силы [субстанции, лежащей в основе всего, что есть в этом мире], инь и янь [мужского и женского начала] и пяти элементов мироздания являются трансцендентальной формой политико-естественной философии» (Xing, 2004, p. 34). Соответственно, по его мнению, основная причина специфической формы китайской науки — органический взгляд на природу как следствие древнекитайского способа научного мышления.

Гипотеза отсутствия научных экспериментов

Развитием идей Син Чжаоляна можно считать точку зрения, которая трактует отсталость китайской науки как результат пренебрежения к экспериментальному способу познания. Немецкий историк и синолог К.А. Виттфогель писал: «Китай достиг реальных научных достижений только в астрономии и математике. Но если смотреть на ситуацию в целом, естественные науки, связанные с промышленным производством, застопорились на уровне сбора эмпирических данных... Египтяне, как и китайцы, не превышали уровня эмпирического решения различных физических и химических проблем» (Wittfogel, 2002, p. 41–42).

Такого же мнения придерживался китайский географ и метеоролог Чжу Кэчжэнь. Он писал: «Современная наука — наука экспериментальная. Она недостаточно развита в Китае по двум причинам: во-первых, неумение пользоваться научными инструментами, а во-вторых, недостаток научного духа». Чжу Кэчжэнь полагал, что у древнекитайского чиновничества были традиционные взгляды, презирающие труд, люди не желали работать руками, в том числе проводить эксперименты.

Экономист Линь Ифу считает, что технологические инновации в Китае замедлились после XIV в., в то время как технологические инновации на Западе после промышленной революции XVIII в. значительно ускорились, и причиной этого является изменение самих технологий изобретательства. «До промышленной революции в середине XVIII в., будь то в Китае или в западном мире, половина изобретений новых технологий была результатом случайных проб и ошибок мастеров или крестьян, которые непосредственно участвовали в производстве. В ходе промышленной революции XVIII в. технические изобретения впервые превратились в результаты

сознательных экспериментов изобретателей. В XIX в. эксперименты изобретателей были преобразованы в эксперименты, проводимые современной наукой» (Lin, 2007, p. 8).

Гипотеза слабого развития формальной логики

Еще одно направление развития позиции Син Чжаоляна делает упор на специфику научного мышления китайских ученых. Жэнь Хунцзюнь высказал мнение, что новое знание производится в том числе благодаря логическим приемам, прежде всего индукции. Индукция — переход от частного наблюдения к общему суждению — один из важнейших методов научного мышления. Причина, по которой в Китае нет науки в ее современном понимании, кроется, по мнению Жэнь Хунцзюня, в отсутствии индукции как метода научного познания китайских ученых.

Чэнь Ли также считает, что древней китайской науке и технике не хватало индуктивного мышления. Древние китайцы часто использовали описания эмпирических фактов, но им не хватало логических рассуждений — перехода от наблюдения и описания явления к познанию его сущности, так как они по традиции рассматривали природные явления как действие духов, стоящих за этими явлениями. По мнению Чэнь Ли, этот анимизм-антропоморфизм препятствовал развитию древней китайской науки и техники.

Иной точки зрения придерживается лауреат Нобелевской премии физик Ян Чжэньнин. По его мнению, традиционная китайская культура характеризуется индукцией, но ей не хватает дедукции. Он пишет, что на концепцию «единство Неба и человека» повлияла книга «И Цзин». Китайская традиция не обращает внимания на логику и порядок, в котором она написана, читатели сами должны сделать окончательный вывод. Концепция «единства природы и человека» заключается в использовании принципов человеческого мира для раскрытия законов природы, что в определенном смысле препятствует развитию современной науки.

Лауреат Нобелевской премии Альберт Эйнштейн в письме Дж. Э. Свитцеру также говорит о недостатке логического мышления в китайском подходе к исследованиям. По его мнению, «возможности развития западной науки связаны с двумя основными достижениями, а именно, изобретением системы формальной логики (евклидовой геометрии) греческими философами и открытием возможности выстраивания причинно-следственных связей посредством систематических экспериментов (период Ренессанса). На мой взгляд, неудивительно, что китайские мудрецы не пошли на эти шаги, удивительно то, что эти открытия наконец-то появились» (Einstein, 2017, p. 772).

Гипотеза прикладного прагматизма

В своей статье «Китай и современная наука» Сюй Мо пишет: «Китайских ученых больше всего интересует прагматизм» (Xu, 2002, p. 65). Сюй Мо считает, что хотя математика, медицина и геология достигли в древнем Китае значительного развития, теоретическая основа этих дисциплин не была создана. При этом прагматизм не является фактором, способствующим развитию науки. Математик Цянь Баоцу утверждал, что Китай когда-то развивал науку, однако поскольку китайцы уделяют слишком много внимания сиюминутной практичности, а не науке, развитие последней замедлилось. В отличие от китайцев западные ученые ценят приращение теоретических знаний самих по себе. И то, что создается как чистая наука, достаточно часто затем находит практическое применение.

Мыслитель и философ Лян Шумин разделил использование и исследование науки на Шу и Сюэ. Шу подчеркивает практическое применение и прикладной метод науки, а Сюэ делает упор на исследования и теорию науки. Лян Шумин писал: «Истины, которые имеют прикладное значение, являются просто техникой (операцией), а не ученостью. Большая часть китайского обучения — это Шу, а не Сюэ, или их не различают» (Liang, 2002, p. 36).

Гипотеза отсутствия запроса древнего китайского общества на естественнонаучные знания

Китайский философ Фэн Юлань писал: «В Китае нет науки, потому что, по его собственным ценностным стандартам, ему это не нужно» (Feng, 2008, p. 2). Основываясь на философских мыслях различных исторических периодов в Китае, Фэн Юлань обосновал, что китайцы стремятся узнать что́ находится в наших душах, стремятся к постоянному миру в наших душах, а не к покорению и контролю над природой. Он также объяснил: «Можно сказать, что китайские философы любят достоверность восприятия, а не достоверность концепций. Поэтому они не хотят и не переводят свои конкретные наблюдения в научные формы. Одним словом, в Китае нет философии

Рис. 1. Внутренние ментальные факторы, препятствующие развитию науки

Источник: составлено автором.

в западном понимании, китайская философия наиболее ориентирована на мораль и практику» (Feng, 2008, p. 16).

Обобщая приведенные выше гипотезы, можно построить следующую схему ментальных факторов, которые повлияли на развитие китайской науки (рис. 1).

2. ПРИРОДНО-КЛИМАТИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ

Теперь посмотрим на «проблему Нидхэма» с точки зрения природно-климатических факторов, которые влияли на развитие китайской экономики.

Гипотеза влияния физико-географической среды

Вэнь Гуаньчжун выдвинул доктрину географической одаренности Китая. Во II в. н.э., после 400 лет мирного развития при династии Хань, население Китая превысило 60 млн человек (Китай стал самой густонаселенной страной в мире). Это позволяло Китаю мирно развиваться, занимаясь традиционными видами деятельности — сельским хозяйством и ремеслами — и внося в них технологические инновации.

Во время правления династии Сун (960–1279 гг. н.э.) была преодолена внутренняя раздробленность Китая, расширились его границы, повысился уровень урбанизации, стали развиваться ремесленное производство и торговля. Здесь можно привести аналогию развития империй с теорией жизненных циклов предприятия И. Адизеса. Он выделяет 10 стадий жизненного цикла развития любого предприятия: зарождение, младенчество, высокая активность, юность, расцвет, стабильность, аристократия, ранняя бюрократия, бюрократизация, смерть (Адизес, 2007). Стадии старения компании начинаются именно с достижения устойчивого положения и внутренней самодостаточности, что приводит к постепенному исчезновению стимулов развития.

Таким образом, после правления династии Сун, во время которого Китай обрел большие территории, пригодные для развития сельского хозяйства, демографического роста и экономического развития, Китай попал в ловушку стабильности аграрного общества, из которой он не смог выбраться. Географическое богатство Китая помешало зарождению местной научной

революции. Когда Европа заново (в эпоху Ренессанса) откроет для себя научные идеи и научные методы Древней Греции, Китай неизбежно начнет отставать от Европы.

Экономист Чэнь Пин также объясняет проблему географическими факторами. Он считает, что Китай — страна, где гор больше, чем пахотных земель. Все войны и восстания в Китае были войнами за земли (Chen, 2000, p. 97). В то же время многие природные факторы сильно ограничивали развитие торговли. Концепция же экономического развития блокировала возможность масштабного развития торговых отношений, а это привело к тому, что Китай не развивал внешнюю торговлю.

Гипотеза экономической закрытости

Британский философ Д. Юм считал, что у Китая в Средние века было мало внешнеторговых партнеров и это привело к тому, что Китай не развил более совершенных образований и науку.

Не Цзяньхуа рассматривал «проблему Нидхэма» с экономической точки зрения. В статье «Экономическое решение Проблемы Нидхэма» (Nie, 2008, p. 315–316) он предложил следующие четыре объяснения отсталости Китая: «нечеткое разделение труда и неэффективное распределение ресурсов», «рынок узкий и ограничен в получении прибыли», «отсутствие достаточной конкуренции», «неэффективная система стимулов и существование “нахлебников”». Он считал, что древняя китайская феодальная система перенаправляла талантливых людей в сферу чиновничьей деятельности, вследствие чего наиболее образованные интеллектуалы не участвовали в развитии науки и технологий. А это, в свою очередь, привело к потере научных и технологических человеческих ресурсов и неэффективному распределению материальных ресурсов.

Китайское официальное общество породило дискриминацию в развитии промышленности и торговли. Капитализм не получил развития, а эмпирическая наука и технология не смогли значительно повысить эффективность производства. В результате политики закрытых дверей Китаю не хватает достаточных знаний и понимания внешнего мира, а технологическим инновациям не хватает конкуренции извне.

Обобщая приведенные суждения, можно построить следующую картину взаимосвязи природно-климатических и экономических факторов отставания Китая (рис. 2).

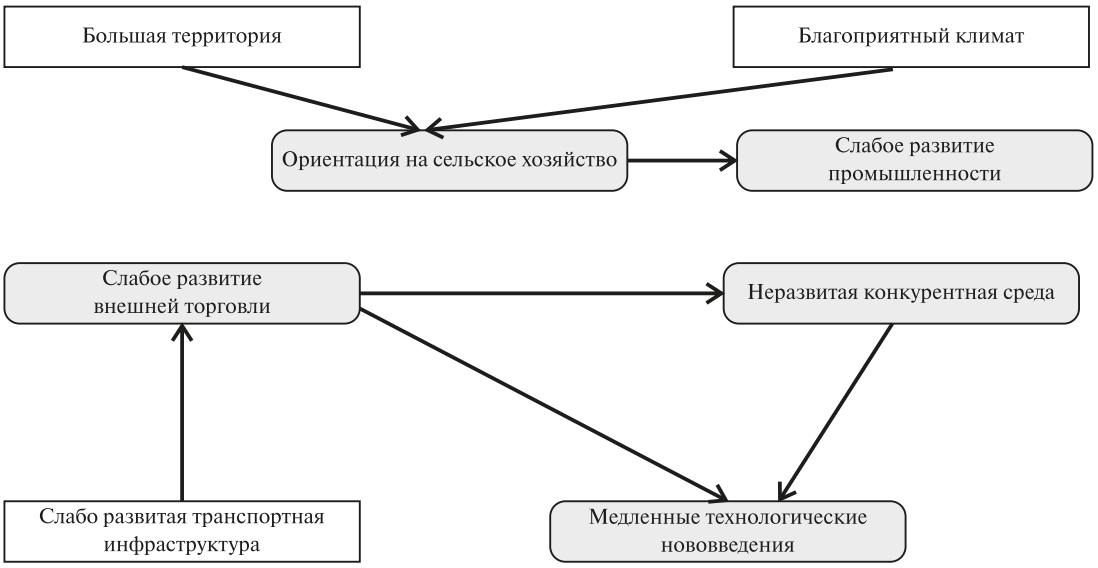


Рис. 2. Природно-климатические и экономические факторы

Источник: составлено автором.

3. ИНСТИТУЦИОНАЛЬНАЯ СТРУКТУРА КИТАЙСКОГО ОБЩЕСТВА

К гипотезе окостенения близко примыкает институциональный ракурс анализа «проблемы Нидхэма».

Гипотеза сословного характера китайского общества и имперских экзаменов как способа социального продвижения

Итальянский миссионер-иезуит Маттео Риччи обнаружил, что «изучение математики и медицины не уважается, потому что они не поощряются такими же бонусами, как изучение философии; студентов привлекает надежда на последующие почести и награды» (Ricci, Trigault, 2017, p. 70). Объяснение такого уважения к философии заключалось не только в традициях, но и в том, что философия являлась обязательным предметом имперского экзамена, который надо было сдать, чтобы продвинуться по карьерной чиновничьей лестнице.

Сюй Мо писал: «Первой причиной, по которой Китай не смог родить современную науку, является влияние имперских экзаменов Кэцзюй — системы экзаменов на госслужбу» (Xu, 2002, p. 63). Под влиянием системы имперских экзаменов даже очень способные люди более склонны придерживаться классической библиографии Конфуция и не желают изучать явления естественного мира. Лян Цичао, лидер реформаторского движения 1898 г., писал: «Самым большим препятствием в академической среде естественно являются восемь частей экзаменационного сочинения — Багувэнь. Багувэнь несовместимы с обучением, особенно — с естественными науками» (Liang, 2016, p. 17).

Такие экзамены привели к тому, что талантливые люди того времени не были заинтересованы в достижениях в области естественных наук. Под влиянием содержания системы имперских экзаменов китайские интеллектуалы вели хорошо обеспеченную жизнь привилегированного класса, презирая экспериментальную работу как «низкий вид деятельности».

Гипотеза академической бюрократизации

Французский иезуит Доминик Парренин жил в Китае на протяжении десятилетий. Восхищаясь древней китайской наукой и технологиями, он также анализировал причины, препятствующие прогрессу китайской астрономии. По его мнению, это прежде всего неуважение к научным занятиям и сословно-бюрократическая система организации общества. Неуважение проявлялось как в низком уровне оплаты труда астрономов в сочетании с очень жесткими требованиями к их работе, так и в отсутствии здоровой научной конкуренции между специалистами, занимающимися данным видом деятельности. «Во-первых, люди, которые могут выделиться, не получают должного вознаграждения» (Parrenin, 1995, p. 163). Китайские астрономы в Циньтяньцзянь получают чрезвычайно низкую заработную плату, и даже малейшие ошибки в их работе влекут за собой суровое наказание. «Второй фактор, препятствующий научному прогрессу,— отсутствие конкуренции внутри и вне Циньтяньцзянь» (Parrenin, 1995, p. 165). Научная конкуренция подменена соперничеством между людьми, работающими в данной сфере, в основе которого лежит не уровень профессиональных компетенций, а изучение трудов классиков и сдача имперского экзамена.

Химик Ван Цзинь опубликовал статью «Научные мысли в Китае». Основными причинами отставания Китая в развитии науки он считал феодальное и академическое самодержавие.

Ван Жуфа исследовал «проблему Нидхэма» на примере развития китайской математики. «Ради вечности имперской власти и политической цели достижения долгосрочной стабильности феодальный правящий класс всегда рассматривал математику и соответствующие ей навыки как не вызывающий уважение (недостойный благородных людей) объект изучения... Политика китайского феодального общества, ставившая во главу угла развитие сельского хозяйства и ограничение торговли, привела к тому, что математика утратила возможность быть движущей силой инноваций. Для стабильности своих режимов китайские феодальные династии рассматривали сельское хозяйство как “основу”, а промышленность и торговлю — как “низменное занятие”. Поэтому проводилась долгосрочная политика опоры на развитие сельского хозяйства и сдерживание бизнеса» (Wang, 2001, p. 13). Кроме того, такие внутренние причины, как отказ от развития способностей к математическим рассуждениям и сосредоточение внимания только на решении практических задач, препятствовали глубокому осмыслению сути математики, что привело к ее отставанию в Китае.

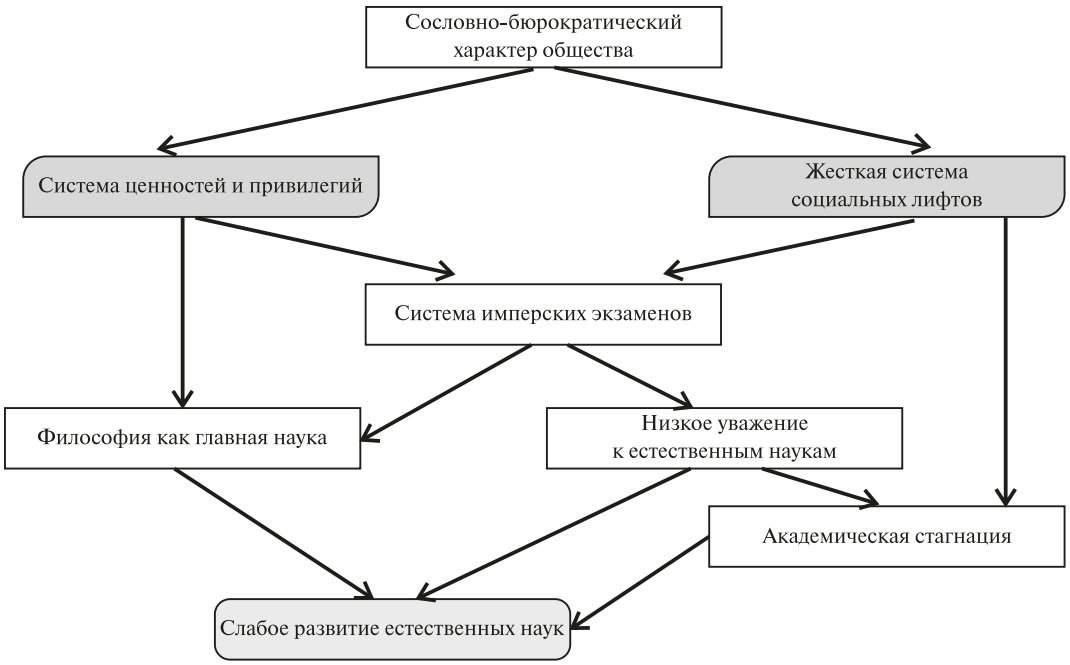


Рис. 3. Социальные факторы, препятствующие развитию науки

Источник: составлено автором.

Гипотеза нечеткой спецификации прав собственности

Макс Вебер считал, что древний Китай полагался на централизованную систему власти для укрепления феодального правления и национального единства, создавая благоприятные условия для развития науки и технологий. Однако размытость (низкая спецификация) прав собственности препятствовала развитию капитализма и сопутствующих ему волн технологических инноваций.

Ши Сяонин опирается на теорию прав собственности Дугласа Норта, чтобы объяснить существование «проблемы Нидхэма». С точки зрения Норта, эффективная спецификация и защита прав собственности могут максимизировать энтузиазм людей в отношении изобретений и творчества; это — ключ для анализа технического прогресса и экономического развития западных стран в современную эпоху. Однако «долгое время в древнем Китае практически не существовало институциональной структуры, направленной на защиту прав собственности и регулирование экономической жизни. Недостаточность институционального обеспечения привела к тому, что... технический прогресс не мог быть эффективно преобразован в реальную производительность» (Shi, 2010, p. 48).

Совокупность и взаимовлияние институциональных факторов можно представить в виде следующей схемы (рис. 3).

4. ОТРИЦАНИЕ ПРОБЛЕМЫ

Как мы уже отмечали, существует ряд ученых, которые подвергают сомнению подлинность самой «проблемы Нидхэма».

Критика с точки зрения некорректности постановки вопроса

Н. Сивин в статье «Почему научная революция не произошла в Китае — правда ли это?» приводит два аргумента (Sivin, 1982):

1) исторические исследования не могут ответить на вопрос, почему научная революция не произошла в Китае. Они скорее исследуют заблуждения, которые побудили людей задавать этот вопрос;

2) согласно стандартам научных историков в XVIII в. в Китае произошла научная революция, но она не дала социальных эффектов, которые, по нашему мнению, должны быть достигнуты научной революцией.

Сивин полагает, что «проблема Нидхэма» очень похожа на вопрос, почему ваше имя не появилось на третьей странице сегодняшней газеты, и не имеет исследовательского значения.

С появлением западной математики и математической астрономии в XVII в. китайские ученые отказались от методов алгебраических уравнений и использовали геометрию и тригонометрию для анализа законов движения небесных тел, что заставило древних китайских астрономов поверить в то, что математические модели могут предсказывать астрономические явления. Это можно назвать концептуальной революцией в астрономии, но данная революция не изменила фундаментального взгляда людей на природу.

Э.Ч. Грэм также считает, что «проблема Нидхэма» некорректно сформулирована. На самом деле она включает два других вопроса: 1) почему научная революция произошла в Европе в начале XVII в.; 2) почему научная революция не произошла в Китае или Индии. По мнению Грэма, второй вопрос не имеет научно обоснованного ответа, потому что если событие произошло, мы можем выбрать одну из возможных причин, но если оно не произошло, мы не можем проанализировать все нереализованные возможности (Graham, 1971).

Критика с точки зрения логического противоречия

Чжан Бинлунь и Сюй Фэй полагают, что постановка «проблемы Нидхэма» является логически противоречивой. Эти противоречия заключаются в двух аспектах:

1) современная наука «проблему Нидхэма» относит к совокупности различных научных теорий и традиций, которые возникли на Западе. Таким образом, вопрос, почему западная наука возникла на Западе, является тавтологией;

2) пионерами современной науки были итальянец Галилей, британский доктор Харви, бельгийский ученый Визалиус, швейцарский натуралист Геснер, британский физик Ньютон и другие. Очевидно, что «современная наука» была создана коллективным вкладом множества западных стран и народов, но «проблема Нидхэма» соответствует только одной стране — Китаю, что создает противоречия в региональных определениях.

Они считают, что «проблема фактически стала флагом для дисциплины китайской истории науки, ее больше не следует использовать в качестве конечной цели» (Zhang, Xu, 1993, p. 35).

Критика первой части вопроса

Некоторые ученые считают, что науки в ее современном понимании не существовало и в древнем Китае, поэтому утверждение о том, что «Китай лидировал в науке и технологиях с I по XV в.», неверно. Цянь Чжаохуа написал в статье «Новое объяснение “проблемы Нидхэма”»: «Будь то Джозеф Нидхэм или китайские ученые, обсуждая связанные вопросы, обычно привыкли использовать два слова “наука” и “технология” вместе. Это важная причина недопонимания. Сегодня при быстром развитии науки и технологии граница между наукой и технологией может быть размыта. Но в древних обществах граница между наукой и технологиями была очень четкой» (Qian, 1998, с. 55). Технологическое лидерство Китая не означает, что он также является передовым в научном отношении.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Независимо от того, насколько корректна постановка так называемой проблемы Нидхэма, поднимаемая ею тема является, несомненно, актуальной с научной точки зрения. Западные страны, действительно, в течение нескольких веков опережали Китай в области науки и промышленного производства. А затем Китай стал не просто догонять другие страны, но его развитие стало во многом их опережать. Соответственно, ответы на вопрос, что мешало развитию китайской науки и китайской промышленности, являются чрезвычайно важными не только для Китая, но и для остального мира.

Объяснения, которое дают различные китайские и зарубежные ученые, можно с некоторой степенью условности разделить на три блока:

– ментальные особенности китайского общества (чрезмерное уважение к традициям, органическое понимание природы, философия духовности в сочетании с прикладным прагматизмом, презрение к физическому труду), обусловливающие отсутствие спроса на фундаментальную науку и формальную логику, а также слабое развитие прикладных методов научного исследования;

– природно-климатические факторы (большая территория, благоприятный климат, слабо развитая транспортная инфраструктура), являющиеся причиной экономической замкнутости, слабого развития конкуренции и ориентации на сельское хозяйство;

– институциональная структура (жесткая сословно-бюрократическая система с четко выстроенными социальными лифтами, система имперских экзаменов, академическая стагнация), препятствующая научной конкуренции и снижающая привлекательность естественных наук для талантливых людей.

Нам представляется, что все эти объяснения являются правдоподобными и взаимодополняющими. Очевидно, что природно-климатические факторы, влияющие на особенности экономического развития, в то же время формировали институциональную структуру китайского общества. Несомненным также является и тот факт, что институциональная структура и ментальные модели тесно взаимосвязаны и воздействуют друг на друга.

Однако открытым остается очень важный вопрос, что именно помогло китайскому обществу так быстро преодолеть отставание от Запада в наши дни. Идет ли речь о смене ядра мир-системы (Валлерстайн, 2001) или об ускоренном развитии страны, успешно вошедшей в существующую систему центр-периферийных связей?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

Адизес И. (2007). Управление жизненным циклом корпорации. СПб: ПИТЕР. [**Adizes I.** (2007). *Managing corporate lifecycles*. Saint Petersburg: PITER (in Russian).]

Валлерстайн И. (2001). Анализ мировых систем и ситуация в современном мире. СПб.: Университетская книга. [**Wallerstein I.** (2001). *Analysis of world systems and the situation in the modern world*. Saint Petersburg: Universitetskaja kniga (in Russian).]

Castells M. (2010). *The information age: Economy, society, and culture*. Vol. 1: The rise of the network society. Chichester: Wiley-Blackwell.

Chen L. (2002). A psychological analysis of the reasons for the underdevelopment of science in our country. In: D. Liu, Y. Wang. *Chinese science & scientific revolution. Selected works on Needham problem and related issues*. Shenyang: LiaoNing Education Press, 281–296.

Chen P. (2000). *Divide of civilizations, economic chaos and evolutionary economics*. Beijing: Economic Science Press.

Einstein A. (2017). The letter to J.E. Switzer. In: L. Xu, B. Li, Z. Zhao, B. Fan. *Einstein Collection*. Beijing: The Commercial Press. 772 p.

Feng Y. (2008). *Collected works of Feng Youlan*. Part 10. Changchun: Changchun Press.

Graham A. (1971). China, Europe, and the origins of moderm science: Needham's the grand titratian. *Asia Major,* 16, 265–303.

Liang Q. (2016). *Nearly 300 years of Chinese academic history*. Beijing: China Culture and History Press.

Liang S. (2002). *Eastern and Western culture and philosophy*. Beijing: The Commercial Press.

Lin Y. (2007). Needham problem, Weber's question, and China's miracle. *Journal of Peking University (Philosophy and Social Sciences),* 4, 44, 5–22.

Needham J. (1986). Science and society in East and West. In: J. Pan. *Needham Collection*. Shenyang: Liaoning Science and Technology Press, 65–85.

Nie J. (2008). An Economic Solution to the Needham Problem. *Inner Mongolia Science Technology & Economy*, 8, 162, 315–316.

Parrenin D. (1995). Letters from Parrenin to Mairan — containing various questions on China. In: J. Zhu. *Foreign priests look at China*. Shanghai: Shanghai People's Publishing House, 163–168.

Qian M. (2017). *Introduction to Chinese cultural history*. Zhengzhou: Henan People's Press.

Qian Z. (1998). A new explanation of "Needham Problem". *Dialectics of Nature,* 3, 14, 55–59.

Ricci M., **Trigault N.** (2017). *Matteo Ricci's notes on China*. Part 1. Beijing: The Commercial Press.

Shi X. (2010). North's explanation of "Needham Problem": An analysis framework based on property rights. *Tribune of Social Sciences,* 7, 46–50.

Sivin N. (1982). Why the scientific revolution did not take place in China — or didn't it? *Chinese Science*, 5, 45–65.

Wang Q. (2000). Retrospect and prospect of Needham research. In: *Needham Documentation Center "Needham Research"*. Shanghai: Shanghai Popular Science Press, 196–222.

Wang R. (2001). Needham problem — new solutions to mathematical problems. *Journal of BUPT (Social Sciences Edition)*, 3, 4, 10–14.

Wittfogel K. (2002). Why China didn't produce natural science. In: D. Liu, Y. Wang. *Chinese science & scientific revolution. Selected works on Needham problem and related issues*. Shenyang: LiaoNing Education Press, 36–45.

Xing Z. (2004). From Einstein's thesis to Needham problem. Theoretical thinking from the angle of scientific formation. *Journal of SJTU (Philosophy and Social Sciences),* 12, 36, 31–36.

Xu M. (2002). China and modern science. In: D. Liu, Y. Wang. *Chinese science & scientific revolution. Selected works on Needham problem and related issues*. Shenyang: LiaoNing Education Press, 63–66.

Zhang B., Xu F. (1993). The logical contradiction and scientific value of the Needham problem. *Journal of Dialectics of Nature,* 15, 88, 3544, 80.

An overview of different approaches to the interpretation of "Needham's Grand Question"

© 2022 Yu Changlin

Yu Changlin,
Plekhanov Russian University of Economics, Moscow, Russia; e-mail: zjuycl@163.com

Received 20.01.2022

Abstract. The development of science and technological innovations are important factors of the economic prosperity of any country. After many centuries of advanced scientific and technological progress China had been retarding European countries for several centuries both in the field of basic scientific and technological researches. The article focuses on systematization and analysis of scientists' opinions on "Needham's Grand Question" that is formulated in the form of two interrelated questions: "Why was the Chinese civilization more successful than the Western one in acquiring natural knowledge and applying it to the needs of human practice since the 1st and until the 15th century AD?" and "Why science has been developing in European civilization, but not in the Chinese (or the Indian) ones since the 16th century?" The article offers the explanation of that phenomenon, which is given by Chinese and foreign scientists. The explanation can be divided in three types: the mental characteristics of Chinese society (an organic understanding of nature, excessive respect for traditions, the philosophy of spirituality in combination with applied pragmatism, contempt for physical labor), environmental factors (vast territory, favorable climate, underdeveloped transport infrastructure) and institutional structure (a rigid estate-bureaucratic system with clearly built social elevators, a system of imperial examinations, academic stagnation).

Keywords: Needham's Grand Question, Chinese economics, Chinese civilization, science, technology, mental models, institutional system, environment and economic development.

JEL Classification: A14, O11, O43, P48.

For reference: **Changlin Yu** (2022). An overview of different approaches to the interpretation of "Needham's Grand Question". *Economics and Mathematical Methods*, 58, 2, 43–53. DOI: 10.31857/S042473880018316-6

ЭКОНОМИКА И МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ, 2022, том 58, № 2, с. 54–63

НАРОДНОХОЗЯЙСТВЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ

Логистический подход к организации этноэкономических промышленных кластеров (на примере Республики Тыва)

© 2022 г. Б.С. Монгуш, А.И. Богданов, С.А. Чупикова

Б.С. Монгуш,
ФГБУН «Тувинский институт комплексного освоения природных ресурсов Сибирского отделения РАН», Кызыл; e-mail: bbb16@mail.ru

А.И. Богданов,
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна», Санкт-Петербург; e-mail: abogd1@rambler.ru

С.А. Чупикова,
ФГБУН «Тувинский институт комплексного освоения природных ресурсов Сибирского отделения РАН», Кызыл; e-mail: s_fom@inbox.ru

Поступила в редакцию 15.12.2021

Аннотация. Исторически сложившейся отраслью экономики Республики Тыва (РТ), определенной на основе географического расположения, природно-климатических условий и многовекового опыта коренного населения, является мясо-шерстное скотоводство. Этноэкономический уклад хозяйствования тувинцев и государственная поддержка населения в виде губернаторских проектов Правительства РТ «Дук», «Кеш» и др. создают предпосылки развития в регионе промышленных кластеров этнической направленности. Для повышения конкурентоспособности и развития промышленности в целом целесообразна организация на территории региона центров промышленных кластеров — предприятий глубокой переработки сырья, производимой традиционными этническими хозяйствами. Целью данной работы является решение задачи нахождения оптимальных географических координат точек расположения производственных объектов сбора и переработки сельскохозяйственного сырья относительно поставщиков, в которых транспортные издержки минимизируются. Предложена реализация математической модели оптимальной организации экономического пространства региона на основе развития системы традиционного производства. Для решения задачи использован аппарат кластерного анализа и логистический подход к формированию производственно-распределительной сети с учетом имеющейся транспортной инфраструктуры. Расчеты приводятся на примере организации и развития кластера легкой промышленности Республики Тыва на основе традиционного хозяйствования региона — животноводства, а именно овцеводства.

Ключевые слова: этноэкономика, переработка сельскохозяйственного сырья, развитие промышленности, математическая модель, оптимизация, этнокластер, транспортно-складская задача.

Классификация JEL: C6, R3.

Для цитирования: **Монгуш Б.С., Богданов А.И., Чупикова С.А.** (2022). Логистический подход к организации этноэкономических промышленных кластеров (на примере Республики Тыва) // *Экономика и математические методы*. Т. 58. № 2. С. 54–63. DOI: 10.31857/S042473880019186-3

ВВЕДЕНИЕ

Повышению качества жизни населения регионов и конкурентного преимущества традиционной хозяйственной системы с сохранением этнокультурной идентичности способствует этноэкономика, которая является перспективным направлением изучения проблем экономического развития национальных республик с учетом географических, исторических и культурных особенностей этнического сообщества.

Под термином «этноэкономика» понимают науку о взаимодействии культур, традиций, этноса, обычаев, идеологии, религиозных взглядов различных наций и народов с их хозяйственной деятельностью (Клочко, Кобозева, 2017, с. 39). В (Ахметов, Бердникова, Салихова, 2012, с. 83) выделено три главных направления развития этноэкономики:

1) индустриально-этническое (промышленная переработка сельскохозяйственного сырья);

2) традиционно-этническое (развитие народных промыслов и ремесел, сельского хозяйства);

3) рыночно-этническое (развитие этнотуризма).

Республика Тыва (РТ) — один из регионов Российской Федерации, в котором сохранились традиции, самобытная культура коренного населения территории. Основой экономики и традиционной ведущей отраслью материального производства тувинцев является сельское хозяйство и животноводство, а именно скотоводство. Несмотря на процессы интеграции и глобализации мировой экономики, уклад жизни тувинцев, сложившийся с древних времен, в значительной мере определяет предпосылки экономического развития территории. Этноэкономический уклад хозяйствования тувинцев и государственная поддержка населения в виде губернаторских проектов Правительства Республики Тыва («Дук»[1], «Кеш»[2] и др.) создают предпосылки развития в регионе промышленных кластеров этнической направленности.

Животноводство — основная специализация сельскохозяйственной деятельности РТ. Общее поголовье крупного и мелкого рогатого скота на конец 2019 г. составило более 1,3 млн голов (СЕРТ, 2020, с. 251). В то же время 70,9% продукции сельского хозяйства республики производится в личных подсобных и индивидуальных хозяйствах граждан и лишь 12,7% — в сельскохозяйственных организациях (СЕРТ, 2020, с. 244). Таким образом, переработка продуктов животноводства, в том числе производство молочной и мясной продукции, выделка шкур, катание войлока, первичная обработка шерсти и кожи имеют преимущественно кустарные черты и направлены на удовлетворение и обслуживание внутрихозяйственных потребностей населения.

В рамках этноэкономического развития индустриально-этническое производство может стать одним из отправных точек развития региона. Для повышения конкурентоспособности продукции и оптимальной организации производства на региональном уровне целесообразно сформировать в республике промышленные этнокластеры, состоящие из производителей сырья — традиционных этнических хозяйств, центров сбора сырья и предприятий его глубокой переработки. Отраслями промышленной переработки продукции предприятий сельского хозяйства являются пищевая и легкая промышленность. Сохранившиеся опыт и трудовые традиции тувинского народа создают предпосылки для развития консервной промышленности, переработки мяса и молока, обработки шерсти и выделки шкур.

В формировании стоимости конечного продукта немаловажную роль играет географическое расположение промышленных предприятий и складов предприятий относительно своих потребителей и поставщиков, которое в значительной степени влияет на транспортные и общие издержки. К основным факторам, влияющим на выбор места размещения производственных объектов, относятся: близость к трудовым ресурсам; близость к сырьевым ресурсам; близость к потребителям конечной продукции.

Кроме перечисленных факторов, необходимо учитывать наличие и состояние земельных ресурсов, транспортной инфраструктуры, электрических сетей и коммуникаций; фискальную политику государства; социально-экономические показатели рассматриваемой территории и т.д. Принимая во внимание все факторы в совокупности, можно разработать правильное решение — оптимально разместить производственные мощности и склады на рассматриваемой территории. Задаче комплексной оптимизации предшествует определение метода нахождения оптимального расположения объекта, учитывающего такие основные факторы, как расстояния между объектом, поставщиками и потребителями; объемы перевозимых грузов; транспортные тарифы и время доставки грузов от поставщиков на склад и со склада — потребителям.

Методологии моделирования оптимального размещения производства посвящены работы (Хачатуров, 1967; Алейников, 1966; Гранберг, 1970; Алибеков, 1975; и др.). С развитием логистики как науки получили широкое распространение модификации задачи оптимального размещения производства: транспортно-складская, производственно-транспортная, производственно-транспортно-складская задачи, которые относятся к интегрированным моделям логистической системы предприятия и состоят из нескольких подмоделей (Бочкарев, 2009; Модели и методы..., 2012).

В настоящей работе представлена авторская математическая модель оптимальной организации экономического пространства региона, охватывающая производства с традиционным хозяйствованием. Разработанная модель относится к классу интегрированных логистических транспортно-складских задач. Для решения задачи применяется аппарат кластерного анализа. В качестве алгоритма проведения кластерного анализа выбран алгоритм с оптимизацией критерия. Расчеты приводятся на примере организации и развития кластера легкой промышленности Республики Тыва на основе традиционного хозяйствования региона — животноводства.

---

[1] «Обработка овечьей и козьей шерсти» (пер. с тувинского).

[2] «Выделка шкур» (пер. с тувинского).

МЕТОДЫ

В управлении бизнес-процессами большое значение имеют интегрированные математические модели (транспортно-складская модель и производственно-транспортно-складская модель), которые позволяют реализовать принцип глобальной оптимизации. Анализ опубликованных исследований показывает, что для интегрированных моделей, как правило, дается математическая постановка в виде задачи смешанного целочисленного линейного программирования (с целочисленными и булевыми переменными), что может усложнить поиск решения из-за вычислительных проблем. Это и обуславливает актуальность разработки новых альтернативных интегрированных математических моделей оптимизации бизнес-процессов на основе развития классических постановок задач размещения в непрерывном пространстве.

Вопросам построения интегрированных моделей логистических систем посвящены работы исследователей А.А. Бочкарева, В.С. Лукинского (Модели и методы..., 2012), В.И. Сергеева (Сергеев, 2019; Логистика..., 2014), В.В. Дыбской (Дыбская и др., 2014), Дж. Шапиро (Shapiro, 2006) и др. Модели транспортно-складских задач, которые относятся к этому классу моделей, состоят из двух частей — транспортной задачи и задачи определения географических координат расположения складов (или производственных мощностей), в которых оптимизируются транспортные издержки.

Задача определения координат расположения складов (производственных мощностей) на территории рассматриваемой местности (региона, макрорегиона, страны и т.д.) является одной из фундаментальных задач логистики как науки. Исходными данными поставленной задачи служат координаты поставщиков (x_i, y_i), объемы поставляемой (Q_i) и потребляемой (P_j) продукции, а также информация о транспортной инфраструктуре рассматриваемой местности. Решение задачи в непрерывной постановке заключается в определении точной географической локализации склада с координатами (x, y), в которых оптимизируются логистические расходы, представляющие собой сумму произведений расстояния от поставщиков до склада на удельный вес (объем) транспортируемого груза (Монгуш, 2019).

Для регионального размещения производственных объектов и оптимальной организации экономических промышленных этнокластеров авторы предлагают воспользоваться разработанной ими постановкой и подходом к решению транспортно-складской задачи (Богданов, Монгуш, 2018) и производственно-транспортно-складской задачи (Богданов, Монгуш, 2019).

С математической точки зрения транспортно-складская задача практически идентична производственно-транспортной задаче, и обе они являются частным случаем задачи размещения.

При нахождении координат расположения нескольких производственных объектов или складов представляется естественным определить скопления поставщиков сырья и потребителей продукции предприятия (кластеры) и назначить центры обслуживания этих кластеров, что будет способствовать уменьшению стоимости перевозок и, соответственно, увеличению прибыли предприятия. В качестве поставщиков сырья рассматриваются сельскохозяйственные организации, индивидуальные предприниматели и крестьянские хозяйства, объединенные по признаку принадлежности к конкретному муниципальному образованию (району).

Рассмотрим математическую постановку задачи. Введем обозначения: V_i — объем вывозимого сырья от поставщика i ($i = 1, ..., n$); G_k — множество поставщиков для производства k ($k = 1, ..., m$); q_k — объем производства продукции на производстве k; p — цена выпускаемой продукции; AVC — средние переменные издержки на производство единицы выпускаемой продукции; FC_k — постоянные издержки производства k.

Тогда прибыль от реализации продукции (без учета затрат на транспортировку) для производства k составит

$$\Pi_k = (p - AVC)q_k - FC_k, \tag{1}$$

где

$$q_k = \alpha \sum_{i \in G_k} V_i, \tag{2}$$

α — коэффициент, учитывающий нормы расхода сырья на единицу конечного продукта.

Затраты на транспортировку сырья для производства k составят

$$Z_k = C \sum_{i \in G_k} \rho_{ik} V_i, \tag{3}$$

где ρ_{ik} — расстояние от поставщика i до производства k; C — стоимость перевозки единицы веса на единицу расстояния.

Сформулируем критерий оптимизации:

$$\Pi = \sum_{k=1}^{m} (\Pi_k - Z_k) \to \max \text{ —} \tag{4}$$

и преобразуем его к виду

$$\Pi = \sum_{k=1}^{m} \Pi_k - \sum_{k=1}^{m} Z_k. \tag{5}$$

Далее

$$\sum_{k=1}^{m} \Pi_k = \sum_{k=1}^{m} (P - AVC) q_k - \sum_{k=1}^{m} FC_k = (P - AVC) \sum_{k=1}^{m} q_k - \sum_{k=1}^{m} FC_k =$$

$$= (p - AVC)\alpha \sum_{k=1}^{m} \sum_{i \in G_k} V_i - \sum_{k=1}^{m} FC_k = A - m\,FC,$$

где $A = (p - AVC)\alpha \sum_{k=1}^{m} \sum_{i \in G_k} V_i = \text{const}$, а постоянные затраты всех производств будем считать одинаковыми. Таким образом, критерий оптимизации примет вид

$$\Pi = A - mFC - \sum_{k=1}^{m} Z_k \to \max, \tag{6}$$

или

$$Q = \sum_{k=1}^{m} Z_k + mFC \to \min. \tag{7}$$

В задаче ищется оптимальное разделение поставщиков на группы обслуживания производств G_k ($k = 1,..., m$) и координаты места расположения предприятий.

В задаче кластеризации объектов (производителей или потребителей продукции предприятия), как правило, мерой расстояния между объектами является физическое расстояние между ними, определяемое по формуле Евклидова расстояния $\rho_{ik} = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2}$, где x_i, y_i — координаты поставщика i; x, y — координаты размещения производства. Примем допущение, что соотношение расстояния поездки по дорогам и по прямой — одинаково для всех пар пунктов.

При каждом задаваемом числе производственных объектов m задача сводится к оптимизации разделения всех поставщиков сырья на группы обслуживания объектов G_k ($k = 1,..., m$) и отысканию точек их месторасположения.

При некотором текущем разбиении поставщиков на группы обслуживания производственных объектов задача нахождения их оптимального расположения может решаться независимо для всех зон обслуживания, исходя из минимизации суммарных затрат (7).

Рассмотрим задачу минимизации затрат при доставке сырья в производственные объекты (координаты (x, y)) из ряда пунктов с координатами (x_i, y_i) ($i \in G_k$). Задача сводится к минимизации функции $Z_k = C \sum_{i \in G_k} V_i \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2}$ по переменным x и y. А это достигается решением системы уравнений

$$\begin{cases} \dfrac{dZ_k}{dx} = \sum\limits_{i \in G_k} \left\{ V_i \left(x - x_i\right) / \sqrt{\left(x - x_i\right)^2 + \left(y - y_i\right)^2} \right\} = 0; \\ \dfrac{dZ_k}{dy} = \sum\limits_{i \in G_k} \left\{ V_i \left(y - y_i\right) / \sqrt{\left(x - x_i\right)^2 + \left(y - y_i\right)^2} \right\} = 0. \end{cases}$$

Для численного решения систем нелинейных уравнений обычно применяются итерационные методы: метод простой итерации, метод Зейделя, метод Ньютона. Для решения данной системы двух нелинейных уравнений используем метод Ньютона. Этот алгоритм для системы двух уравнений с двумя неизвестными применительно к задаче нахождения оптимального места расположения склада приведен в (Баисов, Никитина, Богданов, 2017).

При нахождении координат расположения нескольких производственных объектов под разделением потребителей на зоны обслуживания заданного m числа объектов понимают отыскание такого набора подмножеств G_1, ..., G_m натурального ряда чисел 1,..., n, что $\bigcup_{j=1}^{m} = \{1, \ldots, n\}$, а $G_j \bigcap G_q = 0$ при $j \neq q$. Минимизация критерия качества кластеризации (как по разделению поставщиков сырья на группы обслуживания производственного объекта, так и по выбору места расположения производственных объектов) отвечает требованиям такого разбиения поставщиков, когда в одной

группе оказываются наиболее близкие между собой поставщики сырья. В качестве координат производственных объектов выбираются такие, которые минимизируют суммарные затраты на перевозки в зоне их обслуживания.

Считая известными координаты производственных объектов, нетрудно провести разделение G_1, ..., G_m, минимизирующее критерий качества кластеризации, при фиксированных координатах объектов, а именно $G_i = \{i : \rho_{il} \le \rho_{iq} \ \ \forall q = 1, \ldots, m\}$ (Проценко, Проценко, 2012).

Для одновременного нахождения оптимального разделения G_1, ..., G_m и оптимального набора координат производственных объектов предлагается итерационный алгоритм, последовательно осуществляющий выбор оптимальных (по отношению к разделению, полученному на предыдущем шаге) координат объектов, а затем оптимального разбиения для полученных на предыдущем шаге координат объектов.

Предложенный алгоритм по существу является некоторой модификацией алгоритмов кластерного анализа с оптимизацией критерия, в качестве которого вместо обычной суммы внутриклассовых дисперсий или суммы попарных внутриклассовых расстояний используется показатель минимизации затрат.

Как и все алгоритмы кластерного анализа с оптимизацией критерия, используемый алгоритм не гарантирует сходимости именно к глобальному экстремуму. Чтобы снизить вероятность сходимости к локальному минимуму, можно действовать двумя способами: 1) многократно генерировать случайным образом начальное разделение объектов на кластеры; 2) в качестве начального разделения принять результат, полученный классическим алгоритмом кластерного анализа агломеративного типа, который скорее всего будет близок к оптимальному.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

Этноэкономические кластеры легкой промышленности Республики Тыва

Деловая активность Республики Тыва, как правило, сконцентрирована преимущественно в столице региона — г. Кызыл, где расположено около 54% предприятий республики. Здесь же осуществляется прием сельскохозяйственного сырья для дальнейшей переработки на предприятиях республики и других регионов. Для фермеров отдаленных районов (например, Овюрского, Сут-Хольского, Бай-Тайгинского, Монгун-Тайгинского и др.) перевозка в г. Кызыл сопряжена с дополнительными высокими расходами на транспортировку. Эти расходы не всегда оправданы. Поэтому владельцам небольших хозяйств невыгодно возить в столицу свою продукцию. Зачастую они избавляются от шкур и шерсти, если сами их не перерабатывают. Поэтому организация пунктов сбора сельскохозяйственного сырья в районных центрах может снизить стоимость сырья для производства конечного продукта.

Формирование и развитие этнокластеров легкой промышленности в Республике Тыва связаны с переработкой продукции ведущей отрасли экономики республики — сельского хозяйства (производства шерсти и шкур). Так как в республике не развита дорожная инфраструктура и транспортные услуги, мы предлагаем организовать *пункты первичного сбора и переработки шерсти и шкуры* в административных центрах каждого муниципального образования Тывы (районных центрах). Эти центры связаны развитой дорожной сетью регионального и федерального значения с более крупными административными центрами и городами. Для кластеризации муниципальных образований РТ и формирования этноэкономических транспортно-логистических кластеров в таблице приведены географические координаты районных центров Тывы, которые могут служить центрами сбора сельскохозяйственного сырья у организаций, крестьянских хозяйств, населения, а также производства шерсти в этих районах.

Для решения оптимизационной задачи с помощью компьютерной программы EXCEL и языка программирования VBA проведены расчеты по кластеризации муниципальных районов РТ.

Если планируется создать только один пункт приема и переработки, то его целесообразно разместить в точке с координатами (92,65; 51,05). При этом суммарный пробег машин составит 2281,91 т×км, а затраты на транспортировку (при характерном для РТ тарифе $C = 25$ руб./т×км) — 57,05 тыс. руб. Общие затраты с учетом $FC = 18$ тыс. руб. составят 75,05 тыс. руб.

Для двух пунктов приема и переработки необходимо разделить все районные центры на две группы обслуживания (два кластера). Первоначальное разделение было получено с помощью классического алгоритма кластерного анализа агломеративного типа (имеющаяся в свободном доступе в Интернете программа реализует принцип «дальнего соседа»). В первый кластер попали девять объектов с номерами 1, 2, 3, 6, 7, 9, 14, 15, 19, во второй — десять объектов с номерами 4, 5, 8, 10, 11, 12, 13, 16, 17, 18 (рис. 1).

Таблица. Географические координаты районных центров Республики Тыва* и производство шерсти (Социально-экономические показатели..., 2021)

№ п/п	Муниципальный район (кожуун)	Районный центр	Координаты районных центров		Производство шерсти в год, т
			X	*Y*	
Муниципальные районы					
1	Бай-Тайгинский	с. Тээли	90,2090	51,0149	152
2	Барун-Хемчикский	с. Кызыл-Мажалык	90,5704	51,1431	80
3	Дзун-Хемчикский	г. Чадан	91,5659	51,2845	117
4	Каа-Хемский	с. Сарыг — Сеп	95,5564	51,4943	21
5	Кызылский	п. Каа-Хем	94,5742	51,6995	127
6	Монгун-Тайгинский	с. Мугур — Аксы	90,4445	50,3786	76
7	Овюрский	с. Хандагайты	92,0685	50,7310	131
8	Пий-Хемский	г. Туран	93,9161	52,1473	34
9	Сут-Холский	с. Суг — Аксы	91,2891	51,4111	108
10	Тандинский	с. Бай-Хаак	94,4630	51,1661	35
11	Тере-Холский	с. Кунгуртуг	97,5214	50,5953	3
12	Тес-Хемский	с. Самагалтай	95,0081	50,6123	75
13	Тоджинский	с. Тоора — Хем	96,1273	52,4668	1
14	Улуг-Хемский	г. Шагонар	92,9111	51,5104	63
15	Чаа-Холский	с. Чаа — Хол	92,3636	51,5242	32
16	Чеди-Холский	с. Хову — Аксы	93,6763	51,1275	40
17	Эрзинский	с. Эрзин	95,1625	50,2589	168
Городские округа					
18	г. Кызыл		94,4454	51,7239	2
19	г. Ак-Довурак		90,5926	51,1741	11
				ИТОГО	**1276**

* Переведены из системы градусы/секунды/минуты.

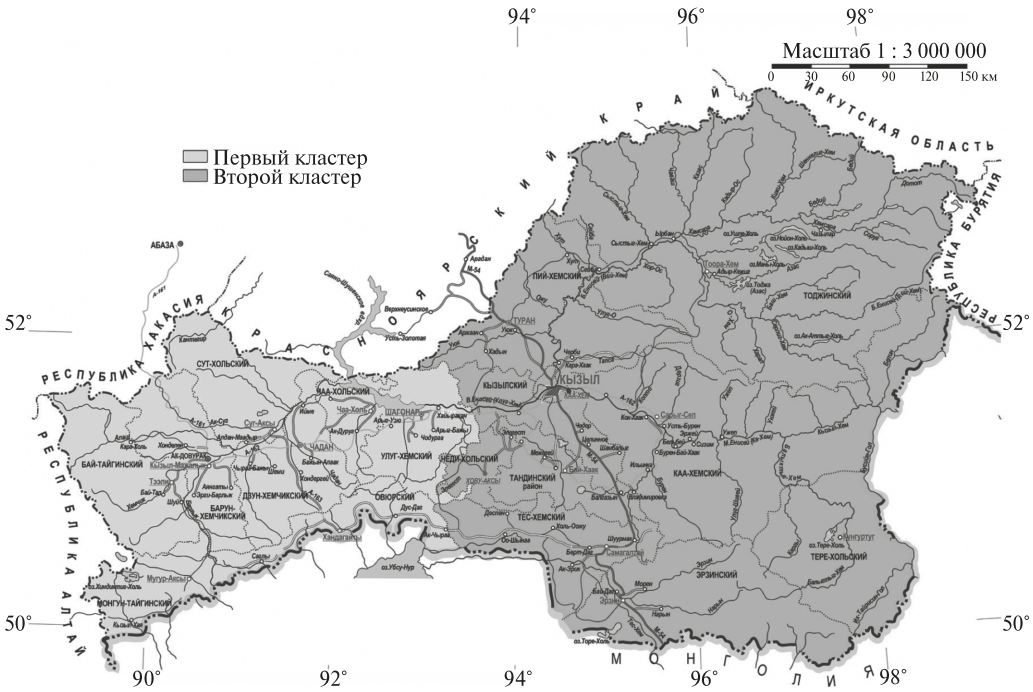


Рис. 1. Первоначальное разбиение на кластеры

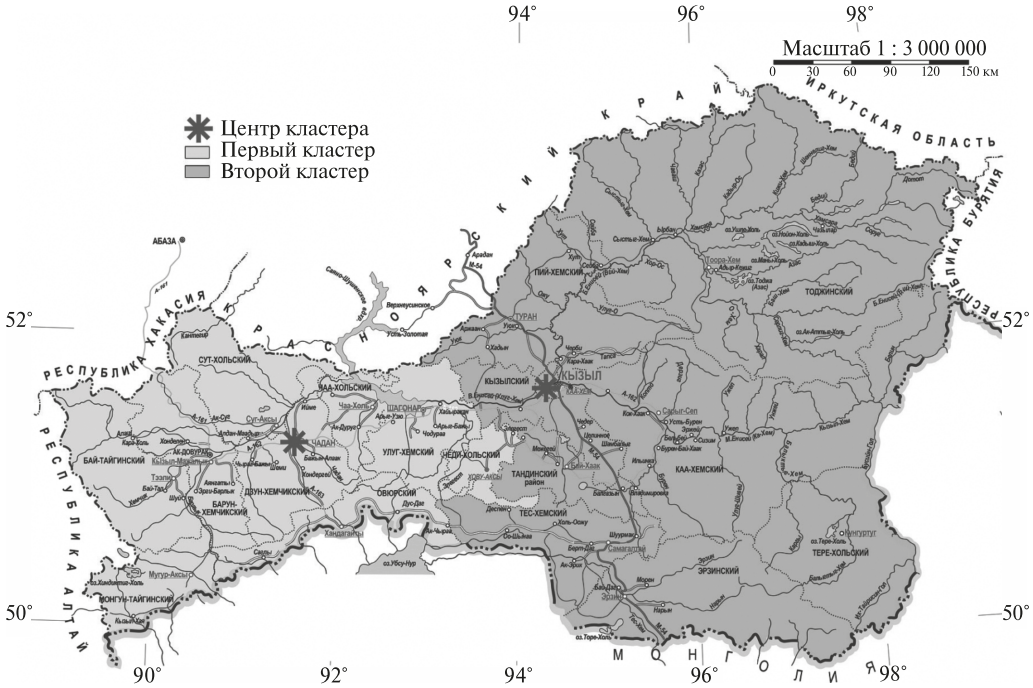


Рис. 2. Этноэкономические кластеры Республики Тыва

После первого шага итерационного алгоритма получаем оптимальное решение, в котором объект № 15 перенесен из первого кластера во второй. Оптимальные координаты расположения для первого предприятия (91,34; 51,10), для второго — (94,18; 50,98). При этом суммарный пробег машин составил 1464,74 т × км, а затраты на транспортировку — 36,62 тыс. руб. Общие затраты с учетом постоянных издержек двух предприятий $2FC = 36$ тыс. руб. составят 72,62 тыс. руб.

При разделении на три кластера — с оптимальными координатами (91,05; 51,01), (92,42; 51,42), (94,98; 50,72) — суммарный пробег машин еще больше снизился и составляет 917,76 т × км, а затраты на транспортировку — 22,94 тыс. руб. Однако общие затраты с учетом постоянных издержек трех предприятий $3FC$ возрастают и составят 76,94 тыс. руб.

Таким образом, оптимальным оказался вариант с двумя производствами (кластерами).

В результате анализа получено следующее деление районов (кожуунов) республики на два кластера поставщиков сырья для производства готовой продукции и рассчитаны координаты центров кластеров — географические координаты оптимального расположения производственных объектов (фабрики, комбината, цеха) глубокой переработки сырья сельхозпроизводителей (рис. 2):

– **I кластер** состоит из семи кожуунов (Бай-Тайгинский, Барун-Хемчикский, Дзун-Хемчикский, Монгун-Тайгинский, Овюрский, Сут-Холский, Улуг-Хемский и г. Ак-Довурак) с центром в точке с координатами (91,34; 51,10), округленными до координат г. Чадаан. В данный кластер вошли западные районы республики с наиболее развитым сельским хозяйством. Объем производства предприятий сельского хозяйства полученного макрорайона, а именно животноводства, составил в 2019 г. 51,2% общего объема региона (Социально-экономические показатели..., 2020, с. 88);

– **II кластер** состоит из десяти кожуунов (Каа-Хемский, Кызылский, Пий-Хемский, Тандинский, Тере-Холский, Тес-Хемский, Тоджинский, Чаа-Холский, Чеди-Холский, Эрзинский и г. Кызыл). Центр кластера приходится на точку с координатами (94,18; 50,98). Так как производство трудно организовать где-то в лесу, вдали от электрических, транспортных и прочих коммуникаций, мы округлили координаты до точки расположения ближайшего населенного пункта — г. Кызыл. Суммарное поголовье овец и коз в полученном кластере составляет 432 873 головы, что составляет 36% их общего числа (Социально-экономические показатели..., 2020, с. 82). Данный макрорайон объединил наиболее развитые промышленные районы республики.

Решение задачи кластеризации разделило районы Республики Тыва на этнокластеры, образованные по критерию близости к полученным центрам кластеров. Важно, что у всех районных центров имеется транспортное сообщение с полученными в результате расчетов точками центров кластеров.

При организации производства в трех и более точках в результате расчетов получено разделение предприятий на зоны обслуживания, которое несколько снижает транспортные затраты, но увеличивает при этом затраты на эксплуатацию производственных помещений и общие затраты. Таким образом, в результате расчетов рассмотренный вариант с двумя кластерами является оптимальным.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Самобытная культура тувинцев, сохранившаяся до сегодняшнего дня, может стать одним из потенциальных точек роста экономики Республики Тыва. Однако формирование случайных очагов обрабатывающего производства, основанных на традиционных технологиях, в современных реалиях может в основном удовлетворить внутренние потребности хозяйств, подвержено высокому риску, и не всегда полученная продукция является конкурентоспособной. Учитывая традиционные виды хозяйствования коренного населения, географические особенности территории, целесообразно применение кластерного подхода и оптимизационных моделей к организации промышленного производства с применением современных технологий переработки продукции сельхозпроизводителей. Данный подход стимулирует дальнейшее развитие сельского хозяйства республики, развитие этнокластеров перерабатывающих производств, производства конкурентоспособной продукции с высокой добавленной стоимостью, а также сохранение уникальной культуры и традиций тувинского народа.

С помощью предложенной математической модели получено подтверждение целесообразности решения Правительства Республики Тыва организовать промышленные объекты в городах Кызыл и Чадаан и образовать кластеры с центрами в соответствующих городах, которые являются точками пересечения автомобильных дорог нескольких районов. Это свидетельствует о полезности разработанной модели и выбранного авторами алгоритма решения производственно-транспортной задачи.

В качестве дальнейшего развития работы предполагается разработать полностью дискретную модель с булевыми переменными и матрицей реальных расстояний между пунктами по существующей системе дорог и сравнить результаты, полученные разными моделями на задачах не очень высокой размерности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

Алейников Б.И. (1966). Задача оптимального размещения производства продукции одного типа // *Экономика и математические методы*. Вып. 2. Т. 2. С. 272–282. [**Alejnikov B.I.** (1966). The problem of optimal allocation of production of one type of product. *Economics and Mathematical Methods,* 2, 2, 272–282 (in Russian).]

Алибеков Б.И. (1975). О задаче на размещение с ограниченными мощностями // *Экономика и математические методы*. Т. 11. Вып. 3. С. 534–541. [**Alibekov B.I.** (1975). About the placement problem with limited capacity. *Economics and Mathematical Methods,* 11, 3, 534–541 (in Russian).]

Ахметов В.Я., Бердникова Г.И., Салихова З.М. (2012). Этноэкономика и ее роль в устойчивом развитии сельских территорий России // *Экономика сельского хозяйства России*. № 2. С. 78–86. [**Ahmetov V.YA., Berdnikova G.I., Salihova Z.M.** (2012). Ethnoeconomics and its role in the sustainable development of rural areas of Russia. *Economics of Agriculture of Russia*, 2, 78–86 (in Russian).]

Баисов И.М., Никитина Л.Н., Богданов А.И. (2017). Оптимизация места размещения склада торгового предприятия // *Вестник СПГУТД. Серия 1. Естественные и технические науки*. № 2. С. 91–93. [**Baisov I.M., Nikitina L.N., Bogdanov A.I.** (2017). Optimizing the location of the trading company's warehouse. *Vestnik of St. Petersburg State University of Technology and Design. Series 1. Natural and Technical Science*, 2, 91–93 (in Russian).]

Богданов А.И., Монгуш Б.С. (2018). Оптимизация места расположения складов с помощью кластерного анализа // Вестник СПГУТД. Серия 1. Естественные и технические науки. № 4. С. 19–23. [**Bogdanov A.I., Mongush B.S.** (2018). Optimizing warehouse locations with cluster analysis. *Vestnik of St. Petersburg State University of Technology and Design. Series 1. Natural and Technical Science*, 4, 19–23 (in Russian).]

Богданов А.И., Монгуш Б.С. (2019). Математические модели оптимизации производственно-транспортно-складских процессов // *Вестник СПГУТД. Серия 1. Естественные и технические науки*. № 1. С. 16–20.

[**Bogdanov A.I., Mongush B.S.** (2019). Mathematical models for optimizing production and transport-warehouse processes. *Vestnik of St. Petersburg State University of Technology and Design. Series 1. Natural and Technical Science*, 1, 16–20 (in Russian).]

Бочкарев А.А. (2009). Теория и методология процессного подхода к моделированию и интегрированному планированию цепи поставок: автореф. ... дис.д.э.н. СПб. 39 с. [**Bochkarev A.A.** (2009). Theory and methodology of the process approach to modeling and integrated supply chain planning. (Doct. Sc. dissert.). Saint Petersburg. 39 p. (in Russian).]

Гранберг А.Г. (1970). Многоотраслевая модель оптимального развития и размещения производства в планово-экономических расчетах // *Экономика и математические методы*. Т. 6. Вып. 3. С. 393–406. [**Granberg A.G.** (1970). Multisectoral model of optimal development and allocation of production in planning and economic calculations. *Economics and Mathematical Methods*, 6, 3, 393–406 (in Russian).]

Дыбская В.В., Зайцев Е.И., Сергеев В.И., Стерлигова А.Н. (2014). Логистика. Интеграция и оптимизация логистических бизнес-процессов в цепях поставок. Учебник MBA. В.И. Сергеев (ред.). М.: Эксмо. [**Dybskaja V.V., Zaitsev E.I., Sergeev V.I., Sterligova A.N.** (2014). Logistics. Integration and optimization of logistics business processes in supply chains. V.I. Sergeev (Ed.). Moscow: Eksmo (in Russian).]

Клочко Е.Н., Кобозева Е.М. (2017). Этноэкономика региона: потенциал, функции, барьеры развития // *Бизнес. Образование. Право.* № 4. С. 38–42. [**Klochko E.N., Kobozeva E.M.** (2017). Ethnoeconomics of the region: potential, functions, barriers to development. *Business. Education. Law*, 4, 38–42 (in Russian).]

Модели и методы теории логистики (2012). Лукинский В.С. (ред.). Санкт-Петербург: Питер. [*Models and methods of logistics theory* (2012). V.S. Lukinskii (Ed.). Saint Petersburg: Piter (in Russian).]

Монгуш Б.С. (2019). Проблемы решения интегрированных транспортно-складских задач. В сб.: Региональная экономика: технологии, экономика, экология и инфраструктура: материалы III Международной научно-практической конференции (23–25 октября 2019 г.). Кызыл: ТувИКОПР СО РАН. С. 369–372. [**Mongush B.S.** (2019). Problems of solving integrated transport and warehousing tasks. In: *Regional Economy: Technology, Economics, Ecology and Infrastructure: Proceedings of the III International Scientific and Practical Conference (23–25 oct. 2019)*. Kyzyl: Tuvinian Institute for Exploration of Natural Resources of Siberian Branch of the Russian Academy of Science, 369–372 (in Russian).]

Проценко О.Д., Проценко И.О. (2012). Логистика и управление цепями поставок — взгляд в будущее: макроэкономический аспект. М.: Дело. [**Procenko O.D., Procenko I.O.** (2012). *Logistics and Supply Chain Management — a look into the future: a macroeconomic perspective*. Moscow: Delo (in Russian).]

Сергеев В.И. (2019). Логистика и управление цепями поставок: профессия XXI века. Аналитический обзор. Москва: Издательский дом Высшей школы экономики. [**Sergeev V.I.** (2019). *Logistics and supply chain management: XXI century profession. Analytical review*. Moscow: NRU HSE (in Russian).]

СЕРТ (2020). Статистический ежегодник Республики Тыва. 2020 г. Статистический сборник. Кызыл: Красноярскстат. [*Statistical Yearbook of the Tyva Republic. 2020* (2020). Statistical collection. Kyzyl: Krasnoyarskstat. (in Russian).]

Социально-экономические показатели городских округов и муниципальных образований Республики Тыва. 2020 г. (2020). Статистический сборник. Кызыл: Красноярскстат. [*Socio-economic indicators of urban districts and municipalities of the Tyva Republic. 2020* (2020). Statistical collection. Kyzyl: Krasnoyarskstat. (in Russian).]

Социально-экономические показатели городских округов и муниципальных образований Республики Тыва. 2021 г. (2021). Статистический сборник. Кызыл: Красноярскстат. [*Socio-economic indicators of urban districts and municipalities of the Tyva Republic. 2021* (2021). Statistical collection. Kyzyl: Krasnoyarskstat. (in Russian).]

Хачатуров В.Р. (1967). Алгоритмы и программы решения задач размещения предприятий с неограниченными объемами производства // *Экономика и математические методы*. Т. 3. Вып. 2. С. 240–251. [**Khachaturov V.R.** (1967). Algorithms and programs for solving problems of enterprise location with unlimited production volumes. *Economics and Mathematical Methods*, 3, 2, 240–251(in Russian).]

Shapiro J.F. (2006). *Modeling the supply chain.* Boston: Cengage Learning.

Logistics approach to organizing ethno-economic industrial clusters (case of the Tuva Republic)

© 2022 B.S. Mongush, A.I. Bogdanov, S.A. Chupikova

B.S. Mongush,
Tuvinian Institute for Exploration of Natural Resources, the Siberian Branch of RAS, Kyzyl, Russia; e-mail: bbb16@mail.ru

A.I. Bogdanov,
St. Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, St. Petersburg, Russia; e-mail: abogd1@rambler.ru

S.A. Chupikova,
Tuvinian Institute for Exploration of Natural Resources, the Siberian Branch of RAS, Kyzyl, Russia; e-mail: s_fom@inbox.ru

Received 15.12.2021

Abstract. One of the main branches of economy in the Tuva Republic is cattle breeding which has developed historically on the basis of Tuva's geographical position, climate and environmental conditions and centuries-old experience of Tuvinian population. Ethno-economic custom of Tuvinian people together with the governmental support lay the ground for the development of such regional industrial clusters as the "DUK" project (processing of sheep wool and goat hair) and the "KESH" project (currying of animal skins). In order to increase marketability and promote industrial development on the whole, it seems reasonable to organize groups of manufacturing clusters in the region, which would unite factories dealing with processing of raw materials supplied by the traditional ethnic households. The aim of this work is to define optimal geographical coordinates for manufacturing facilities taking into account the location of raw material suppliers, to the effect of minimizing transportation costs. The authors suggest a mathematic model of optimal economic space layout on the basis of the development of traditional industrial system. Cluster analysis apparatus was used as well as logistic approach to formation of production and distribution network taking into account the existing transport infrastructure. Calculations were made using the example of organization and development of Tuvinian light industry cluster based on traditional branch of economy for this region, sheep breeding.

Keywords: ethno-economics; agro-processing; industrial development; mathematical model; optimization; ethno-cluster; the shortest path problem; Tuva Republic.

JEL Classification: C6, R3.

For reference: **Mongush B.S., Bogdanov A.I., Chupikova S.A.** (2022). Logistics approach to organizing ethno-economic industrial clusters (case of the Tuva Republic). *Economics and Mathematical Methods*, 58, 2, 54–63. DOI: 10.31857/S042473880019186-3

ЭКОНОМИКА И МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ, 2022, том 58, № 2, с. 64–79

МАТЕМАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЭКОНОМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

Прогнозирование динамики распространения анемии в регионах России на базе агент-ориентированной модели

© 2022 г. А.Л. Машкова, Н. Дукхи, Р. Каур, И.В. Неволин

А.Л. Машкова,
Орловский государственный университет им. И.С. Тургенева, Орел; ЦЭМИ РАН, Москва; e-mail: aleks.savina@gmail.com

Н. Дукхи,
Совет по исследованиям в области гуманитарных наук, ЮАР; e-mail: doctordukhi@gmail.com

Р. Каур,
Центральная организация по научным приборам, Академия научных и инновационных исследований, Индия; e-mail: kaur@list.ru

И.В. Неволин,
ЦЭМИ РАН, Москва; e-mail: jolutre@mail.ru

Поступила в редакцию 25.01.2022

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, Департамента Министерства науки и технологий Индии и Национального исследовательского фонда ЮАР (проект 19-57-80003).

Аннотация. В статье раскрываются вопросы разработки агент-ориентированной модели динамики распространения анемии в России. Представлена структура, которая включает агентов-жителей, производителей продуктов питания и торговых агентов. Для каждого действующего субъекта в модели разработаны алгоритмы, определяющие их взаимодействия друг с другом. Для производителей продуктов питания моделируются их закупки, продажи, производственный процесс и динамика инвестиций в основные средства. Для торговых агентов — формирование ассортимента и цены продукции с учетом транспортных и торговых наценок, а для домохозяйств — питание исходя из их доходов, состава и привычек. В зависимости от качества получаемого питания и текущей стадии анемии моделируется ожидаемая динамика заболевания. В статье рассмотрены вопросы программной реализации и информационного наполнения модели, представлен пользовательский интерфейс. Формализованы четыре сценария динамики социально-экономической среды модели, учитывающие эпидемиологические и внешнеэкономические риски, в том числе сценарий «торговая война», учитывающий повышенные инфляционные риски в отношении продуктов питания. Проведена серия расчетов для прогнозирования динамики распространения анемии в условиях разработанных сценариев. Предложена программа субсидирования малообеспеченных семей и исследовано ее влияние на доступность сбалансированного питания и заболеваемость анемией среди жителей России. Проведенные расчеты показывают, что при отсутствии специальных мер поддержки сбалансированный рацион питания становится доступен меньшему количеству жителей (65% по сравнению с 78% в 2019 г.) в условиях наиболее вероятного на данный момент сценария «торговая война». При этом общая сумма субсидий, требуемых для обеспечения малообеспеченных семей качественным питанием, варьируется от 300 млрд до 1 трлн руб. в год в зависимости от размеров выделяемых пособий.

Ключевые слова: агентное моделирование, анемия, питание, рекомендуемая норма потребления.

Классификация JEL: I15.

Для цитирования: **Машкова А.Л., Дукхи Н., Каур Р., Неволин И.В.** (2022). Прогнозирование динамики распространения анемии в регионах России на базе агент-ориентированной модели // *Экономика и математические методы*. Т. 58. № 2. С. 64–79. DOI: 10.31857/S042473880018351-5

ВВЕДЕНИЕ

По данным Всемирной организации здравоохранения (World Health Organization..., 2019), во всем мире анемия является распространенным заболеванием, которое затрагивает как развитые, так и развивающиеся страны. Причины анемии варьируют в зависимости от географического положения государства, пола и возраста его жителей. При этом железодефицитная анемия, обусловленная низким качеством питания, остается основной глобальной причиной анемии (Thejpal, 2015). Экспериментальные и эпидемиологические данные свидетельствуют о том, что нарушения могут быть обратимыми благодаря правильно выбранным мерам, предпринятым системой здравоохранения. Эти меры должны включать наполнение рациона питания продуктами, богатыми микро- и макроэлементами и витаминами, и обогащение основных продуктов питания микроэлементами и биодобавками (DeMaeyer et al., 2019).

Особенно актуальной задача реализации сбалансированной продовольственной политики становится в условиях роста цен на продукты питания и снижения доходов населения в период пандемии COVID-19, причем направлениями такой политики могут быть государственное регулирование цен, различного вида субсидии населению, инвестиционная поддержка и налоговые льготы для отечественных производителей, а также обновление стандартов здорового питания и информирование о них населения. Анализ всего многообразия параметров политики и ее возможных последствий является сложной задачей, для решения которой необходимо применять современные инструменты, в частности информационные системы для предсказаний последствий политических решений (Tracy, Cerdá, Keyes, 2018).

Целью нашего исследования, реализуемого международным коллективом специалистов из России, Индии и Южно-Африканской Республики, является создание инструментария для прогнозирования распространенности анемии в странах БРИКС, основанного на методах агентного моделирования. Основываясь на взаимодействии различных индикаторов риска на микроуровне, данный метод поможет разработать подходящие стратегии вмешательства для сокращения анемии среди уязвимой части населения. Задачи исследования включают разработку структуры и алгоритмов агент-ориентированной модели, ее программную реализацию и информационное наполнение, а также проведение сценарных расчетов, учитывающих эпидемиологические и внешнеэкономические риски.

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

За последние 40 лет агент-ориентированное моделирование (АОМ) становится все более популярным подходом для изучения социальных систем. В то время как использование АОМ в сфере здравоохранения находится в зачаточном состоянии, уже разработаны модели в таких разных областях, как эпидемиология, незаконный оборот лекарственных средств и физическая активность. В государственном здравоохранении моделирование на основе агентов исторически использовалось почти исключительно для моделирования передачи инфекционных заболеваний и борьбы с ними (Epstein, 2009). АОМ являются естественным подходом для моделирования передачи инфекционных заболеваний, потому что взаимодействия между индивидуумами и влияние окружающей среды часто приводят к популяционным моделям заболеваемости.

Что касается вопросов политики, можно отметить модели, которые исследуют распространение информации и эффективность профилактических мер (Barbrook-Johnson, Badham, Gilbert, 2016) или систем питания (Li, Zhang, Pagán, 2016). В (Barbrook-Johnson et al., 2016) описана АОМ, в которой агенты (люди) реагировали на коммуникационные сообщения в соответствии с их собственным отношением, другими соответствующими параметрами. Связь между агентами осуществляется в виде набора «сообщений». Каждое сообщение состоит из заранее определенных вариантов выбора в течение промежутка времени (например, каждые 10 дней), нацеленностью на аудиторию (медиаканал и группа населения) и контентом. Агенты отвечают на полученные сообщения в соответствии с содержанием сообщения, которое может принимать следующие значения: описание преимуществ; предоставление информации об эпидемическом статусе, акцентирование норм. Таким образом, сообщение влияет на принятие решения и выбор поведения, изменяя факторы принятия решения. Анализируя поведение потребителя и конкуренцию за его внимание, можно также использовать АОМ. В случае с питанием поведение может заключаться в выборе между здоровой и нездоровой пищей, а также предпочтением продукции определенного производителя. Так, в (Lamjed, Drogoul, Bouron, 2001) представлена агент-ориентированная модель поведения

потребителей на конкурентном рынке. Модель включает виртуальное население, которое принимает решения о покупке, выбирая между несколькими брендами.

В (Li et al., 2016) авторы исследуют, может ли гипотетическая кампания в средствах массовой информации и просвещения по вопросам питания привести к увеличению потребления фруктов и овощей в Нью-Йорке. Предыдущие исследования показали, что такие факторы, как социальный статус, благосостояние, местные пищевые привычки и социальные факторы (например, социальные нормы), напрямую связаны с потреблением фруктов и овощей (Glanz et al., 2005; Rose, Richards, 2004). Традиционные статистические модели имеют ограниченную способность прогнозировать пищевое поведение, потому что они не в полной мере отражают сложные взаимодействия между людьми и распространяются только на эффекты, вызванные этими взаимодействиями. Для решения комплексных проблем в исследованиях используют агент-ориентированную модель, которая учитывает индивидуальные факторы (например, возраст, пол, образование, пищевая среда) и их соседство с другими агентами, их взаимодействие для прогнозирования пищевых пристрастий на замкнутой территории.

Отличием разработанной модели от известных аналогов является, во-первых, ее специализация на оценке распространения хронического заболевания (анемии); во-вторых, учет при этой оценке различных аспектов производства, торговли и потребления продуктов питания и влияния пищевых привычек на развитие анемии; в-третьих, интеграция агентов в развитую социально-экономическую среду модели, включающую занятость, доходы, бюджетную систему, что позволяет учитывать большое число факторов при построении прогноза и моделировать последствия различных политических решений в части продовольственной политики.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Структура модели

В основе агент-ориентированной модели динамики распространения анемии лежит искусственное общество, отражающее половозрастной состав и состояние здоровья населения в регионах России. В модели отражаются основные демографические процессы: взросление, рождение и смерть агентов, а также браки и разводы, влияющие на состав домохозяйств (Новикова и др., 2019).

Экономическая среда модели включает организации различных отраслей экономики, занятость в которых обеспечивает доходы населения (рис. 1). Организации отраслей сельского хозяйства, рыбоводства и пищевой промышленности являются частью экономической среды

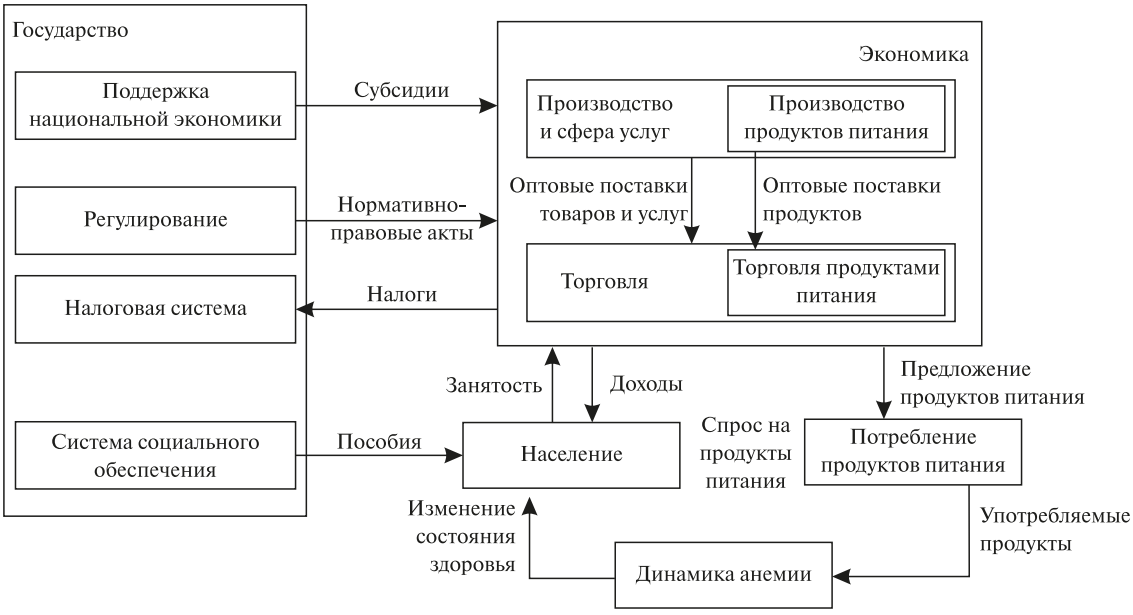


Рис. 1. Структура агент-ориентированной модели динамики распространения анемии

и одновременно — действующими субъектами модели, непосредственно участвующими в обеспечении населения продуктами питания. Аналогично среди организаций отрасли торговли выделяются организации, осуществляющие торговлю продуктами питания.

Агенты-жители формируют спрос на продукты питания в зависимости от своих доходов и пищевых привычек. Выбранный рацион питания влияет на здоровье населения, в частности на заболеваемость анемией.

Государство в модели является активным участником социально-экономических процессов, действуя через каналы инвестиционной и налоговой системы, системы социального обеспечения, а также регулируя деятельность хозяйствующих субъектов нормативно-правовыми актами. Альтернативные варианты политических решений формируют наборы управляющих воздействий, которые подаются на вход модели динамики распространения анемии. Оценка их влияния на здоровье населения производится с учетом исходного состояния объектов, а также потенциально возможных сценариев внешней среды, которые могут учитывать эпидемиологические риски, международную торговлю и курсы валют.

Далее будут рассмотрены алгоритмы базовых процессов в агент-ориентированной модели динамики распространения анемии.

Производство продуктов питания

Производители продуктов питания в модели A характеризуются пятью параметрами:

$$A = \langle P, Z, S, I, M \rangle, \tag{1}$$

где P — производство; Z — закупки; S — продажи; I — инвестиции; M — маркетинг.

Производство P задается через объем выпуска V, ассортимент выпуска PA_j и производственную задержку PT_j для каждого вида продукции j:

$$P = \left\langle V, \bigcup_{j=1}^{m} PA_j, \bigcup_{j=1}^{m} PT_j \right\rangle. \tag{2}$$

Ассортимент выпуска и производственная задержка определяются отраслью, которой принадлежит организация-производитель. Производство продуктов питания в России согласно действующей классификации видов экономической деятельности ведется в рамках трех отраслей: «01. Растениеводство и животноводство, охота и предоставление соответствующих услуг в этих областях»; «03. Рыболовство и рыбоводство»; «10. Производство пищевых продуктов». Наибольшая производственная задержка будет в растениеводстве (в особенности при выращивании в открытом грунте), наименьшая — в производстве пищевых продуктов.

Закупки Z включают ассортимент закупок ZA и долю импорта в закупках для каждого вида сырья i:

$$Z = \left\langle \bigcup_{i=1}^{n} ZA_i, \bigcup_{i=1}^{n} PT_i \right\rangle. \tag{3}$$

Ассортимент закупок определяется степенью обработки продукции в отрасли: в промышленном производстве продуктов питания производится закупка всего исходного сырья, в сельском хозяйстве и рыбоводстве — лишь вспомогательных веществ (удобрений и кормов).

Продажи S характеризуются оптовой ценой SP_j и долей экспорта SE_j для каждого вида продукции j:

$$S = \left\langle \bigcup_{j=1}^{m} SP_j, \bigcup_{j=1}^{m} SE_j \right\rangle. \tag{4}$$

Инвестиции I определяются прибылью PR, собственными инвестициями OI и государственными субсидиями SI:

$$I = \langle PR, OI, SI \rangle. \tag{5}$$

Маркетинг M включает целевые группы покупателей B и теги T, задающие позиционирование продукта на рынке:

$$M = \langle B, T \rangle. \tag{6}$$

Основными категориями покупателей являются иностранные организации, отечественные организации-производители и торговые агенты, выступающие посредниками при продаже конечной продукции домохозяйствам.

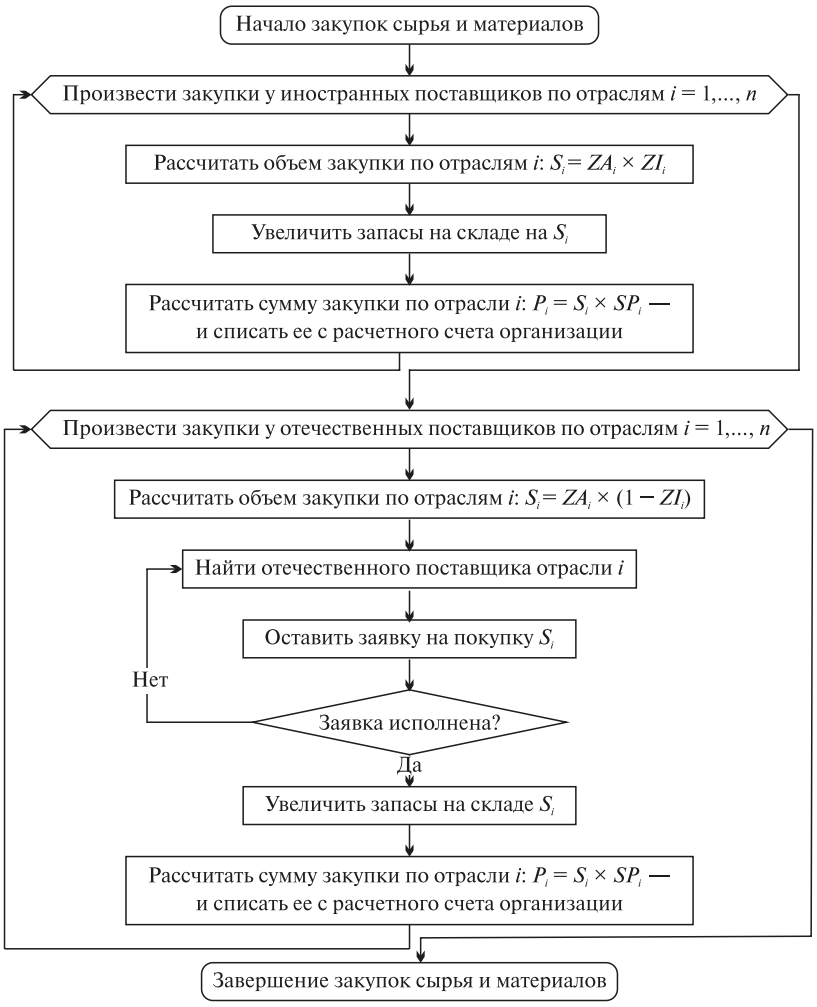


Рис. 2. Схема закупки сырья и материалов

Маркетинговая политика организации в модели задается с помощью связанных с ним атрибутов: «здоровое питание», «лучшая цена», «быстрое питание», «натуральный продукт», «элитный продукт». Атрибуты соотносятся с целевыми шаблонами потребления домохозяйств, определяя позиционирование продукта на рынке. Так, со сбалансированным шаблоном связаны атрибуты «здоровое питание» и «натуральный продукт», с минимальным уровнем потребления — «лучшая цена».

Компоненты модели производителя реализуются в рамках производственно-финансового цикла организации, который представляет собой итеративное повторение закупок сырья и материалов, производства и продажи готовой продукции, а также инвестирования в расширение производственных мощностей. Рассмотрим подробнее каждый шаг.

Закупка сырья и материалов (рис. 2) осуществляется сначала у иностранных поставщиков в соответствии с долями импорта ZA_i в каждом виде сырья i. Такой порядок действий в алгоритме связан с допущением, что запасы сырья у иностранных поставщиков считаем неограниченными. Для отечественных поставщиков рассчитывается необходимый объем закупки каждого вида сырья i и формируется заявка, которую рассматривает поставщик и выполняет, если имеет достаточно продукции на складе. В ином случае подбирается следующий поставщик, и процесс повторяется. При совершении закупки увеличивается запас сырья на складе и списывается сумма поставки с расчетного счета организации.

Производство продукции включает списание сырья со склада, моделирование производственной задержки PT_j и увеличение запасов продукции на складе через соответствующий промежуток времени.

Рис. 3. Схема продажи продукции

Продажа продукции (рис. 3) также осуществляется сначала иностранным покупателям в соответствии с долями экспорта SE_j в каждом виде производимой продукции j. Это необходимо, чтобы выполнить обязательства по международным контрактам и оценить остатки запасов на складе для продажи внутри страны. Далее обрабатываются заявки на приобретение продукции каждого вида отечественными организациями-производителями и торговыми агентами в порядке их поступления. Пока на складе имеется продукция определенного вида, осуществляется их продажа по оптовой цене SP_j (уменьшается запас продукции на складе и зачисляется оплата на расчетный счет). Когда запас на складе заканчивается, все оставшиеся невыполненными заявки заносятся в список неудовлетворенных заказов для анализа динамики спроса на следующем шаге.

Процесс инвестирования организации-производителя начинается с расчета прибыли:

$$PR = \sum_{j=1}^{m} S_j SP_j - \left(E + T + A\right), \tag{7}$$

где S_j — сумма продаж организации по виду продукции j; SP_j — оптовая цена организации на продукцию j; E — расходы организации (включая закупки сырья и оплату труда сотрудников); A — амортизация основных средств организации; T — уплаченные организацией налоги; PR — полученная чистая прибыль.

Далее определяется отношение неудовлетворенных заказов на различные виды продукции к общим продажам организации (U):

$$U = \left(\sum_{j=1}^{m} SN_j SP_j\right) / \left(\sum_{j=1}^{m} S_j SP_j\right), \tag{8}$$

где S_j — сумма продаж организации по виду продукции j; SP_j — оптовая цена организации на продукцию вида j; SN_j — объем неудовлетворенных заказов по виду продукции j. Если $U>0$ — спрос на продукцию организации превышает ее выпуск и ей необходимо инвестировать часть прибыли в расширение производственных мощностей для увеличения объемов выпуска; $U \leq 0$ — инвестирование ограничивается размером амортизации для обновления списанного оборудования.

Расчет общего объема инвестиций I учитывает получение государственной субсидии SI, рассчитанную долю чистой прибыли PR и амортизацию A организации-производителя. После инвестирования объем выпуска организации пропорционально увеличивается:

$$V^* = V\ I\ /\ OS, \tag{9}$$

где V^* — увеличенный объем выпуска организации; V — текущий объем выпуска организации; I — общий объем произведенных инвестиций; OS — текущая стоимость основных средств организации.

Торговля продуктами питания

В каждом регионе модели создаются два агрегированных агента — торговых посредника: один в городской, другой — в сельской местности. Для каждого торгового агента формируется базовый ассортимент на основе данных мониторинга торговых точек во всех регионах РФ, проводимого в рамках проекта.

На вход модели торгового посредника поступают заявки покупателей-домохозяйств, сформированные в рамках модели потребителя. На основе полученных заявок покупателей торговый агент формирует заявки на оптовые закупки у производителей. Выбор поставщика начинается с организаций в своем регионе, затем в соседних и так далее, пока не будет сформирован требуемый ассортимент или не будут рассмотрены все поставщики (рис. 4). При выполнении заявки увеличивается запас продукции на складе торгового агента и производится оплата поставки с его расчетного счета.

Формирование розничной цены на продукт производится с учетом оптовой цены и торгово-транспортных наценок:

$$RP_j = SP_j + TE_j + ME_j, \tag{10}$$

где RP_j — розничная цена продукта j; SP_j — оптовая цена продукта j; TE_j — транспортная наценка; ME_j — торговая наценка.

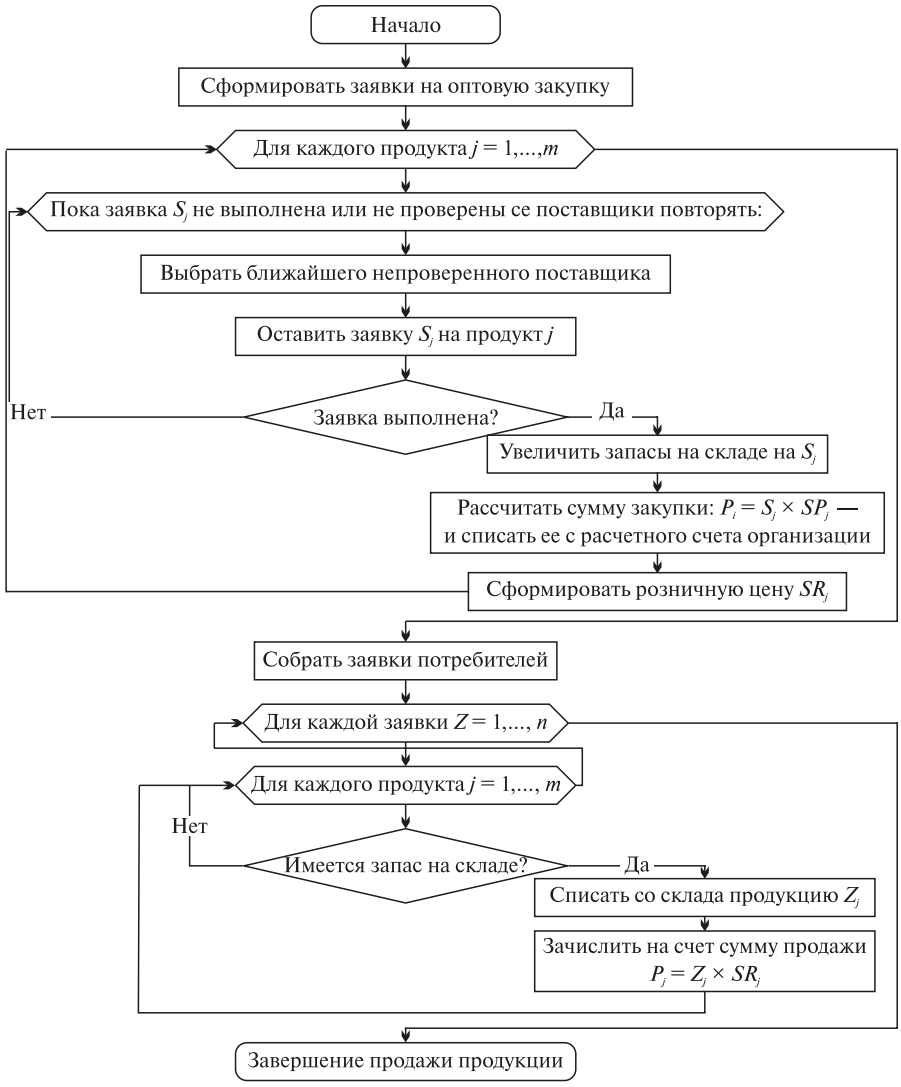


Рис. 4. Схема работы торгового агента

Транспортная наценка TE складывается из трех компонент:

$$TE = TBE + LE + TCE, \tag{11}$$

где TBE — базовая транспортная наценка при закупке у поставщика в своем регионе; LE — дополнительная транспортная наценка при доставке из других регионов, пропорциональная расстоянию до них; TCE — дополнительная транспортная наценка при доставке в сельскую местность.

Торговая наценка ME —

$$ME = MBE + MCE, \tag{12}$$

где MBE — базовая торговая наценка; MCE — дополнительная торговая наценка при продаже в сельской местности.

Таким образом, продукты питания в торговых точках в сельской местности в среднем стоят дороже за счет дополнительных транспортных издержек, связанных с доставкой в отдаленные деревни с городских складов, и дополнительных торговых наценок, обусловленных меньшим оборотом в сельских магазинах. Размер каждой наценки определяется на основе сравнения результатов мониторинга торговых точек в различных регионах РФ. Далее в модели осуществляется обработка заявок покупателей и продажа (при наличии на складе) входящих в них продуктов.

Спрос на продукты питания

Спрос домохозяйства на продукты питания зависит от его доходов, состава домохозяйства и его пищевых привычек, которые определяют собственно выбор продуктов для употребления. Бюджет, отводимый семьей на приобретение продуктов питания (S), рассчитывается на основе данных о доходах всех ее членов и структуре потребления домохозяйств различного дохода и состава:

$$S = D\,F, \tag{13}$$

где D — совокупный доход семьи; F — доля доходов, которая отводится на приобретение продуктов питания.

Совокупный доход семьи складывается из заработной платы, прибыли от бизнеса и пособий от государства, которые получают все члены семьи. Структура и размеры доходов агентов определяются в процессе работы модели и находятся в непосредственной связи с экономикой (уровень занятости и заработных плат) и управляющими воздействиями государства (введение новых видов пособий, их индексирование или отмена). Доля доходов, которая отводится на приобретение продуктов питания, зависит от размера дохода (чем ниже доход семьи, тем большая его часть уходит на приобретение продуктов) и состава домохозяйства (одинокие люди, семейные пары, дети). Этот показатель рассчитывается на основе данных о структуре потребления населения, публикуемых Федеральной службой государственной статистики[1].

Сумма, отводимая на приобретение продуктов питания, распределяется по категориям продуктов согласно пищевым привычкам домохозяйства. Для формализации этого процесса в модели вводится понятие «шаблон рациона», который определяет долю в тратах на каждую категорию продуктов:

$$W^r = \bigcup_{i=1}^{n} w_i^r, \quad \sum_{i=1}^{n} w_i^r = 1, \tag{14}$$

где W^r — шаблон для рациона r; w_i^r — доля категории i в рационе r.

На выбор шаблона влияют цели домохозяйства и доступный уровень потребления. Доступный уровень потребления зависит от уровня цен на продукты и может серьезно отличаться в различных регионах. В модели выделяется три типа соответствия рациона принципам сбалансированного питания: I) позволяет получить не менее 90% нутриентов (витаминов и минералов), препятствующих развитию анемии; II) получить не менее 75% ключевых нутриентов; III) получить менее 75% ключевых нутриентов.

Состав продуктовой корзины, разработанный в сотрудничестве со специалистом-нутрициологом доктором Натишей Дукхи, включает крупы, молочные, мясные и рыбные продукты, фрукты и овощи, доступные во всех регионах России (более подробно состав разработанной корзины см. в работе (Машкова и др., 2021)). Цены на продукты в различных регионах оценивались с помощью специально организованного мониторинга в 77 субъектах, в результате которого были собраны

[1] См. материалы сайта Федеральной службы государственной статистики (http://www.gks.ru).

цены на 31 354 продукта. Информация по регионам, не охваченным проведенным мониторингом, была взята из Единой межведомственной информационно-статистической системы (ЕМИСС).

Даже если семья имеет достаточно средств на приобретение всех необходимых продуктов, это не означает, что она будет придерживаться принципов правильного питания. В модели вводится понятие «целевой шаблон питания», которое отражает, насколько рацион домохозяйства соответствует современным стандартам. Выделяются сбалансированный, смешанный и несбалансированный целевые шаблоны, оценка их распространенности среди населения России производится на основе мониторингов ВЦИОМ[2].

Для отражения всех аспектов формирования спроса на продукты питания со стороны домохозяйств в модели разработан специальный алгоритм из пяти шагов.

Шаг 1. Рассчитывается бюджет домохозяйства и сумма, отводимая на потребление продуктов питания.

Шаг 2. Учитывается целевой шаблон потребления, определяющий предпочтения домохозяйства. Если домохозяйство обладает достаточными средствами, качество рациона будет определяться его целевым шаблоном питания, иначе ключевую роль будет играть стоимость продуктов. Так, с учетом возможностей и предпочтений выбирается соответствующий шаблон потребления W^r.

Шаг 3. Бюджет распределяется по категориям продуктов в соответствии со структурой шаблона W^r.

Шаг 4. Для каждой категории формируется базовая часть из наиболее часто употребляемых большинством населения продуктов и случайная компонента, которая вносит разнообразие в рацион конкретного домохозяйства. Выбранные продукты покупаются у организации — торгового агента.

Шаг 5. Оценивается пищевая ценность приобретенного набора продуктов, а также рассчитывается доля употребления каждым членом домохозяйства нутриентов, влияющих на динамику анемии, от рекомендуемой нормы потребления этих нутриентов.

Динамика распространения анемии

Качество потребляемого рациона питания влияет на динамику развития анемии у жителей в зависимости от их текущей стадии анемии, пола и возраста. На рис. 5 представлена модель динамики перехода по различным стадиям анемии в зависимости от получаемого питания. Состояния S обозначают стадии анемии: 0 — здоровый человек; 1 — анемия первой степени (легкой степени тяжести); 2 — анемия средней степени тяжести; 3 — тяжелая анемия. Переходы соответствуют качеству получаемого питания в соответствии с рекомендуемыми нормами потребления (РНП) ключевых нутриентов: R — богатое витаминами и минералами, потребление более 90% РНП (рацион I типа); N — нормальное, потребление не менее 75% РНП (рацион II типа); P — бедное, потребление 50–70% РНП (рацион III типа).

Переходы в модели являются вероятностными, вероятность переходов определяется путем калибровки модели на ретроспективных данных. На основе автоматной модели для каждого агента после определения его рациона и доли получаемых нутриентов от рекомендуемой нормы потребления рассчитывается его текущая стадия заболевания, при этом также учитывается временная задержка, необходимая для осуществления перехода.

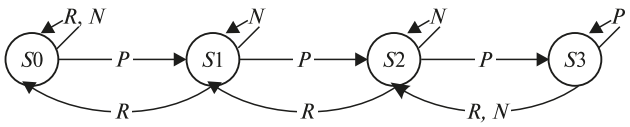


Рис. 5. Автоматная модель динамики анемии в зависимости от качества получаемого питания

Государственное регулирование

В модели государство может прямо или косвенно влиять на процессы производства и потребления продуктов питания путем проведения таких различных управляющих воздействий, как:

[2] Аналитические обзоры ВЦИОМ «Здоровый образ жизни: мониторинг» (https://wciom.ru/analytical-reviews/analiticheskii-obzor/zdorovyj-obraz-zhizni-monitoring) и «Питание: правильное и безопасное» (https://wciom.ru/analytical-reviews/analiticheskii-obzor/pitanie-pravilnoe-i-bezopasnoe).

– введение изменений в законодательном регулировании производства и торговли продуктами, норм и стандартов питания;

– реализация инвестиционных программ и введение налоговых льгот для отечественных производителей продуктов питания;

– введение ограничений на экспорт и импорт продуктов;

– выплата целевых субсидий на приобретение продуктов питания малообеспеченным семьям;

– организация и совершенствование программ бесплатного питания в детских садах и школах.

Альтернативные варианты управляющих воздействий подаются на вход модели динамики распространения анемии, таким образом, анализ результатов моделирования позволяет проводить сравнительную оценку политических решений с точки зрения их влияния на динамику заболеваемости среди населения.

В данной работе проводится анализ влияния субсидий на приобретение продуктов питания малообеспеченным семьям. Варианты управляющего воздействия формируются как доля стоимости продуктовой корзины, которая покрывается субсидией для тех семей, доход которых не позволяет обеспечить для всех их членов покупку продуктов, входящих в состав оптимальной корзины. Таким образом, размер пособия варьирует для разных регионов и лет (поскольку стоимость продуктовой корзины рассчитывается с учетом ожидаемой инфляции). Также на размер субсидии для конкретной семьи влияет ее доход и численность:

$$s_i = \min\left\{\left(p^r S\right)n_i, \left(p^r - b_i p_i / n_i\right)\right\}, \tag{15}$$

где s_i — субсидия для семьи i; p^r — стоимость продуктовой корзины в регионе r; S — доля стоимости продуктовой корзины, которую покрывает субсидия; b_i — совокупный бюджет семьи i; b_i — доля бюджета, отводимая семьей i на покупку продуктов питания; n_i — численность семьи i.

Программная реализация модели

Агент-ориентированная модель динамики распространения анемии представляет собой сложную программную систему, включающую интерфейсы, базы данных и модули, реализующие описанные выше функции динамического моделирования. Программная реализация модели выполнена на языке C# в среде MicrosoftVisualStudio, база данных поддерживается с помощью СУБД PostgreSQL. Использование данных программных средств позволяет обеспечить высокую производительность вычислений, необходимую для многоагентной системы с большим числом действующих агентов.

Информационное наполнение модели осуществляется на основе данных Федеральной службы государственной статистики (ФСГС)[3], мониторинга RLMS[4], информационной системы СПАРК-Интерфакс[5] и открытых интернет-порталов, посвященных вопросам питания[6]. Исходные данные моделирования загружаются в модель в виде таблиц. Базовыми таблицами исходных данных являются: численность населения регионов по полу и возрасту и их распределение по домохозяйствам; численность больных анемией в регионах страны; отраслевая классификация продуктов питания и сырья для их производства; объемы производства продуктов питания в региональном разрезе; доходы населения; цены на продукты в регионах; пищевая ценность продуктов питания; нормы потребления пищевых веществ для различных групп населения. Более подробно вопросы получения и преобразования исходных данных к требуемому для загрузки в модель формату рассматриваются в работе (Mashkova, 2021).

Всего в модели создается порядка 1,5 млн агентов-жителей, что соответствует масштабированию 1:100, т.е. каждый агент в модели представляет 100 жителей России одной половозрастной группы. Также создается 6500 агрегированных организаций, представляющих отрасли в различных регионах, из них 1777 организаций отраслей, производящих продукты питания. Созданные объекты и взаимосвязи между ними сохраняются в базе данных модели.

---

[3] Сайт Федеральной службы государственной статистики (http://www.gks.ru).

[4] Российский мониторинг экономического положения и здоровья населения НИУ ВШЭ (https://www.hse.ru/rlms/).

[5] СПАРК-Интерфакс (официальный сайт: https://spark-interfax.ru/).

[6] Портал о здоровом питании Health-diet: https://www.health-diet.ru/

Моделирование динамики распространения анемии осуществляется с учетом исходного состояния объектов, которые передаются из базы данных. В процессе динамического моделирования изменяется состав и характеристики этих объектов (взросление, изменение состояния здоровья и рождение новых агентов, изменения объемов выпуска организаций и доходов домохозяйств), соответствующие изменения сохраняются в базе данных модели.

Для запуска модели необходимо выбрать сценарий, который определяет параметры экономической среды и набор управляющих воздействий, в качестве которых выступают меры государственной поддержки производителей продуктов питания и/или семей с низкими доходами. В качестве результатов моделирования на экран может быть выведена доступность населению сбалансированного рациона питания, численность больных анемией среди детей и взрослых; также данная информация может быть представлена на карте для отдельных регионов России. Получение более подробных данных моделирования и их выгрузка для сопоставления результатов различных серий экспериментов осуществляются с помощью прямого обращения к базе данных модели.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Неопределенность дальнейшей динамики эпидемиологической обстановки в России и ее влияние на экономику и социальную сферу обусловливают применение сценарного подхода при проведении прогнозных расчетов на разработанной модели. Моделирование динамики распространения анемии проводилось на среднесрочный период до 2025 г. в рамках трех сценариев, учитывающих эпидемиологические риски и связанные с ними изменения в экономических процессах:

– сценарий 1 (пессимистический) — здесь регулярно повторяются волны коронавирусной инфекции. При данном сценарии продолжается действие ограничительных мер и снижение мирового спроса;

– сценарий 2 (консервативный) — предполагает, что распространение коронавируса завершится в 2023 г. В этом случае рост экономики (как российской, так и мировой) может ожидаться через два года;

– сценарий 3 (оптимистический) — предполагает затухание пандемии к концу 2022 г. и восстановление к этому сроку всех сфер экономики;

– сценарий 4 (торговая война) — в свете последних событий представляется необходимым рассмотреть также и такой сценарий, в котором учитываются возникшие политические риски в условиях консервативного эпидемиологического сценария.

В рамках разработанных сценариев в модель закладываются ряды прогнозов следующих значимых для экономики России факторов.

1. *Курс рубля по отношению к доллару США*. Начиная с курса в 75 руб. за 1 долл. на момент начала моделирования (январь 2022 г.), в оптимистическом сценарии рассматривается его постепенное снижение до 65 руб., в консервативном — сохранение на уровне 70–75 руб., в пессимистическом — рост до 80–85 руб. за 1 долл. В сценарии «торговая война» рассматривается повышение курса доллара до 120 руб.

2. *Рыночная цена барреля нефти*. В оптимистическом сценарии ожидается рост до 100 долл. за баррель, в консервативном — сохранение цены на уровне 75–85 долл., в пессимистическом — падение до 40–50 долл. за баррель. Сценарий «торговая война» предполагает повышение мировых цен на энергоносители, в частности цены барреля нефти до 140 долл.

3. *Объем экспорта продукции* отраслей сельского хозяйства, добывающей и обрабатывающей промышленности, которые в различной степени испытывают давление вводимых ограничений. Так, объем экспорта продуктов питания и энергоносителей растет во всех сценариях, спрос на прочие виды полезных ископаемых и продукцию обрабатывающих производств падает в пессимистическом сценарии в результате замедления мировой экономики, которая испытывает меньшую потребность в сырье, комплектующих и оборудовании. В числовом выражении ожидается ежегодный рост экспорта на 5–10% в различных отраслях; в консервативном сценарии — сохранение объемов экспорта обрабатывающей промышленности; рост на 2–5% продукции сельского хозяйства и полезных ископаемых; в пессимистическом — падение экспорта продукции добывающих и обрабатывающих производств на 2–5% при сохранении высоких объемов экспорта продукции сельского хозяйства. В сценарии «торговая война» предусматривается снижение объемов экспорта

продукции сельского хозяйства вследствие государственного регулирования вплоть до полной его остановки в 2022 г.

4. *Динамика внутреннего спроса* по группам отраслей, ставших объектом наиболее жесткого регулирования в условиях сохранения эпидемиологических рисков: организации развлечений, спорта, общественного питания, в несколько меньшей степени — торговля, поскольку при закрытии магазинов активизируются онлайн-продажи товаров. В оптимистическом сценарии предполагается возвращение организаций пострадавших отраслей к докризисным значениям в 2022 г. и затем — их умеренный рост в 2–4% ежегодно. При консервативном сценарии возврат к докризисным показателям ожидается в 2023 г., в пессимистическом — сохранение снижения роста пострадавших отраслей по сравнению с докризисным уровнем показателей вплоть до 2025 г.

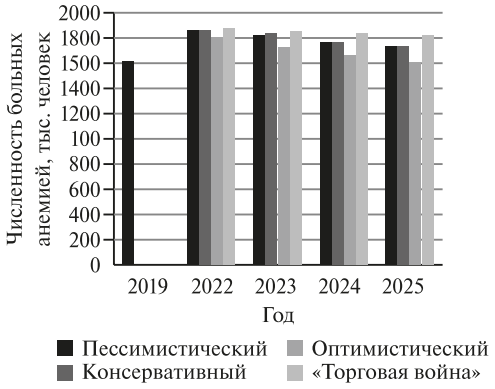


Рис. 6. Численность больных анемией в России, по результатам сценарных расчетов

5. *Инфляция* в оптимистическом сценарии возвращается к таргетированному значению в 4%; в консервативном — снижается до 6%; в пессимистическом — сохраняется на текущем уровне в 8% (по данным ФСГС, 2021 г.). Сценарий «торговая война» предполагает повышение темпов инфляции до 15% в 2022 г. с последующим снижением до 10–12% в год.

Параметры разработанных сценариев были заложены в разработанную агент-ориентированную модель динамики распространения анемии. Результаты проведенных расчетов представлены на рис. 6. По сравнению со значениями 2019 г. в 2022 г. прогнозируется рост заболеваемости анемией до 1,8 млн человек во всех сценариях, что связано с падением доходов и ростом стоимости продуктовой корзины. В последующие годы вместе со стабилизацией экономической обстановки ожидается снижение числа людей, страдающих анемией, однако только в оптимистическом сценарии возможно снижение числа заболевших до значений 2019 г.

Наблюдаемые различия в сценариях обусловлены в первую очередь сценарным показателем инфляции продуктовой корзины, превышающей темп роста доходов как в консервативном, так и в пессимистическом сценариях. Данная ситуация может быть исправлена либо государственным регулированием цен на продукты питания, либо выплатой субсидий малообеспеченным семьям. Для проведения серии расчетов по оценке эффективности управляющих воздействий был выбран второй вариант, при этом варьировала величина государственного пособия. Размер выплат связан со стоимостью оптимальной продуктовой корзины, обеспечивающей получение минимум 75% необходимых витаминов и минералов при соблюдении требований к калорийности рациона (2500 кКал для взрослого мужчины). Стоимость корзины определяется составом входящих в нее продуктов питания и ценой этих продуктов в различных регионах страны. Цены на продукты в различных регионах оценивались на основе результатов мониторинга в регионах (см. п. «Спрос на продукты питания») и информации из ЕМИСС.

В качестве возможного управляющего воздействия в серии расчетов рассматривается вариант выплаты целевых пособий семьям, доход которых не позволяет обеспечить для всех ее членов покупку продуктов, входящих в состав рациона типа II. Для проведения расчетов были выбраны следующие варианты компенсации субсидиями:

1) базовый —субсидии данного вида отсутствуют;

2) покрывается 20% стоимости рациона типа II;

3) покрывается 50% стоимости рациона типа II;

4) покрывается полная стоимость рациона типа II.

Анализ эффективности управляющих воздействий проводился в условиях консервативного сценария и сценария «торговая война».

Проведенные расчеты показывают, что в 2019 г. сбалансированный рацион типа II был доступен почти 80% жителей России, при реализации консервативного сценария прогнозируется снижение

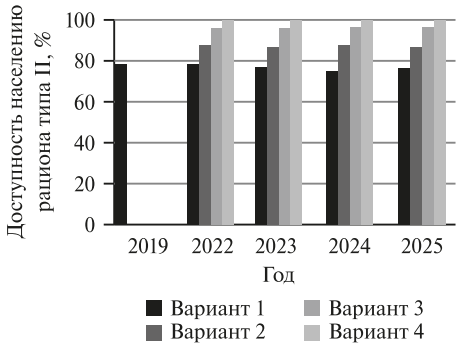


Рис. 7. Прогноз доступности населению рациона типа II уровня при различных вариантах программы субсидирования семей с низким доходом (консервативный сценарий)

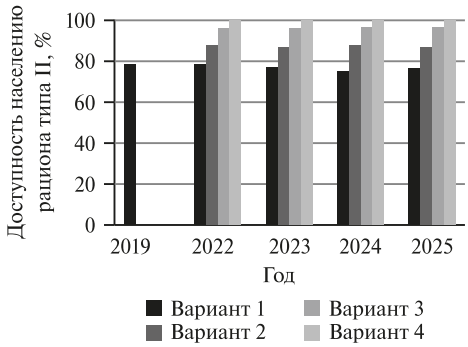


Рис. 8. Прогноз доступности населению рациона типа II при различных вариантах программы субсидирования семей с низким доходом (сценарий «торговая война»)

этого показателя до 78%. График, представленный на рис. 7, показывает, насколько повысилась доступность рациона типа II при реализации представленной программы субсидирования семей с низким доходом. При реализации второго и третьего вариантов субсидирования рацион доступен 83–88% населения, при реализации четвертого варианта — всем жителям России.

В условиях сценария «торговая война» доступность сбалансированного рациона питания для жителей России снижается еще более драматично — до 65% населения (рис. 8), что делает программу субсидирования семей с низким доходом необходимой все большему числу жителей.

Требуемый объем субсидирования рассчитывается в программе как сумма пособий данного вида, выплаченных семьям во всех регионах России. С учетом ожидаемой инфляции, заложенной на уровне 6% в консервативном сценарии, ежегодный объем субсидирования лежит в диапазоне 250–350 млрд руб. для варианта 2, 430–550 млрд руб. для варианта 3, 490–625 млрд руб. для варианта 4 (см. таблицу). В сценарии «торговая война» объем требуемых субсидий значительно выше, что связано в первую очередь с более высокими темпами инфляции на продукты питания (10–15% ежегодно).

Численность больных анемией обратно пропорциональна доступности жителям сбалансированного рациона питания и при реализации программы субсидирования снижается до 1,4–1,55 млн человек в консервативном сценарии и 1,4–1,7 млн человек в сценарии «торговая война» (рис. 9, 10).

Анализ результатов моделирования позволяет заключить, что реализация даже минимального по объему варианта программы субсидирования приводит к значительному снижению числа

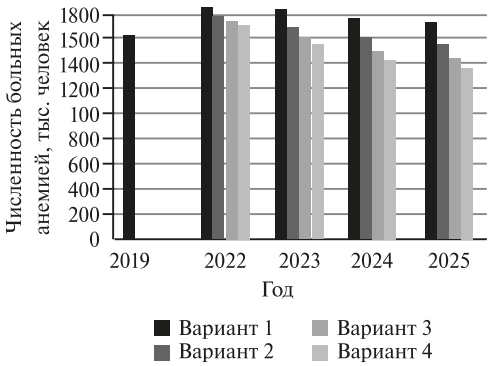


Рис. 9. Прогноз динамики распространения анемии в России при различных вариантах программы субсидирования семей с низким доходом (консервативный сценарий)

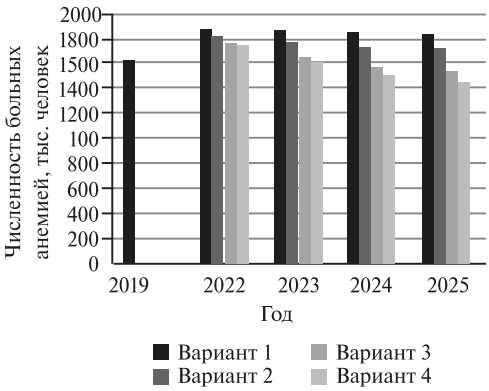


Рис. 10. Прогноз динамики распространения анемии в России при различных вариантах программы субсидирования семей с низким доходом (сценарий «торговая война»)

Таблица. Требуемый объем субсидирования в рамках программы поддержки семей с низким доходом

Год	Объем субсидирования в год, млрд руб.					
	Консервативный сценарий			Сценарий «торговая война»		
	Вариант 2	Вариант 3	Вариант 4	Вариант 2	Вариант 3	Вариант 4
2022	255,1	430,3	488	341,1	577,2	645,4
2023	284,8	473,9	536,6	454	764,5	850,5
2024	313,4	512,5	580,6	550,6	934,2	1037,7
2025	344,4	556,9	624,6	624,1	1071,4	1187

больных анемией уже к 2024 г. в условиях консервативного сценария, однако при реализации наиболее вероятного на данный момент сценария «торговая война» для достижения таких результатов необходима реализация промежуточного варианта 3, а его стоимость составит порядка 3 млрд руб. за четыре года.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе представлен разработанный международным коллективом инструментарий для прогнозирования динамики распространения анемии в странах БРИКС. В качестве метода исследования было выбрано агент-ориентированное моделирование, которое в контексте поставленной задачи обеспечило возможность учета влияния качества получаемого питания на возникновение и протекание анемии у различных категорий населения. Структура модели включает агентов-жителей, производителей продуктов питания и торговых агентов. Алгоритмы модели воспроизводят процессы производства продуктов питания от сельскохозяйственного сырья до готовой к употреблению продукции, а также импорта и экспорта продуктов питания.

Модель отличается достаточно высокой степенью детализации исследуемых процессов. Так, при моделировании работы торговых посредников учитывается разница в ассортименте продуктов питания в городской и сельской местности, а также аспекты ценообразования в различных регионах, обусловленные различиями в климате и инфраструктуре. При моделировании аспектов потребления продуктов питания оценивается качество доступного домохозяйствам рациона питания с точки зрения наличия в нем рекомендуемых норм потребления ключевых витаминов и микроэлементов, дефицит которых приводит к развитию анемии, при этом нормы потребления учитывают пол и возраст агента-жителя.

Разработанная модель основана на ряде допущений.

1. Рассматривается развитие железодефицитной анемии под влиянием качества получаемого рациона питания и не принимается в расчет употребление специальных добавок, назначаемых врачами для лечения тяжелых стадий анемии.

2. Исследуется рацион только частных домохозяйств, тогда как рацион коллективных домохозяйств (интернатов, тюрем, казарм) считается соответствующим текущим государственным стандартам питания.

3. Бюджет частных домохозяйств в модели считается общим, как и качество питания, получаемого членами одного домохозяйства.

Устранение допущения 1 является задачей дальнейших исследований нашего коллектива. Допущения 2 и 3 обусловлены недостаточностью исходных данных для более полной детализации данных процессов.

На базе разработанной модели проведена серия расчетов, направленная на прогнозирование динамики распространения анемии в регионах России в условиях различных сценариев, параметры которых отражают эпидемиологические и внешнеэкономические риски. Расчеты показывают увеличение числа больных анемией на 10–12% в 2022 г. по сравнению со значениями 2019 г., который принимается как базовый. В оптимистическом сценарии заболеваемость возвращается к уровню базового года к 2025 г., в консервативном и пессимистическом сценариях остается на 5–7% выше него. В условиях консервативного сценария смоделированы последствия программы государственного субсидирования семей с низкими доходами. Согласно полученным результатам

реализация такой программы в полном объеме обеспечит доступ всех жителей России к сбалансированному рациону питания и приведет к снижению числа больных анемией на 25% по сравнению с прогнозом в условиях отсутствия такой субсидии.

Представленная структура и алгоритмы модели являются универсальными для всех стран БРИКС, необходимые отличия могут быть отражены в наборах исходных данных, в частности региональной структуре, численности и половозрастной структуре населения, доходах, ценах на продукты питания и традиционных рационах в различных странах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

Машкова А.Л., Дукхи Н., Неволин И.В., Савина О.А. (2021). Прогнозная оценка доступности сбалансированного рациона питания для жителей регионов России: агент-ориентированный подход // *Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз*. Т. 14. № 6. С. 107–125. DOI: 10.15838/esc.2021.6.78.6 [**Mashkova A.L., Dukhi N., Nevolin I.V., Savina O.A.** (2021). A forecasting assessment of the affordability of a balanced diet for residents of Russian regions: An agent-based approach. *Economic and Social Changes: Facts, Trends, Forecast*, 14, 6, 107–125. DOI: 10.15838/esc.2021.6.78.6 (in Russian).]

Новикова Е.В., Савина О.А., Машкова А.Л., Маматов А.В. (2019). Воспроизведение динамики населения регионов России методом агентного моделирования // *Информационные системы и технологии,* 2, 48–55. [**Novikova E.V., Savina O.A., Mashkova A.L., Mamatov A.V.** (2019). Reproduction of population dynamics of Russian regions using agent modeling. *Information Systems and Technologies,* 2, 48–55(in Russian).]

Barbrook-Johnson P., Badham J., Gilbert N. (2016). Uses of agent-based modeling for health communication: The TELL ME case study. *Health Communication*, 1–6. DOI: 10.1080/10410236.2016.1196414

DeMaeyer E.M., Dallman P., Gurney J.M., Hallberg L., Sood S.K., Srikantia S.G. (1989). *Preventing and controlling iron deficiency anaemia through primary health care.* Geneva, World Health Organization. Available at: http://www.who.int/nutrition/publications/micronutrients/anaemia_iron_deficiency/9241542497/en/index.html

Epstein J.M. (2009). Modelling to contain pandemics. *Nature*, 460 (7256), 687. DOI: 10.1038/460687

Glanz K., Sallis J.F., Saelens B.E., Frank L.D. (2005). Healthy nutrition environments: Concepts and measures. *Am.J. Health Promot*., 19 (5), 330–333. DOI: 10.4278/0890-1171-19.5.330

Lamjed B.S., Drogoul A., Bouron T. (2001). Multi-agent based simulation of consumer behaviour: Towards a new marketing approach. *Proceedings of the International Congress on Modelling and Simulation (MODSIM)*. Canberra, Australia.

Li Y., Zhang D., Pagán J.A. (2016). Social norms and the consumption of fruits and vegetables across New York City neighborhoods. *Journal of Urban Health,* 93, 244–255.

Mashkova A.L. (2021). Processing initial data for the agent-based model of the Russian Federation spatial development. In: S.L. Peng, M. Favorskaya, H.C. Chao (Eds.). Sensor networks and signal processing. *Smart Innovation*, *Systems and Technologies*, 176. DOI: 10.1007/978-981-15-4917-5_18

Rose D., Richards R. (2004). Food store access and household fruit and vegetable use among participants in the US Food Stamp Program. *Public Health Nutr.,* 7 (08), 1081–1088. DOI: 10.1079/PHN2004648

Thejpal R. (2015). Iron deficiency in children. *S. Afr. Med. J.,* 105 (7), 607. DOI: 10.7196/SAMJnew.7781

Tracy M., Cerdá M., Keyes K.M. (2018). Agent-based modeling in public health: Current applications and future directions. *Annual Review of Public Health*., 39, 77–94.

World Health Organization and Centers for Disease Control and Prevention (WHO/CDC). Worldwide prevalence of anaemia 1993–2005. WHO Global database on anaemia. 2008. Available at: http://whqlibdoc.who.int/publications/2008/9789241596657_eng.pdf

Forecast of anaemia prevalence in the regions of Russia using the agent-based model

© 2022 A.L. Mashkova, N. Dukhi, R. Kaur, I.V. Nevolin

A.L. Mashkova,
Orel State University named after I.S. Turgenev, Orel; Central Economics and Mathematics Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia; e-mail: aleks.savina@gmail.com

N. Dukhi,
Human Sciences Research Council, South African Republic; e-mail: doctordukhi@gmail.com

R. Kaur,
Central Scientific Instruments Organization, India; Academy of Scientific and Innovative Research, India, e-mail: kaur@list.ru

I.V. Nevolin,
Central Economics and Mathematics Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia; e-mail: jolutre@mail.ru

Received 25.01.2022

The reported study was funded by RFBR, Department of Science and Technology (India) and National Research Foundation (South African Republic) according to the research project № 19-57-80003.

Abstract. In the article development of the agent-based model of anaemia prevalence in Russia is discussed. The structure of the model is presented, which includes agents-residents, food producers and sales agents. For each actor in the model, algorithms have been developed that determine their interactions. For food producers, their purchases, sales, production process and dynamics of investments in equipment are simulated. Simulation of sales agents includes the assortment formation and product prices, taking into account transport and trade margins. Households form their diet based on their income, composition, traditions and habits. The expected dynamics of anaemia is modeled depending on the quality of the received food and the current stage of the disease. The article also discusses program realization and information support of the model; the user interface is presented. Four scenarios of the dynamics of the socio-economic environment of the model are formalized, taking into account epidemiological and external economic risks. A series of calculations was carried out to predict the dynamics of anaemia prevalence under conditions of the developed scenarios. A program of subsidizing low-income families was proposed and its influence on availability of a balanced diet and anaemia prevalence among Russian residents was studied. The calculations show that in the absence of special support measures, a balanced diet becomes available to a smaller number of residents (65% compared to 78% in 2019) in the conditions of the most likely "trade war" scenario. At the same time, the total amount of subsidies required to provide low-income families with quality food varies from 300 billion to 1 trillion rubles per year, depending on the amount of benefits allocated.

Keywords: agent-based modeling, anemia, nutrition, recommended daily allowance.

JEL Classification: I15.

For reference: **Mashkova A.L., Dukhi N., Kaur R., Nevolin I.V.** (2022). Forecast of anaemia prevalence in the regions of Russia using the agent-based model. *Economics and Mathematical Methods*, 58, 2, 64–79. DOI: 10.31857/S042473880018351-5

ЭКОНОМИКА И МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ, 2022, том 58, № 2, с. 80–91

МАТЕМАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЭКОНОМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

Определение параметров процесса образования редких событий в экономике для их последующего прогнозирования

© 2022 г. Ю.А. Кораблев

Ю.А. Кораблев,
Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации (Финуниверситет), Москва; e-mail: yura-korablyov@yandex.ru

Поступила в редакцию 05.11.2021

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 19-010-00154).

Аннотация. В статье представлен метод определения неизвестных параметров процесса, формирующего редкие события в экономике. Редкие события рассматриваются не со статистической точки зрения, а с точки зрения процессов, которые образуют эти события. Причем процесс образования редких событий может быть задан произвольным алгоритмом. Такой процесс также будет использовать неизвестные параметры, которые могут быть не только статическими, но и динамическими. Например, если рассматривать процесс потребления, в результате которого образуются дискретные покупки неподконтрольными нам покупателями, то такими параметрами могут быть максимальный запас и динамически изменяющаяся скорость потребления. В общем виде процесс может быть произвольным и его могут описывать различные параметры. Задача состоит в нахождении этих неизвестных параметров процесса, ориентируясь только на выборку редких событий. Идея метода — минимизация функции потерь, которая определяется на основе различий между событиями, образованными в результате функционирования модели процесса, и событиями из исходной выборки наблюдений. Каждое событие, помимо времени появления, характеризуется еще и дополнительной информацией, например объемом покупки. Необходимо найти такие значения параметров процесса, которые позволяли бы получить очень похожую выборку событий. Динамические параметры процесса задаются в виде кубических сплайнов особой структуры. Для однозначного описания каждого динамического параметра в целевую функцию вносится штраф за чрезмерную гладкость (шероховатость) соответствующих сплайнов. Приведен пример процесса и структура его параметров, подлежащая определению. Оптимизация происходит численными методами, за основу берется алгоритм Нелдера–Мида, который запускается на сетке, чтобы найти глобальный оптимум. Параметры процесса определяются по шагам, в начале только чтобы получить несколько событий, необходимых для продолжения расчетов, потом получаем следующую группу событий и т.д., это позволяет большую оптимизационную задачу разбить на последовательность простых задач, что существенно снижает общую трудоемкость. Описано предположение, которое должно соблюдаться, чтобы такой прием был справедлив. Рассмотрен пример выявления неизвестных параметров на примере процесса потребления. Определив параметры процесса, можно переходить к экстраполяции и осуществлять прогноз будущих событий.

Ключевые слова: редкие события, процесс образования событий, определение параметров процесса, прогнозирование событий, имитационное моделирование, оптимизация, алгоритм Нелдера–Мида.

Классификация JEL: C1, C15, C4, C5, C53.

Для цитирования: **Кораблев Ю.А.** (2022). Определение параметров процесса образования редких событий в экономике для их последующего прогнозирования // *Экономика и математические методы*. Т. 58. № 2. С. 80–91. DOI: 10.31857/S042473880020016-6

1. ВВЕДЕНИЕ

Анализ и прогнозирование редких событий в экономике являются актуальной задачей. Данное исследование развивает ранее предложенный подход для анализа и прогнозирования редких событий в экономике (Кораблев, 2020), который основывается на рассмотрении событий с точки зрения процессов, которые формируют эти события.

Другие существующие методы ограничиваются лишь статистическим рассмотрением событий. Одни методы определяют либо вероятности появления событий на определенном участке времени,

моделируют потоки событий как потоки случайных событий, в основном ограничиваясь пуассоновскими потоками без последействия, либо строят простейшие модели марковского процесса, например метод Виллемейна (Willemain et al., 2001, 2004).

Существуют подходы, которые базируются на методах классификации. В них в случае внешних наблюдаемых факторов распознаются закономерности, при которых в следующем периоде можно ожидать появления редкого события. Во всех этих методах не прогнозируется момент времени возникновения события, а дается оценка вероятности возникновения события на интервале времени. В большинстве методов, если предсказанное событие не появилось, то на следующий период опять дается точно такой же прогноз, т.е. все оценки получаются статическими.

Последние обзоры различных подходов к анализу и прогнозированию редких событий можно найти в работах (Kaya, Sahin, Demirel, 2020; Carreno, Inza, Lozano, 2020; Prince, Turrini, Meissner, 2021; Halim, Quaddus, Pasman, 2021). В них рассматриваются сотни работ других авторов, но ничего похожего на предлагаемый здесь метод в них нет.

Основная идея предлагаемого автором подхода заключается в том, чтобы анализировать процессы возникновения событий в источниках этих событий. В предыдущих работах (Кораблев, 2020; Кораблев, Голованова, Кострица, 2020) такими процессами были процессы потребления или накопления возмущения, а источниками — покупатели или клиенты (что позволило прогнозировать будущие покупки клиентов или моменты обращения клиента в парикмахерскую). Однако эти работы ограничивались исключительно процессами, схожими с опустошением/наполнением емкости, и процессы анализировались исключительно математическими методами. В этой работе мы распространим подход на произвольные процессы (для лучшего понимания демонстрационный пример будет основан на процессе потребления, но вместо него можно рассмотреть любой процесс).

Предлагаемый подход анализа редких событий состоит из пяти этапов:

1) события разделяются по разным выборкам — в зависимости от того, в каких источниках событий они были сформированы (выполняется автоматически, если данные от разных источников не смешиваются);

2) выдвигаются предположения о процессе, который формирует события в источнике (построение алгоритмической модели);

3) определяются параметры процесса из имеющейся выборки событий;

4) параметры процесса экстраполируются на будущее (любым известным методом);

5) запускается сам процесс с установленными значениями параметров, в результате которого получают прогноз будущих событий. Точность прогноза будущих событий зависит от точности определения и экстраполяции параметров процесса (при условии, что модель процесса была верной).

Данное исследование направлено на разработку универсального метода анализа и прогнозирования событий, которые могут порождаться произвольными процессами. Стоит отметить, что нас не интересуют случайные процессы, т.е. такие, в которых для образования событий используются случайные числа. Случайность есть мера неопределенности, мера незнания. Нас интересуют процессы, в которых события образуются как бы детерминировано, по некоторым физическим законам. Это предположение можно ослабить, приняв, что если внутри процесса имеется неопределенность, то нас будет интересовать только динамика математического ожидания (усреднение по реализациям) всех нестационарных параметров, когда параметры процессов могут быть описаны в виде аналитических функций. Дополнительно можно допустить присутствие некоторой внешней неопределенности, из-за которой события наблюдаются с погрешностями. В итоге необходимо определить нестационарные параметры процесса по зашумленным данным.

2. ОСНОВНАЯ ИДЕЯ

В первую очередь необходимо описать процесс формирования событий. В общем виде это может быть произвольный алгоритм. Как в эконометрике или анализе данных исследователь формирует математическую модель, так и здесь будет формироваться модель, но не математическая, а алгоритмическая. Ключевым элементом в такой модели является образование событий в результате некоторых операций сравнения. При формировании событий, помимо момента времени, может возвращаться информация об этом событии (например, в процессах потребления такой информацией будет объем покупок).

В модели процесса могут использоваться нестационарные параметры процесса, которые будут изменяться со временем независимо от того, что происходит в самом процессе. Эти параметры ненаблюдаемы, их нельзя назвать экзогенными переменными. Их можно сравнить с коэффициентами эконометрических моделей $(a_0, a_1, \ldots)$, но с допущением, что они будут динамическими, т.е. $a_0(t), a_1(t), \ldots$. Например, в процессах потребления (как в моделях управления запасами) переменной будет являться текущий запас, а параметром — нестационарный спрос. Мы хотим найти эти неизвестные параметры. Определять их будем с помощью соотнесения имеющейся выборки редких событий с выборкой событий, полученной в результате функционирования нашей модели. Для этого можно задать функцию потерь и оптимизировать ее численными методами. В результате такой оптимизации будут подобраны параметры процесса, при которых формируемая выборка будет мало отличаться от имеющейся выборки наблюдений. Основная идея достаточно проста и интуитивно понятна, однако реализация сталкивается с некоторыми трудностями, которые успешно преодолеваются.

3. ФОРМА ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА

Статические параметры процесса будут задаваться одним числом. Динамические параметры будут задаваться в виде кубических сплайнов $g(t)$, представленных через изменяющуюся скачками третью производную $g'''(s_k)$ в каждом узле s_k. Наш сплайн будет немного похож на дифференциальное уравнение. Он будет определяться через начальные значения в стартовом узле, а на всех других узлах будет меняться только его третья производная. Заметим, что такая форма сплайна эквивалента представлению через значения и вторые производные (value-second derivative representation), которая, в свою очередь, эквивалента классическому представлению четырьмя параметрами при степенях переменной[1]. В итоге, чтобы задать значение изменяющегося со временем параметра процесса в виде сплайна $g(t)$, требуется задать:

1) узлы сплайна $s_1 < s_2 < \ldots < s_m$ (точки сочленения полиномов, число узлов m и их местоположение выбирается исследователем априори; самый распространенный способ выбрать узлы, чтобы они совпадали с наблюдениями, или распределить их равномерно на всем интервале наблюдений);

2) начальное значение, а также первую и вторую производную в первом узле $g(s_1)$, $g'(s_1)$, $g''(s_1)$;

3) значения третьей производной $g'''(s_k)$ во всех предшествующих моменту времени t узлах $\forall k : s_k < t$.

Благодаря такой форме представления сплайна необходимо определять только те значения, которые предшествовали интересующему нас периоду времени. Это поможет нам, когда мы начнем заниматься оптимизацией и подгонять параметры процесса (мы сможем подбирать параметры по одному событию последовательно, а не для всей выборки сразу). Заметим, что в последнем узле значение третьей производной можно не задавать.

Значения сплайна в произвольный момент времени t определяется через значения и производные, соответствующие предшествующему узлу s_k (из классической формы сплайна последовательными преобразованиями выводится форма, соответствующая ряду Тейлора, что было ожидаемо). Для времени t и предшествующего этому времени узла s_k выполняем:

$$g''(t) = g''(s_k) + (t - s_k) g'''(s_k), \tag{1}$$

$$g'(t) = g'(s_k) + (t - s_k) g''(s_k) + 0{,}5(t - s_k)^2 g'''(s_k), \tag{2}$$

$$g(t) = g(s_k) + (t - s_k) g'(s_k) + 0{,}5(t - s_k)^2 g''(s_k) + \left[(t - s_k)^3 / 6\right] g'''(s_k). \tag{3}$$

Данная форма представления сплайна гарантирует непрерывность вплоть до второй производной, третья производная меняется скачками в узлах сплайна. Выражения серьезно упрощаются, если время продвигается всегда только на единицу. При этом вычисления опираются на значения не предыдущего узла, а на значения в предыдущий момент времени. В модели процесса будем использовать процедуру продвижения модельного времени, в результате которой продвигаются все значения динамических параметров.

Заметим, что практически во всех работах, посвященных восстановлению неизвестных функций сплайнами, применяются натуральные сплайны, которые в начале и в конце превращаются в прямую линию. Таким образом, вторая производная на концах сплайна обнуляется, в начале

[1] Автор провел все соответствующие аналитические расчеты, чтобы убедиться в этом.

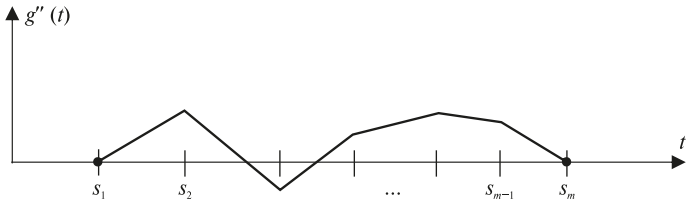


Рис. 1. Поведение второй производной $g''(t)$ в кубическом натуральном сплайне

Примечание. Третья производная изменяется скачками, вторая кусочно-линейно. Вторая производная начинается и заканчивается в нуле.

отсчета она берется равной нулю, и к окончанию выборки она также должна прийти к нулю. Если мы введем такое условие, то вторую производную в начальном узле можно будет не подбирать. Можно не подбирать и значение третьей производной в предпоследнем узле s_{m-1}, так как его можно выразить через ранее определенные значения. Если $h_k = s_{k+1} - s_k$ — расстояние между узлами, $g''\left(s_1\right) = 0$, то $g''\left(s_m\right) = \sum_{k=1}^{m-1} h_k g'''\left(s_k\right) = 0$, откуда

$$g'''\left(s_{m-1}\right) = -\sum_{k=1}^{m-2} h_k g'''\left(s_k\right) / h_{m-1} \tag{4}$$

(рис. 1).

Ранее было сказано, что наблюдения могут быть с погрешностью (данные зашумлены). Обычно для борьбы с шумом к функции потерь добавляют штраф за чрезмерную гладкость (шероховатость, roughness). В нашей задаче для кубического сплайна штраф на шероховатость рассчитывается как $\int_{s_1}^{s_m} \left(g''\left(t\right)\right)^2 dt$. Это можно сделать как во время функционирования процесса, суммируя квадрат второй производной, так и после завершения процесса. Пропуская промежуточные вычисления (следует интегрировать квадрат $g''(t) = g''(s_k) + (t - s_k) g'''(s_k)$), получим, что штраф за шероховатость для нашего сплайна можно определить как

$$\int_{s_1}^{s_m} \left(g''\left(t\right)\right)^2 dt = \sum_{k=1}^{m-1} \frac{\left(g''\left(s_k\right) + g'''\left(s_k\right) h_k\right)^3 - \left(g''\left(s_k\right)\right)^3}{3 g'''\left(s_k\right)}, \tag{5}$$

где $g''(s_k) = g'''(s_1) h_1 + \ldots + g'''(s_{k-1}) h_{k-1}$.

Далее, возвращаясь к процессу образования событий, вспоминаем, что параметров может быть несколько. И для каждого динамического параметра необходимо предусмотреть все вышеописанное (для разных параметров узлы сплайна удобно располагать одинаковым способом, но в общем случае количество узлов и их расположение может отличаться). Дополнительно позволим некоторым параметрам быть статическими, а не динамическими. В этом случае для них определяется только одно значение. В итоге для модели процесса необходимо предусмотреть схему значений для описания параметров процесса, показанную на рис. 2.

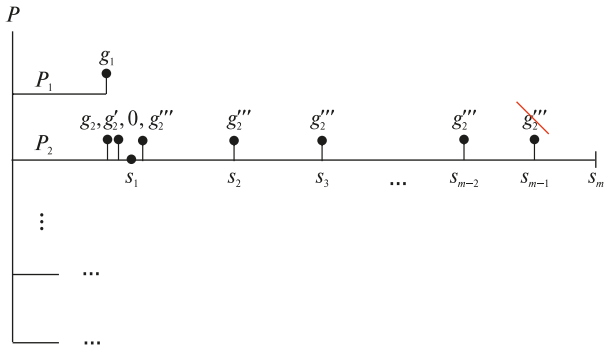


Рис. 2. Пример схемы значений для описания параметров процесса формирования событий; P_1 — первый параметр (статический); P_2 — второй параметр (динамический)

4. ПРИМЕР ПРОЦЕССА И СХЕМЫ ПАРАМЕТРОВ

В качестве примера рассмотрим процесс потребления, как в моделях управления запасами (с пополнением запаса до максимума), но с учетом того, что этот процесс использует параметры. Параметрами будут максимальный запас и спрос. Критический уровень запаса выбирается равным 0, так как он оказывается как бы мультиколлинеарен максимальному запасу, поэтому можно одновременно изменять их на одинаковое число, и результат от этого не изменится. Начальное и конечное время задаются вне модели (так как не являются ни параметрами, ни переменными). Модель процесса будет следующей:

```
1)  Максимальный запас = P[1];
2)  Спрос = P[2];
3)  Критический запас = 0;
4)  Время = Начальное время;
5)  Запас = Максимальный запас;
6)  Пока (Время ≤ Конечное время)
7)  {
8)      Запас = Запас — Спрос;
9)      Если (Запас ≤ Критический запас) то
10)     {
11)     Создать событие (Время, Максимальный запас — Запас);
12)     Запас = Максимальный запас;
13)     }
14)     Продвинуть время и обновить параметры;
15)     Максимальный запас = P[1];
16)     Спрос = P[2];
17) }
```

Функция «Создать событие» добавляет в выборку событие с заданным временем и значением. Процедура «Продвинуть время и обновить параметры» продвигает время на один шаг (в данном примере — на 1 день), обновление параметров происходит, как было описано ранее — похожим на численное интегрирование способом. Схема значений параметров процесса будет такой же, как на рис. 2, но только с двумя параметрами (первый параметр — статический, второй — динамический). Когда происходит обращение к параметрам, то возвращается значение, соответствующее текущему времени. Например, можно хранить обновленное значение в самом первом значении (g_2 — для второго параметра). Статические параметры не изменяются (не обновляются).

Забегая вперед, напомним, что процесс будет запускаться только на время появления заданного числа событий (например, пока не появится четыре события). В этом случае в условие остановки цикла надо добавить проверку того, что сформировалось заданное число событий.

5. ФУНКЦИЯ ПОТЕРЬ

Обозначим моменты появления событий как t_i и t_i — для наблюдений и для событий, полученных в результате функционирования модели процесса (моделирования). Каждое событие несет некоторую информацию/признак/воздействие[2] (например, объем покупки). Обозначим эти признаки как y_i и y_i — соответственно для исходных наблюдений и для событий, полученных в результате моделирования.

[2] Ограничимся случаем, когда каждое событие характеризуется только одним скалярным значением, а не вектором значений (обобщить не составит проблем).

Введем функцию потерь, которая будет показывать различия в двух выборках, исходной и сгенерированной. Рассчитаем квадраты отклонений. Но так как по каждому событию мы имеем две характеристики, то у нас будет несколько сумм:

$$S=\sum_{i=2}^{n}\left(t_i-t_i\right)^2+\mu\sum_{i=2}^{n}\left(y_i-y_i\right)^2, \tag{6}$$

где нумерация начинается со второго события, так как первое событие служит отправной точкой, с которой начинает функционировать модель процесса; μ — весовой коэффициент, необходимый для того, чтобы смешать в нужных пропорциях отклонения различных величин измерения; n — размер выборки. В качестве альтернативного варианта можно измерять квадраты относительных отклонений, в этом случае значения становятся безразмерными:

$$S=\sum_{i=2}^{n}\left(\frac{t_i-t_i'}{t_i-t_{i-1}}\right)^2+\mu\sum_{i=2}^{n}\left(\frac{y_i-y_i'}{y_i}\right)^2, \tag{7}$$

где для времени берется отношение к предыдущему интервалу времени между событиями, а для значений — отношение к наблюдаемому значению (можно делить на y_i', тогда будет определяться относительное отклонение наблюдения от прогнозного значения).

Чтобы восстановить параметры процесса можно было единственным способом, мы вводим штраф за гладкость (шероховатость) для каждого параметра с соответствующим весовым коэффициентом:

$$S=\sum_{i=2}^{n}\left(\frac{t_i-t_i'}{t_i-t_{i-1}}\right)^2+\mu\sum_{i=2}^{n}\left(\frac{y_i-y_i'}{y_i}\right)^2+\sum_{z=1}^{N_{\text{дин. пар.}}}\alpha_z\int_{s_1}^{s_m}\left(g_z''\ (t)\right)^2dt, \tag{8}$$

где z — номер одного из динамических параметров; $N_{\text{дин. пар.}}$ — число динамических параметров; $g_z''(t)$ — вторая производная от функции (сплайна) динамического параметра; α_z — коэффициент, с которым учитывается данный штраф в общей функции потерь (также известен как параметр сглаживания, или коэффициент α-регуляризации Тихонова). Обратим внимание на то, что этот штраф интегрирует абсолютные значения квадрата второй производной. Получается немного странная ситуация, когда при сравнении событий используются относительные отклонения, а штраф дает абсолютные значения. Значение для параметра сглаживания в этом случае надо выбирать намного меньше.

Если модель процесса не дает нужного числа событий, мы можем утверждать, что функция потерь обращается в бесконечность (надо дать шанс сформироваться нужному числу событий, для этого необходимо немного увеличить время моделирования, например, на величину, равную 10 временным интервалам между последними двумя событиями).

6. ОПТИМИЗАЦИЯ

Для оптимизации используем хорошо зарекомендовавший себя алгоритм Нелдера–Мида (Nelder, Mead 1965), который способен двигаться в направлении лучшего значения, даже если расчет целевой функции не всегда возможен. Оптимизацию необходимо производить на сетке, чтобы не застрять в одном локальном оптимуме, причем если при оптимизации мы покидаем заданную ячейку, то оптимизация прекращается и происходит поиск уже из следующей ячейки. Существует несколько других подходов[3] для оптимизации в условиях множества локальных экстремумов, но, по мнению автора, удобнее и понятнее использовать обычный поиск на сетке, тем более что исходные данные и некоторые представления о модели процесса могут подсказать, какой шаг сетки следует выбирать по каждой переменной.

По каждому динамическому параметру в начальном узле сплайна надо определить три значения, а в каждом последующем узле — по одному значению. Если каждое значение перебирается на сетке, то получается огромное число комбинаций значений параметров. Мы будем подбирать значения для такого числа узлов, чтобы получить только несколько событий, а не все сразу. На первом шаге мы подбираем параметры процесса на N событий вперед, и для этих параметров запускаем

[3] Генетические алгоритмы (Goldberg, 1989; Саймон, 2020) и разбросанный поиск (scatter search, поиск по разбросу) (Laguna, Marti, 2006). Разбросанный поиск применяется в оптимизаторе OptQuest, который используется во многих системах имитационного моделирования, включая Anylogic.

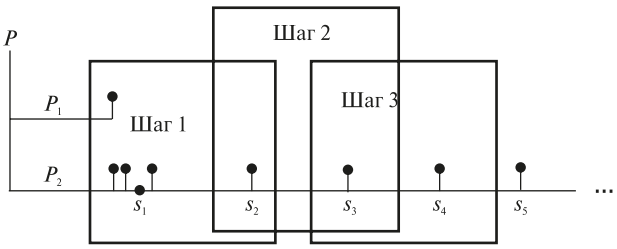


Рис. 3. Подбор параметров на $N = 2$ событий вперед

Примечание. На первом шаге перебирается пять параметров, на втором — два, на третьем — тоже два.

оптимизацию на сетке. На следующем шаге мы как бы сдвигаем скользящее окно на одну позицию (на одно событие) и начинаем подбирать параметры для вошедших N событий. Например, если $N = 2$, то на первом шаге подбираются параметры, отвечающие за образование первого и второго события[4], на втором шаге — второго и третьего, подбирая их на сетке.

Заметим, что в целевой функции учитываются как вошедшие, так и предшествующие, не вошедшие в скользящее окно, события (так как функция потерь строится на сравнении выборок событий). Параметры, отвечающие за образование предшествующих, не вошедших в окно событий, используются в оптимизации, но не на сетке. Мы предполагаем, что их определенные на предыдущем шаге значения лежат в нужном нам локальном оптимуме. На рис. 3 показано, какие параметры перебираются на сетке на каждом новом шаге для случая $N = 2$ (при условии, что узлы сетки s_k совпадают с наблюдениями).

На первом шаге на вход оптимизатора подается вектор из пяти значений (у параметра P_2 третье значение всегда 0), причем в качестве начальных точек берется полная комбинация всех возможных значений параметров. На втором шаге подается шесть значений, но число начальных комбинаций ограничено только комбинациями последних двух значений (в узлах s_2 и s_3 берется полная комбинация возможных значений, но на вход оптимизатора каждый раз подаются все значения, включая значения в узле s_1). То есть первые четыре значения также выбираются оптимизатором. Это позволяет избежать «эффекта бабочки», когда малые отклонения в начале приведут к огромным отклонениям в самом конце. На третьем шаге на вход оптимизатора подается семь значений, но комбинации определяются перебором на сетке только значений в узлах s_3 и s_4. Скользящее окно задает, для каких значений будет происходить полный перебор на сетке для того, чтобы определить начальные точки, из которых запускается оптимизация.

Можно сформулировать следующее предположение.

Предположение. *Параметры процесса, соответствующие событию, не зависят от событий, расположенных в более чем N позициях от текущего события.*

Иными словами, ранее запущенный алгоритм оптимизации нашел такой экстремум, который при добавлении новых событий и соответствующих им значений параметров может по-прежнему оказаться глобальным экстремумом при оптимизации на сетке новых добавленных значений. Это предположение может быть верно, так как восстанавливаемый динамический параметр (как функция) на одном участке может практически не зависеть от поведения этого же параметра на сильно удаленном участке.

Конечно, желательно определять размер N как можно большим, в идеале — равным размеру выборке, но это очень сильно повлияет на объем вычислений. Нужно найти некоторый баланс между временем выполнения всех расчетов и точностью определяемых параметров. Время выполнения первого шага может быть самым большим, так как на нем находится больше всего параметров, а время второго шага может быть наименьшим. С ростом номера шага время будет увеличиваться, так как процесс будет запускаться до тех пор, пока не образуется нужное число событий.

7. ПРИМЕР РАБОТЫ МЕТОДА

Рассмотрим работу метода на примере процесса потребления, описанного выше. В качестве начальных данных возьмем данные, образованные этим же процессом с некоторыми предустановленными параметрами (предполагаем их неизвестными). Нашей целью будет восстановить эти значения параметров, располагая только выборкой событий (табл. 1).

[4] Так как отправной точкой является время первого события, то первое образованное событие на самом деле будет вторым событием.

Таблица 1. Данные редких событий

t_i	y_i	t_i	y_i	t_i	y_i	t_i	y_i
03.01.2020	2429	30.04.2020	2526	17.07.2020	2508	09.10.2020	2418
25.01.2020	2461	14.05.2020	2500	29.07.2020	2466	24.10.2020	2457
22.02.2020	2465	26.05.2020	2556	09.08.2020	2418	12.11.2020	2478
11.03.2020	2528	06.06.2020	2402	21.08.2020	2484	10.12.2020	2409
26.03.2020	2462	19.06.2020	2574	05.09.2020	2517	31.12.2020	2478
12.04.2020	2481	03.07.2020	2437	23.09.2020	2467		

В качестве целевой используем функцию потерь с относительными отклонениями (8). Пусть определение дат событий t_i имеет большее значение, чем характеристика этого события y_i (объем покупки). Пусть $\mu = 0{,}1$ (вес суммы квадратов относительных отклонений y_i). Для штрафа за нелинейность примем коэффициент сглаживания, равный $\alpha = 10^{-6}$.

Прежде чем запускать алгоритм, следует определить, на сколько событий вперед N следует подбирать параметры. Если подбирать параметры на четыре события вперед, то первый шаг получается таким, как на рис. 4а, если на пять — как на рис. 4б (в табл. 2 и 3 показаны числовые результаты первого шага).

Так как алгоритм опирается только на значения целевой функции, рассчитываемые по отклонениям полученных событий от выборки наблюдений, алгоритм не осознает, что на рис. 4а функция потребления оказалась ниже среднего уровня. В случае $N = 4$ алгоритм подобрал максимальный запас, равный 1992, что позволило с меньшим потреблением сформировать события, расположенные близко к имеющимся наблюдениям. Ситуация немного улучшится, если продолжить выполнять алгоритм на следующих шагах (при $N = 4$), но когда скользящее окно сдвинется на одно событие, параметры в первом узле могут оказаться в локальном минимуме; при этом они перестанут перебираться на сетке. Картина заметно улучшается, если определять параметры процесса сразу на $N = 5$ событий вперед. Пятое событие вносит нужную информацию, позволяющую точнее определить начальные параметры. Далее результаты приводятся для случая $N = 5$.

На втором шаге скользящее окно событий сдвигается вправо, и для пяти событий осуществляется подбор параметров, учитывающих значения параметров, найденных для первого сформированного события. Значения параметров, определенные для этого события, подставляются в оптимизатор, «как есть», а для значений параметров, необходимых для образования следующих пяти событий, берется множество возможных комбинаций значений, оптимизация запускается для каждой такой комбинации.

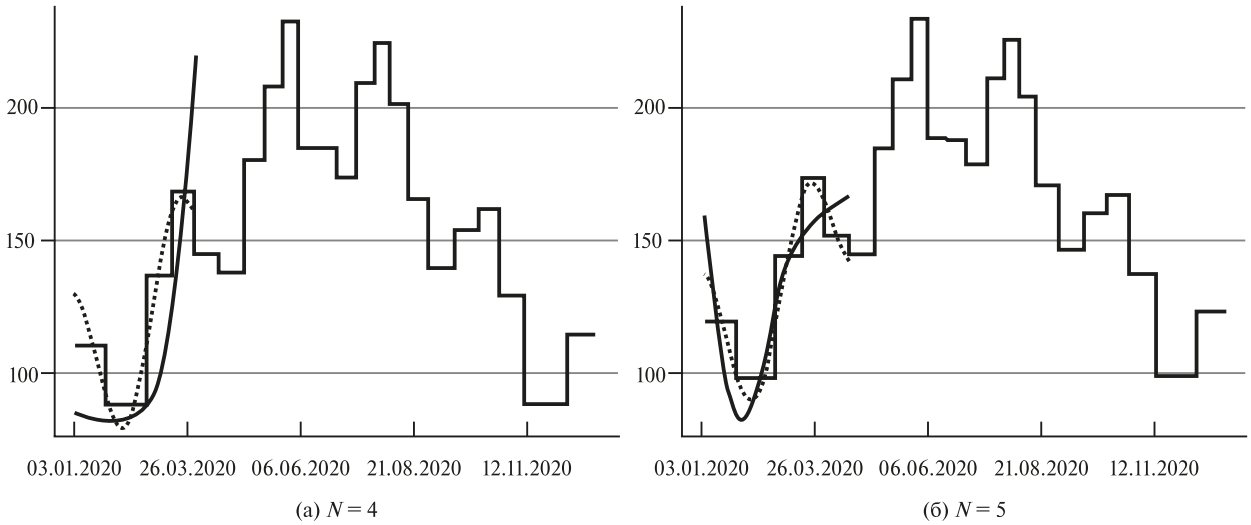


Рис. 4. Первый шаг алгоритма определения параметров на четыре и пять событий вперед

Примечание. Гладкая сплошная линия показывает восстановленное значение скорости потребления $g_2(t)$ (шт./день); пунктирная — искомую функцию потребления, заложенную в модель; ступенчатая — среднее потребление $y_i / (t_i + 1 - t_i)$; площадь под каждой ступенькой будет объемом покупки y_i.

Таблица 2. Значения параметров после первого шага алгоритма

Параметр	Значение	
	$N = 4$	$N = 5$
Максимальный запас (истинное значение 2400)	g_1=1992,141	$g_1 = 2371,628$
Начальная скорость потребления	$g_2(s_1) = 85,084$	$g_2(s_1) = 153,222$
Первая производная скорости потребления	$\dot{g}_2(s_1) = -0,21103$	$\dot{g}_2(s_1) = -4,8323$
Третья производная скорости потребления в узле s_1	$\dddot{g}_2(s_1) = -6,5058 \times 10^{-4}$	$\dddot{g}_2(s_1) = 1,4825 \times 10^{-2}$
Третья производная скорости потребления в узле s_2	$\dddot{g}_2(s_2) = -6,5419 \times 10^{-4}$	$\dddot{g}_2(s_2) = -1,4202 \times 10^{-2}$
Третья производная скорости потребления в узле s_3	$\dddot{g}_2(s_3) = 1,8618 \times 10^{-2}$	$\dddot{g}_2(s_3) = 5,6984 \times 10^{-5}$
Третья производная скорости потребления в узле s_4	$\dddot{g}_2(s_4)$ выражается через предыдущие значения	$\dddot{g}_2(s_4) = 4,0556 \times 10^{-3}$
Третья производная скорости потребления в узле s_5	–	$\dddot{g}_2(s_5)$ выражается через предыдущие значения

Таблица 3. Полученные события после первого шага алгоритма

События	Дата					
Исходные	03.01.2020	25.01.2020	22.02.2020	11.03.2020	26.03.2020	12.04.2020
$N - 4$	–	26.01.2020	20.02.2020	12.03.2020	25.03.2020	–
$N - 5$	–	24.01.2020	22.02.2020	11.03.2020	27.03.2020	12.04.2020
	Значения (объем покупки)					
Исходные	2429	2461	2465	2528	2462	2481
$N - 4$	–	1992,141	2079,106	2116,739	2169,692	–
$N - 5$	–	2386,468	2485,890	2378,407	2413,642	2532,705

Это позволяет кардинально пересмотреть ранее полученные значения параметров, попавших в скользящее окно (события со второго по пятое). Значения параметров для первого образованного события также изменяются при оптимизации, но уже только относительно полученных на первом шаге значений. Так, значение максимального запаса изменилось с ранее определенного 2371,628 на 2410,712. На третьем шаге скользящее окно вновь сдвигается на одну позицию и перебором на сетке определяются новые значения параметров, попавшие в это скользящее окно, а также корректируются значения параметров, в него не вошедшие.

Аналогично алгоритм выполняет все последующие шаги и останавливается после 18 шага, когда будут подобраны все значения параметров, необходимые для формирования 22 событий. Результат работы алгоритма после шагов 2 и 3 изображены на рис. 5, а за 18 шагов — на рис. 6. В табл. 4 показаны события, образованные в результате функционирования процесса, с подобранными параметрами. Только в 1 из 22 событий дата события отличается на 1 день. Значения событий (объемы покупок) отличаются в каждом событии от исходных очень незначительно (в большинстве событий меньше, чем на 1%, и только в последних событиях — на 2 и 3%).

Таблица 4. Полученные события после 18 шага

События	Дата					
Исходные	Полное совпадения в 21 из 22 событий; только для события с датой 12.11.2020 процесс определил событие на день раньше (11.11.2020)					
Процесс						
	Значения (объем покупки)					
Исходные	2429	2461	2465	2528	2462	2481
Процесс	–	2468,564	2472,071	2547,122	2464,828	2494,400
Исходные	2526	2500	2556	2402	2574	2437
Процесс	2545,614	2511,836	2566,986	2411,377	2585,020	2445,382
Исходные	2508	2466	2418	2484	2517	2467
Процесс	2498,655	2470,175	2406,726	2462,082	2515,078	2523,396
Исходные	2418	2457	2478	2409	2478	
Процесс	2489,236	2509,046	2522,387	2406,723	2575,255	

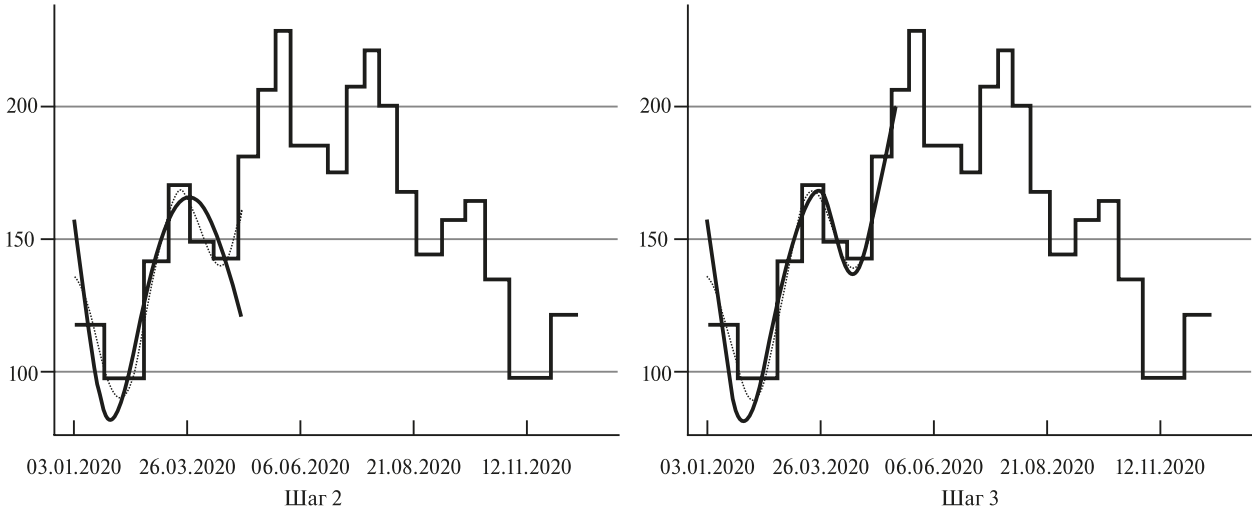


Рис. 5. Результат работы алгоритма после второго и третьего шагов

В результате применения данного метода получилось вполне надежно определить параметры процесса, который был задан лишь обычным алгоритмом, один параметр алгоритма был статическим, а второй динамическим. Напомню, что мы искали скорость расхода продукции не у себя, а у не подконтрольного нам клиента. В (Кораблев, 2020) математическим методом также получалось восстановить скорость потребления (программная реализация в (Korablev, 2022)), но сейчас мы определили даже размер запаса и объемы покупок.

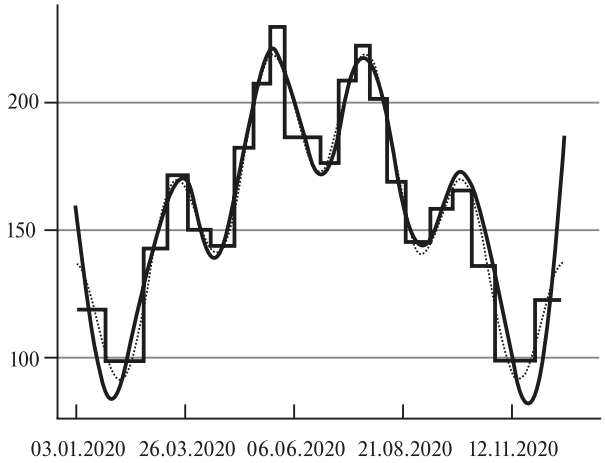


Рис. 6. Результат работы алгоритма после 18 шагов

Стоит обратить внимание на то, что благодаря использованию скользящего окна событий у нас получилось разделить одну большую оптимизационную задачу огромной размерности на небольшое число задач значительно меньшей размерности (трудоемкость немного увеличивается с номером шага). Если бы мы подбирали значения параметров для всех событий из выборки, то трудоемкость задачи была бы астрономической и мы не смогли бы за приемлемое время осуществить необходимые вычисления.

8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Ключевой особенностью предложенного метода является способность восстанавливать параметры выбранного процесса образования событий, причем не только как статические, а как динамические параметры, которые плавно изменяются со временем. Существуют исследования, где моделируются процессы образования событий (например, в моделях управления запасами), но вот исследований, где восстанавливаются параметры процессов по имеющейся выборке, тем более в виде динамических функций, автор не встречал. В данном исследовании целью является не просто моделировать процесс образования событий, а именно восстановить его параметры.

В нашем примере для более глубокого понимания был взят процесс потребления, но на его место можно было поместить любой другой процесс образования событий с иным набором параметров и с произвольным алгоритмом. В методе сравнивается лишь выходной поток событий (с их информационными характеристиками), ограничений на способ формирования событий мы не делали. Однако модель этого процесса должна позволять однозначно находить значения этих параметров. Так, в нашем примере мы были вынуждены отказаться от определения значения

критического уровня запасов — иначе он бы информационно смешивался с максимальным запасом и нельзя было бы с помощью имеющихся данных отделить один от другого. Исследования на тему, как формировать такие алгоритмические модели, автору не попадались.

В отличие от чисто математических моделей представление процессов в виде алгоритмических моделей дает значительно большую гибкость (практически бесконечную) при исследовании редких событий. Получается некоторая задача регрессии алгоритмов. Если классические регрессионные задачи опираются на математические (алгебраические) модели и определение параметров происходит методом наименьших квадратов аналитически, то сейчас мы используем алгоритмические модели и опираемся на численные методы оптимизации. Интересно, станет ли в будущем такой подход в исследованиях столь же популярным, как эконометрика?

В нашем случае при оптимизации функции потерь мы ограничились обычной оптимизацией на сетке, чтобы не застревать только на одном локальном оптимуме. И этого было вполне достаточно, чтобы мы успешно справились со своей задачей. Однако можно применять и более сложные методы оптимизации, — такие как разбросанный поиск (scatter search) или генетические алгоритмы. Возможно, они позволят быстрее находить глобальный оптимум и, возможно, не будут перебирать лишние неправильные комбинации параметров. Исследователи свободны выбирать любые известные им средства оптимизации.

Как отмечалось в начале статьи, целью определения параметров процесса является дальнейшее прогнозирование будущих событий, но прежде необходимо произвести экстраполяцию параметров процессов на будущее. Экстраполяцию параметров процесса можно производить любым известным методом, можно осуществлять поиск закономерности параметров с такими внешними наблюдаемыми факторами, как ВВП, курс рубля, безработица и т.д. Определив, как будут вести себя параметры процесса в будущем, не составит труда запустить сам процесс и получить выборку будущих событий.

Можно пойти дальше и дополнительно предположить, что процесс является полностью неизвестным и требуется подобрать как процесс, так и его параметры, не опираясь ни на что, кроме как на исходную выборку редких событий. В этом случае можно даже создать особый механизм перебора моделей из некоторого множества операторов. У автора есть некоторые соображения по этому поводу, но данное исследование уже получилось достаточно объемным.

Сам по себе анализ и прогнозирование редких событий в экономике является важной и очень актуальной задачей. Способность разбираться в процессах образования событий позволит влиять на эти процессы и контролировать появление самих событий (если мы имеем возможность управлять этими процессами). В то же время, если мы не можем повлиять на процессы, мы сможем подготовиться к появлению будущих событий, что позволит либо извлечь определенную выгоду, либо уменьшить возможные потери. В русле этого направления исследований можно даже создать специальное направление обучения в экономике, которое бы готовило соответствующих аналитиков, открывать научные лаборатории и проводить научные исследования как для государственных структур, так и для бизнеса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

Кораблев Ю.А. (2020). Метод восстановления функции по интегралам для анализа и прогнозирования редких событий в экономике // *Экономика и математические методы*. М.: ЦЭМИ РАН. Т. 56. № 3. С. 113–124. DOI: 10.31857/S042473880010485-2 [**Korablev Yu.A.** (2020). The function restoration method by integrals for analysis and forecasting of rare events in the economy. *Economics and Mathematical Methods*, 56, 3, 113–124 (in Russian).]

Кораблев Ю.А., Голованова П.С., Кострица Т.А. (2020). Емкостный метод анализа редких событий в сфере услуг // *Экономическая наука современной России*, 90, 3, 132–142. DOI: 10.33293/1609-1442-2020-3(90)-132-142. [**Korablev Yu.A., Golovanova P.S., Kostritsa T.A.** (2020). Capacity method of rare events analysis in the area of services. *Economics of Contemporary Russia*, 90, 3, 132–142 (in Russian).]

Саймон Д. (2020). Алгоритмы эволюционной оптимизации. Биологически обусловленные и популяционно-ориентированные подходы к компьютерному интеллекту. Пер. с англ. А.В. Логунова. М.: ДМК Пресс. 1002 с. [**Simon D.** (2020). *Evolutionary optimization algorithms. Biologically-inspired and population-based approaches to computer intelligence*. Translated from the English by A.V. Logunov. Originally published by Willey, 2013 (in Russian).]

Carreno A., Inza I., Lozano J. (2020). Analyzing rare event, anomaly, novelty and outlier detection terms under the supervised classification framework. *Artificial Intelligence Review*, 53, 3575–3594. DOI:10.1007/s10462-019-09771-y

Goldberg D.E. (1989). *Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning*. Boston: Addison-Wesley. 432 p.

Halim S.Z., Quaddus N., Pasman H. (2021). Time-trend analysis of offshore fire incidents using nonhomogeneous Poisson process through Bayesian inference. *Process Safety and Environmental Protection*, 147, 421–429. DOI:10.1016/J.PSEP.2020.09.049

Kaya G.O., Sahin M., Demirel O.F. (2020). Intermittent demand forecasting: A guideline for method selection. *Sadhana — Academy Proceedings in Engineering Sciences*, 45, 1, 45–51. DOI: 10.1007/s12046-020-1285-8

Korablev Yu. A. (2022). Restoration of function by integrals with cubic integral smoothing spline in R. *ACM Transactions on Mathematical Software.* (In print). DOI: 10.1145/3519384

Laguna M., Marti R. (2006). Scatter Search. In: *Metaheuristic procedures for training neutral network*s, 139–152. DOI: 10.1007/0-387-33416-5_7

Nelder J.A., Mead R. (1965). A simplex method for function minimization. *The Computer Journal*, 7, 308–313. DOI: 10.1093/comjnl/7.4.308

Pince C., Turrini L., Meissner J. (2021). Intermittent demand forecasting for spare parts: A critical review. *Omega,* 105, 102513. DOI:10.1016/j.omega.2021.102513

Willemain T.R., Smart Charles N., Schwarz Henry F. (2004). A new approach to forecasting intermittent demand for service parts inventories. *International Journal of Forecasting*, 20, 3, 375–387. DOI: 10.1016/S0169-2070(03)00013-X

Willemain T.R., Park D.S., Kim Y.B., Shin K.I. (2001). Simulation output analysis using the threshold bootstrap. *European Journal of Operational Research*, 134, 1, 17–28. DOI: 10.1016/S0377-2217(00)00209-5

Determination of parameters for the formation process of rare events in the economy for their subsequent forecasting

© 2021 Yu.A. Korablev

Yu.A. Korablev,
Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, Russia; email: yura-korablyov@yandex.ru

Received 05.11.2021

This study was supported by the Russian Foundation for Basic Research (project 19-010-00154).

Abstract. The article presents a method for determining unknown parameters of the process that forms rare events in the economy. The idea behind the study of rare events in economy is to consider these events not just from a statistical point of view, but from the point of view of the processes that form these events, moreover, as well as a process can be an arbitrary algorithm. Such an event generation process will use parameters, which can be static or dynamic. For example, if we consider the consumption process, which forms discrete purchases of an uncontrolled customer, then such parameters can be the maximum stock and a dynamically changing consumption rate. In general, the process can be arbitrary and possess various parameters. The task is to determine these parameters of an unknown process obtaining only a sample of rare events. The idea of the method is to minimize the loss function, which is determined based on the differences between the events generated during the operation of the process and events from the initial sample of observations. Each event, in addition to the time of occurrence, is also characterized by additional information, for example, the purchase volume. We are trying to find out such parameters of such a process that would allow us to get a very similar sample of events. The dynamic parameters of the process are set in the form of cubic splines of a special structure. For an unambiguous determination of each dynamic parameter, a roughness penalty of the corresponding splines is introduced into the objective function. An example of a process and its structure of parameters to be determined is shown. Optimization is performed numerically, based on the Nelder–Mead algorithm, which runs on a grid to determine the global optimum. The process parameters are determined in steps, at the beginning just to get a few events, then the next events. That allows one large optimization task to be divided into a sequence of simple tasks, this significantly reduces the overall complexity. An assumption is described that must be fulfilled for such a technique to be valid. An example of determining unknown parameters is considered on the example of the consumption process. After determining the process parameters, one can proceed to extrapolation of parameters and forecast future events.

Keywords: rare events, process of event formation, determination of process parameters, events forecast, simulation modeling, optimization, Nelder–Mead algorithm.

JEL Classification: C1, C15, C4, C5, C53.

For reference: **Korablev Yu.A.** (2022). Determination of parameters for the formation process of rare events in the economy for their subsequent forecasting. *Economics and Mathematical Methods*, 58, 2, 80–91. DOI: 10.31857/S042473880020016-6

ЭКОНОМИКА И МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ, 2022, том 58, № 2, с. 92–96

МАТЕМАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЭКОНОМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

Predicting the trajectory of economic cycles

© 2022 V.A. Karmalita

V.A. Karmalita,
Private consultant; Canada; e-mail: karmalita@videotron.ca

Received 17.01.2022

Abstract. This paper deals with the development of a method for predicting the trajectory of a pseudo-stationary fragment of the economic cycle. The latter is represented by discrete values (readouts) of random oscillations of the income function. The statistical equivalence of these readouts and second-order autoregression (Yule series) led to the adaptation of the autoregressive model to the specified fragment of the cycle. It is proposed to use the adapted autoregressive model as a tool for predicting cycle values via the method of statistical tests (Monte-Carlo) by forming the most probable cycle trajectory. The procedure for the formation of the cycle trajectory is described in detail and its parameters have formal justifications. The content of the subsequent statistical analysis of the simulation results is illustrated by the example of determining the instant of the predicted peak value of the cycle. The presented method is applicable in macroeconomic and econometric problems, the solution to which requires knowledge of the predicted trajectory of the cycle under consideration.

Keywords: economic cycle, random oscillations, Yule series, maximum likelihood estimates, pseudo-stationarity, cycle trajectory.

JEL Classification: C02, C15, C22.

For reference: **Karmalita V.A.** (2022). Predicting the trajectory of economic cycles. *Economics and Mathematical Methods*, 58, 2, 92–96. DOI: 10.31857/S042473880020017-7

INTRODUCTION

Economy of a specified territory (region, country, world) is a mega-system with very slow processes that can last for years or even decades. Human participation in the implementation of these processes makes it possible to influence the trajectory of economic development in real time. For the conscious management of economic processes, it is necessary to know the mechanism of its formation. Knowledge about such a mechanism is formalized, as a rule, in the form of its mathematical model.

The model of economic cycles, as proposed in reference (Karmalita, 2020), is based on a probabilistic description of the investment function and the perception of the economic system as a material object with certain inherent properties. In accordance with this approach, the investment function $I(t)$ is the sum of all ($N < \infty$) existing investments, each of which is represented in the form shown in Fig. 1.

Here C_j, ΔC_j, and T_j are the initial capital, return and duration of the jth investment cycle. Formally, the function $I(t)$ is the sum with two terms:

$$I(t) = \sum_{j=1}^{N} I_j(t) = M(t) + E(t), \tag{1}$$

where $M(t)$ is the deterministic component of the investment function, and $E(t)$ is the stochastic one. This means that $M(t)$ forms a long-term trend of income, whose oscillations $\Xi(t)$ are induced by fluctuations $E(t)$ in investments.

As for the system model itself, it represents the cycle as random oscillations generated by a linear elastic system with the natural frequency $f_0 = 1/T_0$ and damping factor h under the influence of the Gaussian white noise $E(t)$ (Bolotin, 1984). Mathematically, the cycle model is represented by an ordinary differential equation of the second order:

$$\ddot{\Xi}(t) + 2h\dot{\Xi}(t) + (2\pi f_0)^2 \Xi(t) = E(t), \tag{2}$$

where $\Xi(t)$ represents random oscillations of income, and $E(t)$ — fluctuations of investments in the form of white noise. This model provides the ability to manage a cycle trajectory via spurring/curbing of only those investments that have durations correlated to the cycle period T_0 (Karmalita, 2020). To clarify this approach,

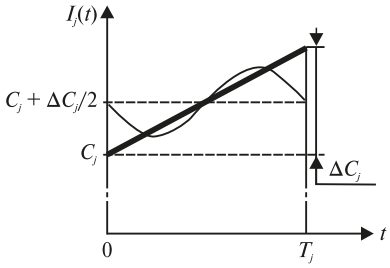


Fig. 1. Diagram of the jth investment cycle

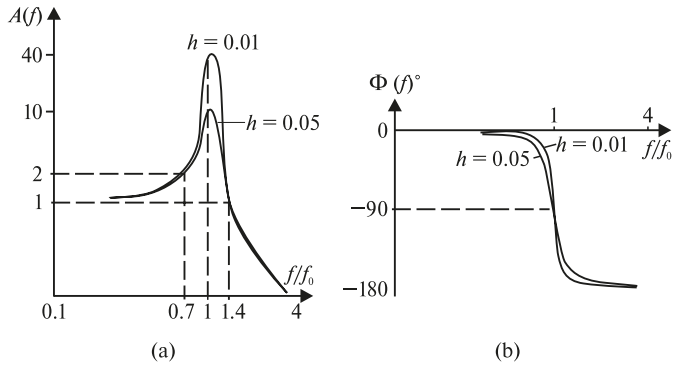


Fig. 2. Amplitude and phase frequency characteristics of the linear elastic system

let us turn to the variable values of the investment cycle (Fig. 1), which correspond to the period of the so-called sawtooth function $F(t)$. This periodic function can be represented by the infinite Fourier series:

$$F(t) = \frac{\Delta C_j}{\pi} \sum_{l=1}^{\infty} \sin(2\pi l t / T_j) / l.$$

In particular, the first ($l = 1$) harmonic $\sin(2\pi t/T_j)$ is shown in Fig. 1. This means that the concept of the frequency (period) of the economic cycle is quite applicable to the analysis of economic systems. Therefore, consider the properties of the linear elastic system in the frequency domain, which are described by its amplitude $A(f)$ and phase $\Phi(f)$ frequency characteristics (Fig. 2).

$A(f)$ determines the ratio of the amplitudes of the input and output harmonics of the system. $\Phi(f)$ is the difference between their phases, which is equivalent to the time delay of the output process with respect to the input process.

Fig. 2a clearly demonstrates that the main part of the range ($\pm 3\sigma_\xi$) of income oscillations is formed by investment fluctuations concentrated in the frequency range $0.7 \le f/f_0 \le 1.4$. This fact allows targeted management of the cycle affecting only investments with the following durations T_j: $T_0 / 1.4 \le T_j \le T_0 / 0.7$.

From Fig. 2b it follows that these actions lead to a tangible change in the intensity of the considered cycle $\Xi(t)$ with a time delay of a quarter of the cycle period ($T_0/4$). Therefore, the practical application of the above approach assumes advanced (at least, by half cycle period) knowledge of moment t_p of the cycle peak. This fact determines the purpose of this article — the development of a method for predicting the trajectory of the economic cycle.

PREDICTING THE TIME OF THE CYCLE PEAK

We'll proceed from the fact that there is a fragment of the income function $X(t)$ on the interval $t_0,..., t_c$, where t_c is the current moment of time. Moreover, this fragment is assumed to be pseudo-stationary (Karmalita, 2020), that is, the evolutionary change in the parameters of model (2) over indicated time interval corresponds to the statistical variability of their estimates with a confidence level P. Further, we assume that the fragment has a discrete representation with a sampling interval Δt: $x_i = X(t_i) = X(i\Delta t)$, $i = 1,..., n$.

Recall that values ξ_i of the business cycle may be formed from readouts x_i of the income function by means of a filter with the bandwidth $f_1(0.7f_0)$, ..., $f_2(1.4f_0)$: $\xi_i = \sum_{l=1}^{q} c_l x_{i-l}$.

In reference (Karmalita, 2020), a discrete model of random oscillations $\Xi(t)$ is proposed in the form of the second-order autoregressive model AR(2):

$$\xi_i = a_1\xi_{i-1} + a_2\xi_{i-2} + \varepsilon_i. \quad (3)$$

The random process generated by model (3) is called the Yule series. From the condition of its statistical equivalence to the random oscillation readouts, the relationship between the parameters of model (2) and the coefficients of model (3) was established in the form of the following expressions (Karmalita, 2020):

$$h = -0.5\ln(-a_2)/\Delta t; \;\; f_0 \approx (2\pi\Delta t)^{-1}\cos^{-1}\left(a_1 / 2\sqrt{-a_2}\right). \quad (4)$$

Thus, the problem of predicting the trajectory of the economic cycle is reduced to calculating the subsequent values of the AR(2) process. The initial values of these calculations are readouts ξ_{n-1} and ξ_n from the pseudo-stationary fragment of the concerned cycle.

To implement the procedure for predicting the cycle trajectory, it is necessary to adapt model (3) to the empiric values of ξ_i ($i = 1, ..., n$). Recall that for the first two correlations of the Yule series, it is possible to compose the Yule–Walker system of equations (Box et al., 2015): $\rho_1 = a_1 + a_2\rho_1$; $\rho_2 = a_1\rho_1 + a_2$.

This system of equations can be represented in the matrix form as:

$$\mathbf{B}\times\mathbf{A} = \mathbf{P}, \tag{5}$$

where

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \end{pmatrix}, \mathbf{P} = \begin{pmatrix} \rho_1 \\ \rho_2 \end{pmatrix}, \mathbf{B} = \begin{pmatrix} 1 & \rho_1 \\ \rho_1 & 1 \end{pmatrix}.$$

Implementation of the Cramer's rule for solving this system yields a relationship of Yule model factors with series correlations: $a_1 = \rho_1\left(1-\rho_2\right)/\left(1-\rho_1^2\right)$, $a_2 = \left(\rho_2-\rho_1^2\right)/\left(1-\rho_1^2\right)$.

Therefore, the use of maximum likelihood estimates (*MLE*s) for covariances and correlations of random oscillation ξ_i in the forms (Brandt, 2014): $\tilde{\gamma}_k = \frac{1}{n-k}\sum_{i=1}^{n-k}\xi_i\xi_{i+k}$, and $\tilde{\rho}_k = \tilde{\gamma}_k / \tilde{\gamma}_0$ provides the following *MLE*s of the coefficients of the AR(2) model:

$$\tilde{a}_1 = \frac{\tilde{\rho}_1\left(1-\tilde{\rho}_2\right)}{1-\tilde{\rho}_1^2},\ \tilde{a}_2 = \frac{\tilde{\rho}_2-\tilde{\rho}_1^2}{1-\tilde{\rho}_1^2}. \tag{6}$$

Hereinafter, the symbol «~» denotes the estimates of the corresponding parameters (coefficients). The presence of estimates (6) allows, using expression (4), to estimate the frequency f_0:

$$\tilde{f}_0 = 1/\tilde{T}_0 \approx \left(2\pi\Delta t\right)^{-1}\cos^{-1}\left(0.5\tilde{a}_1/\sqrt{-\tilde{a}_2}\right).$$

The adapted model $\xi_j = \tilde{a}_1\xi_{j-1} + \tilde{a}_2\xi_{j-2} + \varepsilon_j$ makes it possible to form the cycle realization $\xi_{n+1},\ldots,\xi_{n+m}$ ($m = 1.5\tilde{T}_0/\Delta t$). The stochastic nature of investment fluctuations $E(t)$ predetermines the implementation of this procedure via the method of statistical tests, in which ε_j is simulated by random numbers. In other words, modeling of the cycle trajectory can be carried out by the Monte Carlo method (Mazhdrakov et al., 2018). To utilize this method, one can use a pseudo-random number generator (*PRNG*) which is available in the software of modern computers. The numbers thus formed are called pseudo-random, since they are only approximations of true random numbers, at least because they have a period of repetition of their values.

The essence of statistical tests is as follows. Operator AR(2) with estimates $\tilde{a}_1$ and $\tilde{a}_2$ can be considered as a model of a corresponding elastic system with input ε_j and output ξ_j (Fig. 3).

In other words, the processing of values ξ_{j-1}, ξ_{j-2}, and ε_j by the operator AR(2) yields the value ξ_j corresponding to the time instant t_j.

Recall that the random numbers ε_j have a Gaussian distribution with a zero mathematical expectation and the root-mean-square (*rms*) value $\sigma_\varepsilon = \sigma_\xi/K_\sigma$, where K_σ is the *rms* gain of the system (Karmalita, 2020). Considering the above expression for estimate $\tilde{\gamma}_{k=0} = \tilde{\sigma}_\xi^2$, as well as the expression for $\tilde{K}_\sigma$ in the form $\tilde{K}_\sigma = \sqrt{\left(1-\tilde{a}_2\right)/\left\{\left(1+\tilde{a}_2\right)\left[(1-\tilde{a}_2)^2-\tilde{a}_1^2\right]\right\}}$, we can write $\tilde{\sigma}_\varepsilon = \tilde{\sigma}_\xi/\tilde{K}_\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^{n}\xi_i^2/n}/\tilde{K}_\sigma$.

Therefore, m-fold repetition the calculations of the value ξ_j forms the predicted income oscillations $\xi_{n+1},\ldots,\xi_{n+m}$. As an example, Fig. 4 shows the trajectory of the process $\xi_j = 1.47\,\xi_{j-1} - 0.83\xi_{j-2} + \varepsilon_j$, which is represented by 10 readouts per period T_0 of the simulated cycle.

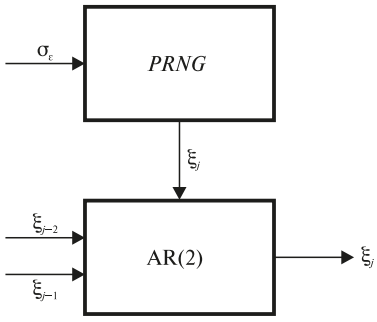


Fig. 3. Statistical simulation of the future cycle values

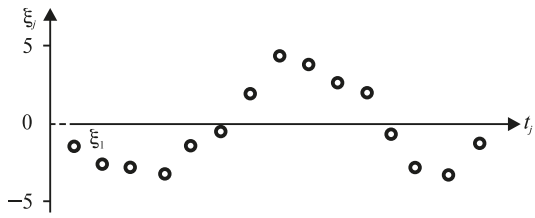


Fig. 4. Readouts of the predicted cycle trajectory

Due to the randomness of ξ_j values, the Monte-Carlo method should provide a representative set of ξ_{jl} ($l = 1, ..., k$) for each time t_j. Determining the predicted cycle peak is a statistical inference (Zacks, 1981), which is usually made by analyzing the properties of some statistics calculated from the values of the empirical data in question. In our case, such statistics will be the average value of simulated readouts ξ_{jl}:

$$\bar{\xi}_j = \sum_{l=1}^{k} \xi_{jl} / k. \quad (7)$$

As an example, consider the value $\xi_1 = -1.32$ shown in Fig. 4. During statistical tests with $k = 15$, the readouts ξ_{1l} were in the range $-2.62, ..., 0.08$, and their average value was $\bar{\xi}_1 = -1.04$. Hence, it becomes necessary to correctly choose the number (k) of generated realizations $\xi_{(n+1)\,l}, ..., \xi_{(n+m)l}$.

We can make this choice based on the following condition. Let the scatter of the statistics $\bar{\xi}_j$ not exceed the first order of smallness of σ_ξ, that is, $\sigma_{\bar{\xi}_j} < \sigma_\xi / 10$. Then, considering that *rms* values of variables in expression (7) are linked via $\sqrt{k}$ (Brandt, 2014), we get the value of $k > 100$.

The realization of estimates $\bar{\xi}_j$ obtained from the results of statistical tests makes it possible to determine the parameters of the predicted trajectory. For example, the moment of time t_p is found by enumerating the values $\bar{\xi}_j$ until the largest one is obtained.

CONCLUSIONS

This paper presents a statistical approach for predicting the trajectory of a pseudo-stationary fragment of the economic cycle, represented by readouts of income oscillations. It is based on the use of second order autoregression to simulate the cycle trajectory. The autoregressive model adapted to the specified cycle fragment turned out to be an effective tool for predicting cycle values. The method of statistical tests (Monte-Carlo) was used for the model's implementation. The corresponding procedure for the formation of the cycle trajectory is described in detail. The proposed rules for choosing the parameters of this procedure have formal justification. The subsequent statistical analysis of the simulation results has also been established. As the statistics $\bar{\xi}_j$ is an estimate of the mathematical expectation (mode) of the Gaussian distribution, the generated realization of estimates $\bar{\xi}_j$ can be classified as the most probable trajectory of the cycle. Accordingly, the parameters of the trajectory, for example, the moment of its peak (t_p), will also be the most likely.

The developed method is applicable in macroeconomic and econometric problems, the solution of which requires knowledge of the predicted trajectory of the cycle under consideration.

REFERENCES

Bolotin V.V. (1984). *Random vibrations of elastic systems*. Heidelberg: Springer. 468 p.

Box G.E.P., Jenkins G.M., Reinsel G.C., Ljung G.M. (2015). *Time series analysis: Forecasting and control*. 5th ed. Hoboken, New Jersey: Willey. 712 p.

Brandt S. (2014). *Data analysis: Statistical and computational methods for scientists and engineers*. 4th ed. Cham, Switzerland: Springer. 523 p.

Karmalita V. (2020). *Stochastic dynamics of economic cycles*. Berlin: De Gruyter. 106 p.

Mazhdrakov M., Benov D., Valkanov N. (2018). *The Monte Carlo method: Engineering applications*. Cambridge: ACMO Academic Press. 250 p.

Zacks S. (1981). *Parametric statistical inference: Basic theory and modern approaches*. New York: Pergamon. 404 p.

Прогнозирование траектории экономических циклов

© 2022 г. В.А. Кармалита

В.А. Кармалита,
частный консультант, Канада; e-mail: karmalita@videotron.ca

Поступила в редакцию 17.01.2022

Аннотация. Статья посвящена разработке метода прогноза траектории псевдостационарного фрагмента экономического цикла, представленного дискретными отсчётами случайных колебаний функции доходов. Статистическая эквивалентность последних процессу авторегрессии второго порядка (ряд Юла) обусловила применение модели этого ряда для прогноза траектории цикла. Реализация этой процедуры осуществляется методом статистических испытаний (Монте-Карло) с целью формирования наиболее вероятной траектории цикла. Определены как формальные параметры этих испытаний, так и содержание последующего статистического анализа результатов моделирования. Представленный в работе подход иллюстрируется примером определения момента наступления прогнозируемого пикового значения цикла. Разработанный метод применим в макроэкономических и эконометрических задачах, требующих знания прогнозируемой траектории рассматриваемого цикла.

Ключевые слова: экономический цикл, случайные колебания, ряд Юла, оценки максимального правдоподобия, псевдостационарность, траектория цикла.

Классификация JEL: C02, C15, C22.

Для цитирования: **Karmalita V.A.** (2022). Predicting the trajectory of economic cycles // *Экономика и математические методы*. Т. 58. № 2. С. 92–96. DOI: 10.31857/S042473880020017-7

ЭКОНОМИКА И МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ, 2022, том 58, № 2, с. 97–111

МАТЕМАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЭКОНОМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

Статическая модель рынка разработки программного обеспечения на основе транспортной задачи с нефиксированными добавками по времени

© 2022 г. И.А. Лесик, А.Г. Перевозчиков

И.А. Лесик,
НПО «РусБИТех», Москва; e-mail: lesik56@mail.ru

А.Г. Перевозчиков,
НПО «РусБИТех», Москва; e-mail: pere501@yandex.ru

Поступила в редакцию 29.11.2021

Аннотация. Предлагается постановка дискретно-непрерывной статической модели рынка разработок программного обеспечения на базе транспортной задачи (ТЗ) с нефиксированными добавками (НД) по времени. В отличие от существующей ТЗ с фиксированными доплатами (ФД) по стоимости предлагается минимаксная постановка ТЗ с временами, которые могут содержать часть, пропорциональную объемам назначений. Таким образом, это гибридная постановка ТЗ с ФД по стоимости и классической ТЗ по времени. Такие задачи возникают при ограниченности суммарного объема транспортных средств на каждом маршруте, которые приходится использовать многократно, плюс фиксированная добавка, возникающая с учетом задержки принятия логистических решений. Показано, что такая задача может быть аппроксимирована сверху классической ТЗ по времени, которую можно получить и по схеме, использованной М.Л. Балински. Приводится точный алгоритм метода ветвей и границ, основанный на геометрической интерпретации задачи, распадающейся на подзадачи на непустых гранях многогранного множества допустимых решений, являющиеся задачами выпуклого программирования, которые можно численно решить субградиентным методом, описанным Б.Т. Поляком. К таким же задачам сводится вычисление нижних оценок критерия. Показано, что функция наилучших значений критерия на гранях не является суб- или супермодулярной, как функция подмножества пар индексов, соответствующих положительным значениям объемов перевозки, что делает невозможным применение методов супермодулярного программирования. В статье рассматривается ε-оптимальная полиномиальная версия метода ветвей и границ, полученная по аналогии с решением многомерной задачи о назначениях, и дан числовой пример ее использования. Приводится интерпретация ТЗ с НД как обобщенной задачи о назначении с нефиксированными скидками по цене, учитывающими разницу между оптовой и розничной ценой. Описывается применение ТЗНД для построения цифровых платформ на рынке разработки программного обеспечения для загрузки заданий исполнителям.

Ключевые слова: транспортная задача с нефиксированными добавками по времени, аппроксимация классической транспортной задачей, геометрическая интерпретация, метод ветвей и границ, нижние оценки критерия, ε-оптимальная версия метода ветвей и границ.

Классификация JEL: O12, C51.

Для цитирования: **Лесик И.А., Перевозчиков А.Г.** (2022). Статическая модель рынка разработки программного обеспечения на основе транспортной задачи с нефиксированными добавками по времени // *Экономика и математические методы*. Т. 58. № 2. С. 97–111. DOI: 10.31857/S042473880019969-4

ВВЕДЕНИЕ

В статье рассматривается задача определения оптимальных планов назначения исполнителей по работам в статической модели рынка разработки программного обеспечения (РПО) на базе транспортной задачи (ТЗ) с фиксированными добавками (ФД) по времени. В отличие от существующей ТЗ с ФД по критерию минимума стоимости (Корбут, Финкильштейн, 1969) мы предлагаем использовать минимаксный критерий, как в классической ТЗ по времени, но с временами, которые кроме фиксированных добавок могут содержать часть, пропорциональную объемам назначения, т.е. гибридную постановку ТЗ с ФД по стоимости и классической ТЗ по времени. Такие

задачи возникают при ограниченности суммарного объема транспортных средств, которые приходится использовать многократно, и при наличии некоторой фиксированной добавки, возникающей с учетом задержки принятия логистических решений цифровой платформой. В существующих платформах PBS[1], LSF[2], NQE, I-SOFT (Ding et al., 2012), EASY[3] (What is Condor? 2006), LoadLeveler[4] (IBM Tivoli Workload Scheduler LoadLeveler, 2007) для решения транспортной задачи и ее частного случая — задачи о назначениях — рассматривается в основном статический вариант с горизонтом планирования, равным одному периоду. Поэтому в настоящей работе мы сосредоточились на ТЗ с НП по времени. Такая схема будет более общей, чем построенная на основе ЗН на УМ, поскольку предполагает наличие переменной части времени, пропорциональной объемам поставок по соответствующему маршруту.

Для цифровых платформ на рынке РПО частные показатели интерпретируются как цена одного дня для каждого назначения, которая может учитывать скидку на объем поставки. Таким образом, учитывается не только базовая розничная цена, но и скидка на опт. Оптимизация производится в интересах цифровой платформы, которая является как бы оптовым поставщиком и хотела бы продавать свой ресурс в розницу насколько это возможно. В результате возникает максиминная задача максимизации наименьшей цены поставки. Это позволяет учесть разницу между оптовой и розничной ценой, которая может быть для каждого назначения определена построением соответствующего линейного тренда по ретроспективным данным. Поэтому предложенная ТЗ с НД является уточнением ЗН на УМ в части разницы между оптовыми и розничными ценами.

Практическая значимость работы связана с использованием статической модели для распределения ресурсов и заданий на рынке РПО для создания соответствующих цифровых трансакционных платформ (Устюжанина, Дементьев, Евсюков, 2021). Несмотря на постоянное увеличение объема сделок, на рынке РПО отсутствуют глобальные платформы по типу указанных выше универсальных платформ распределения заданий PBS, LSF, NQE, I-SOFT, EASY, LoadLeveler. Такие платформы могли быть применены в динамическом алгоритме загрузки заданий хотя бы для получения начального плана, который в динамической модели является элементом управления. Это приводит к большому числу посредников в цепочке, ведущей от заказчика к исполнителю, что влечет уменьшение стоимости работ для исполнителя до 10 раз по сравнению со стоимостью, которую готовы были платить заказчики. Таким образом, создание цифровой платформы на рынке РПО могло бы привести к более справедливому распределению доходов и росту общественного благосостояния. Максимизация же последнего равносильна, как известно, определению глобального равновесия на рынке РПО в соответствии с теоремой нобелевского лауреата Дебре (Debreu, 1954).

В общетеоретическом плане концепция равновесия (Макаров, Рубинов, 1973) на распределенном рынке однородного товара относится к мезоэкономике (Мезоэкономика развития, 2011) и лежит в основе синтеза транспортной системы многоузлового конкурентного рынка с переменным спросом и предложением (Васин, Григорьева, Лесик, 2017, 2018; Васин, Григорьева, Цыганов, 2017).

Основным результатом работы являются исследование статической ТЗ с НД по времени. Показано, что поставленная дискретно-непрерывная задача может быть аппроксимирована сверху классической ТЗ по времени, которую можно получить и по схеме, разработанной в (Balinski, 1961). Приводится точный алгоритм метода ветвей и границ (МВГ) и модельный пример его использования. Рассматривается ε-оптимальная версия метода ветвей и границ, полученная по аналогии с решением многомерной задачи о назначениях (Корбут, Финкильштейн, 1969), и особенности ее использования.

[1] PBS Works (официальный сайт компании Altair Engineering, Inc, 2006, http://www.pbsworks.com/).

[2] Platform LSF 7 Update 6. «An overview of new features for platform LSF administrors» (официальный сайт компании Platform Computing Corporation, 2009, http://www. platform.com/workload-management/ whotsnew_lst7u6.pdf).

[3] «What is Condor?» (официальный сайт продукта Condor, 2006, http://www.cs.wisc.edu/condor/description.html).

[4] IBM Tivoli Workload Scheduler LoadLeveler (официальный сайт компании «Интерфейс», 2007, http://www.interface.ru/home.asp?artId=6283).

1. ПОСТАНОВКА ТРАНСПОРТНОЙ ЗАДАЧИ С НЕФИКСИРОВАННЫМИ ДОБАВКАМИ ПО ВРЕМЕНИ

Пусть, как в обычной транспортной задаче, $i=1,\ldots,m$ — пункты производства некоторого однородного товара, $j=1,\ldots,n$ — пункты его потребления. Даны величины: $a_i>0$ — объем производства в пункте производства i; $b_j>0$ — объем потребления в пункте потребления j, — отнесенные к одному периоду времени (горизонту планирования).

Требуется составить план перевозок $x=\{x_{ij}\}$ объемов перевозок из пункта i в пункт j, удовлетворяющий обычным транспортным ограничениям

$$x_{ij}\ge 0, \sum_{j=1}^{n} x_{ij}=a_i, \sum_{i=1}^{m} x_{ij}=b_j, \quad i\in M=\{1,\ldots,m\}, \quad j\in N=\{1,\ldots,n\} \tag{1}$$

и минимизирующий общее время перевозки

$$I(x)=\max_{(i,j):x_{ij}>0} \tau_{ij}(x_{ij})\to \inf, \tag{2}$$

где предполагается, что $\sum_{i=1}^{m} a_i=\sum_{j=1}^{n} b_j$, а частные временные показатели под знаком максимума задаются формулами

$$\tau_{ij}(x_{ij})=\begin{cases} 0, & x_{ij}=0; \\ T_{ij}+t_{ij}x_{ij}/V_{ij}, & x_{ij}>0; \end{cases} \tag{3}$$

T_{ij} — постоянные затраты времени, необходимые для организации перевозки по данному маршруту; t_{ij} — время перевозки за одну ездку; V_{ij} — суммарный объем транспортных средств на данном маршруте; x_{ij}/V_{ij} — число поездок, необходимое для перевозки объема x_{ij}.

Простейшие примеры показывают, что функция связанного максимума (3) может быть разрывной (Федоров, 1979). При этом справедлива следующая лемма.

Лемма 1. *Функция связанного максимума $I(x)$ полунепрерывна снизу в допустимой области* (1).

Д о к а з а т е л ь с т в о. Пусть дана последовательность $x^n\to x^0$ и $B(x^0)=\{(i,j): x_{ij}^0>0\}$, тогда для всех достаточно больших n выполняются неравенства $x_{ij}^n>0 \quad \forall (i,j)\in B(x^0)\Rightarrow B(x^n)\supseteq B(x^0)$, откуда следует

$$\max_{(i,j)\in B(x^n)} f_{ij}(x_{ij})\ge \max_{(i,j)\in B(x^0)} f_{ij}(x_{ij})\Rightarrow \lim_{x\to\infty}\inf I(x^n)\ge \lim_{x\to\infty}\inf \max_{(i,j)\in B(x^0)} f_{ij}(x_{ij})=I(x^0).$$

Причем последнее равенство верно в силу непрерывности частных показателей.

Замечание 1. В силу доказанного утверждения инфимум в постановке задачи (1)–(3) можно заменить на минимум.

Задачу (1)–(3) назовем транспортной задачей с нефиксированными добавками (ТЗНД) по времени, в отличие от транспортной задачи с фиксированными доплатами (ТЗФД) по стоимости (Корбут, Финкильштейн, 1969).

2. АППРОКСИМАЦИЯ ЗАДАЧИ

Введение дополнительных целочисленных переменных в ТЗНД (1)–(3) по времени позволит нам свести задачу к классической ТЗ по времени. Для ТЗФД такой способ был указан в (Balinski, 1961), и он подходит для ТЗНД (1)–(3) по времени, но в нем будут присутствовать некоторые особенности. Положим $M_{ij}=\min\{a_i,b_j\},\ i=1,\ldots,m,\ j=1,\ldots,n.$

Рассмотрим частично-целочисленную задачу минимизации

$$\max_{(i,j)}(T_{ij}y_{ij}+t_{ij}x_{ij}/V_{ij})\to \min \tag{4}$$

при условиях (1) и дополнительных условиях

$$y_{ij}=0,1;\ x_{ij}\le M_{ij}y_{ij}. \tag{5}$$

Тогда задача (1), (4), (5) эквивалентна исходной задаче (1)–(3) и может быть аппроксимирована сверху (по значению) классической ТЗ по времени:

$$\max_{(i,j)}(T_{ij}y_{ij}+t_{ij}x_{ij}/V_{ij})\le \max_{(i,j)}(T_{ij}+t_{ij}M_{ij}/V_{ij})y_{ij}=\max_{(i,j);x_{ij}>0}(T_{ij}+t_{ij}M_{ij}/V_{ij})\to \min \tag{6}$$

при условиях (1). Справедлива следующая лемма.

Лемма 2. *Задача* (1)–(3) *аппроксимируется сверху по значению обычной транспортной задачей* (1), (6) *по времени*.

Замечание 2. В частном случае задачи о назначениях $M_{ij} = 1$ задача (1)–(3) эквивалентна обычной ТЗ (1), (4), (7) по времени, в чем легко убедиться непосредственной проверкой.

Замечание 3. В частности, когда $a_i \equiv 1,\ b_i \equiv 1$ $(m = n)$, имеем задачу о назначениях на узкие места (Форд, Фалкерсон, 1966).

3. МЕТОД ВЕТВЕЙ И ГРАНИЦ

Для точного решения дискретно-непрерывной задачи (1)–(3) разобьем допустимое многогранное множество на непустые грани и возьмем их относительные внутренности (Сухарев, Тимохов, Федоров, 1986). Каждая такая грань получается фиксированием подмножеством $B \subset M \times N$ пар индексов (i, j), на которых соответствующие переменные удовлетворяют условиям:

$$x_{ij} > 0,\ (i,j) \in B,\ x_{ij} = 0,\ (i,j) \notin B. \tag{7}$$

Положим

$$I_B = \inf_{x \in \bar{X}_B} \max_{(i,j) \in B} \tau_{ij}(x_{ij}). \tag{8}$$

Здесь $X_B \subseteq X$ — подмножество допустимых решений X ограничений (1), удовлетворяющих дополнительным ограничениям (7). Поскольку относительные внутренности непустых граней непусты $(X_B \neq \phi)$ (Сухарев, Тимохов, Федоров, 1986, с. 65), то замыкание $\bar{X}_B$ подмножества $X_B \subseteq X$ получается заменой строгих неравенств (7) нестрогими (Федоров, 1979, с. 30):

$$x_{ij} \geq 0,\ (i,j) \in B,\ x_{ij} = 0,\ (i,j) \notin B, \tag{9}$$

задача (1), (7), (8) равносильна задаче

$$I_B = \min_{x \in \bar{X}_B} I_B(x) = \min_{x \in \bar{X}_B} \max_{(i,j) \in B} \tau_{ij}(x_{ij}). \tag{10}$$

Задача (1), (9), (10) является задачей выпуклого программирования, поэтому исходная задача (1)–(3) сводится к решению задач выпуклого программирования на непустых гранях. Справедлива следующая лемма.

Лемма 3. *Минимальное значение I общего показателя в задаче* (1)–(3) *получается как наименьшее значение I_B задачи* (10) *по всем $B \subset M \times N$*.

Поскольку это комбинаторная задача, то в общем случае для точного решения необходимо использовать метод ветвей и границ. Узлы поискового орграфа можно отождествить с подмножествами $\bar{B} \subset M \times N$, дополняющими множества B в $M \times N$. Ориентированной дугой связываются любые два подмножества $\bar{B}' \supseteq \bar{B}''$, отличающихся одним элементом.

Спрашивается, как получить нижние оценки в ТЗНД по времени. Для этого можно снять все ограничения $x_{ij} = 0$ в данном узле поискового орграфа, но оставить тот же критерий с теми же функциями и в том же количестве под знаком максимума, который следует минимизировать на всем допустимом множестве X. Тогда показатель не изменится, а множество расширится, в результате минимум станет меньше. Полученная задача является задачей выпуклого программирования, которая может быть решена методом Б.Т. Поляка (Поляк, 1983).

Для вычисления I_B в узлах поискового орграфа можно снять равенства в ограничениях (9) при помощи штрафной функции (Федоров, 1979):

$$L_B(x) = \sum_{(i,j) \in \bar{B}} x_{ij}^2. \tag{11}$$

Тогда приходим к показателю

$$J_B(x) = I_B(x) + CL_B(x), \tag{12}$$

который также следует минимизировать на всем допустимом множестве X. Здесь $C > 0$ — достаточно большая константа.

В силу линейности частных показателей в (10) и выпуклости (11) показатель (12) представляет собой выпуклую функцию такого же типа, как при вычислении нижних оценок.

Теперь мы выясним, сколько может быть нулевых переменных x_{ij}. Поскольку имеем $mn-m-n+1=(m-1)(n-1)$ независимых переменных, то нулевых переменных может быть не более $(m-1)(n-1)$ и размерность граней может принимать соответственно значения $0,1,\ldots,(m-1)(n-1)-1$ в невырожденном случае.

4. ПРИМЕР ТОЧНОГО РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Пример 1. Предположим, что $a=(5,4)$, $b=(2,4,3)$, а исходные матрицы имеют вид:

$$T=\begin{pmatrix}1&2&3\\4&3&2\end{pmatrix},\ t=\begin{pmatrix}3&2&5\\2&4&5\end{pmatrix},\ V=\begin{pmatrix}2&4&3\\2&4&3\end{pmatrix},\ — \tag{13}$$

тогда

$$M=\begin{pmatrix}2&4&3\\2&4&3\end{pmatrix}.$$

Рассмотрим сначала основной случай, когда все $x_{ij}>0$. Тогда, исключая зависимые переменные в первом столбце и первой строке, приходим к показателю

$$\begin{gathered}I(x)=\max\Big\{\big(T_{11}+t_{11}\{a_1-(b_2-x_{22})-(b_3-x_{23})\}/V_{11}\big),\ \ \big(T_{21}+t_{21}(a_2-x_{22}-x_{23})/V_{21}\big),\\ \big(T_{12}+t_{12}(b_2-x_{22})/V_{12}\big),\big(T_{13}+t_{13}(b_3-x_{23})\big/V_{13}\big),\ \ \big(T_{22}+t_{22}x_{22}/V_{22}\big),\ \ \big(T_{23}+t_{23}x_{23}/V_{23}\big)\Big\}\to\min\end{gathered} \tag{14}$$

при ограничениях

$$a_1-(b_2-x_{22})-(b_3-x_{23})\ge 0,\ a_2-x_{22}-x_{23}\ge 0,\ b_2-x_{22}\ge 0,\ b_3-x_{23}\ge 0,\ x_{22},\ x_{23}\ge 0,$$

или $a_2\ge x_{22}+x_{23}\ge b_2+b_3-a_1$, $b_2\ge x_{22}\ge 0$, $b_3\ge x_{23}\ge 0$, или с учетом значения параметров

$$4\ge x_{22}+x_{23}\ge 2,\ 4\ge x_{22}\ge 0;\ 3\ge x_{23}\ge 0. \tag{15}$$

С учетом значений параметров общий показатель (14) примет вид:

$$\begin{gathered}I(x)=\max\Big\{[3(x_{22}+x_{23})/2-2],\ [8-x_{22}-x_{23}],\\ [4-x_{22}/2)],\ [8-5x_{23}/3],\ [3+x_{22}],\ [2+5x_{23}/3]\Big\}\to\min.\end{gathered} \tag{16}$$

Мы видим, что согласно (15) значение 4 входит в область значений всех частных показателей, стоящих под знаком максимума в (16) (рис. 1). Построим линии уровней частных показателей с этим значением, тогда из соображений, в какую сторону будут сдвигаться линии при росте значения переменных, решение задачи локализуется в конфликтной области

$$4\ge x_{22}+x_{23},\ x_{22}\ge 1;\ 2{,}4\ge x_{23}\ge 1{,}2.$$

Перебирая возможные варианты уравнивания соответствующих частных показателей, убеждаемся, что единственное решение соответствует системе

$$8-\frac{5}{3}x_{23}=3+x_{22}\Rightarrow\frac{10}{3}x_{23}=6\Rightarrow x_{23}=1{,}8;$$

$$2+\frac{5}{3}x_{23}=3+x_{22}\Rightarrow 3+x_{22}=5\Rightarrow x_{22}=2.$$

При этом общее значение уравненных частных показателей равно $3+x_{22}\approx 3+2=5$. Не вошедший в тройку уравненных показателей частный показатель будет $8-x_{22}-x_{23}=8-3{,}8=4{,}2<5$,следовательно, остальные частные показатели, не вошедшие в четверку конфликтующих, будут заведомо иметь значения меньше 5, что и требовалось проверить.

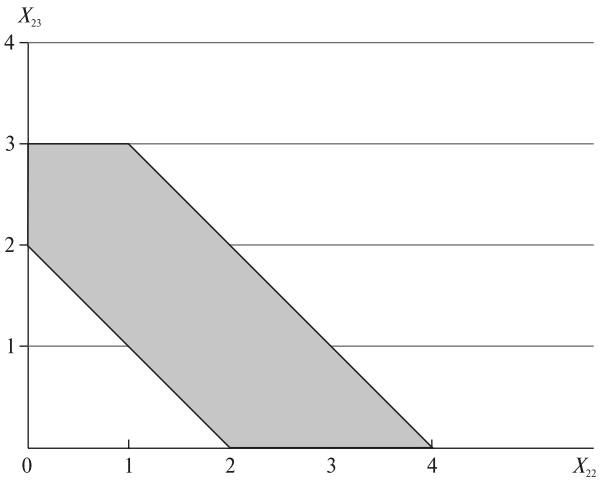


Рис. 1. Допустимая область независимых переменных в примере 1

Замечание 4. Аналогично разбираются остальные случаи, когда какие-то $x_{ij}=0$. Это соответствует одномерным отрезкам границы

и вершинам, т.е. 5+5 = 10 случаев! Согласно лемме 3 решение ТЗНД по времени сводится к ее решению на всех гранях.

Приведем соответствующие расчеты и вычислим нижние оценки в узлах поискового орграфа, необходимые в примере размера 2 × 3 работы МВГ, и значения критерия в полученных точках для отсева неперспективных вариантов и их наследников.

0-мерные грани

Узел 1.

$$x_{22}=4,\ x_{23}=0\Rightarrow \tau_{11}=3(x_{22}+x_{23})/2-2=4;\ \tau_{12}=4-x_{22}/2=2;\ \tau_{13}=8-5x_{23}/3=8;$$
$$\tau_{21}=8-x_{22}-x_{23}=4;\ \tau_{22}=3+x_{22}=7;\ \tau_{23}=2+5x_{23}/3=2;\ x_{11}=x_{22}+x_{23}-2=2;$$
$$x_{12}=4-x_{22}=0;\ x_{13}=3-x_{23}=3;\ x_{21}=4-x_{22}-x_{23}=0;\ x_{22}=4;\ x_{23}=0\Rightarrow \max(4,8,7)=8>5.$$

Нижняя оценка получается в результате решения задачи

$$\max(3(x_{22}+x_{23})/2-2,\ 8-5x_{23}/3,\ 3+x_{22})\to\min. \tag{17}$$

Здесь минимум берется по всей допустимой области значений переменных. Минимум достигается на прямой $8-5x_{23}/3=3+x_{22}\Leftrightarrow x_{22}+5x_{23}/3=5$, когда общее значение $3+x_{22}$ минимально, т.е. при $x_{22}=0\Rightarrow x_{23}=3$, когда $3+x_{22}=3$. Это и есть минимальное значение показателя в задаче (17), равное нижней оценке в узле 1.

Точка, в которой достигается нижняя оценка, имеет два нуля $x_{22},x_{13}=0$, поэтому значение критерия равно максимуму показателей для других переменных $\max(2,5;4;5;7)=7$.

Узел 2.

$$x_{22}=2,\ x_{23}=0\Rightarrow \tau_{11}=1{,}5(x_{22}+x_{23})-2=1;\ \tau_{12}=4-0{,}5x_{22}=3;$$
$$\tau_{13}=8-5x_{23}/3=8;\ \tau_{21}=8-x_{22}-x_{23}=6;\ \tau_{22}=3+x_{22}=5;\ \tau_{23}=2+5x_{23}/3=2;$$
$$x_{11}=x_{22}+x_{23}-2=0;\ x_{12}=4-x_{22}=2;\ x_{13}=3-x_{23}=3;$$
$$x_{21}=4-x_{22}-x_{23}=0;\ x_{22}=2;x_{23}=0;\Rightarrow \max(3,8,6,5)=8>5.$$

Нижняя оценка получается в результате решения задачи

$$\max(4-x_{22}/2,\quad 8-5x_{23}/3,\quad 8-x_{22}-x_{23},\quad 3+x_{22})\to\min. \tag{18}$$

Здесь минимум берется по всей допустимой области значений переменных. Перебирая возможные варианты уравнивания соответствующих частных показателей, убеждаемся, что единственное решение соответствует системе

$$8-5x_{23}/3=8-x_{22}-x_{23}\Rightarrow x_{22}=5-5x_{23}/3=75/21=1{,}429;$$
$$3+x_{22}=8-x_{22}-x_{23}\Rightarrow 2x_{22}+x_{23}=5\Rightarrow x_{23}=15/7\approx 2{,}143.$$

При этом общее значение уравненных частных показателей равно $8-x_{22}-x_{23}\approx 4{,}429$, не вошедший в тройку уравненных показателей (18) — $4-x_{22}/2\approx 3{,}285<4{,}429$. Значит, остальные частные показатели будут заведомо меньше 4,429, что и требовалось проверить. Это и есть минимальное значение показателя в задаче (18), равное нижней оценке в узле 2.

Точка, в которой достигается нижняя оценка, не имеет нулей x_{ij}, поэтому значение критерия равно максимуму показателей для всех переменных $\max(3{,}358;3{,}286;4{,}428;4{,}428;4{,}428;5{,}572)=5{,}572$.

Узел 3.

$$x_{22}=0,x_{23}=2\Rightarrow \tau_{11}=3(x_{22}+x_{23})/2-2=1;\ \tau_{12}=4-x_{22}/2=4;\ \tau_{13}=8-5x_{23}/3=14/3;$$
$$\tau_{21}=8-x_{22}-x_{23}=6;\ \tau_{22}=3+x_{22}=3;\ \tau_{23}=2+5x_{23}/3=16/3;\ x_{11}=x_{22}+x_{23}-2=0;$$
$$x_{12}=4-x_{22}=4;\ x_{13}=3-x_{23}=1;\ x_{21}=4-x_{22}-x_{23}=2;\ x_{22}=0;x_{23}=2\Rightarrow \max(4,\ 14/3,\ 6,\ 16/3)=6>5.$$

Нижняя оценка получается в результате решения задачи

$$\max(4-x_{22}/2,\ 8-5x_{23}/3,\ 8-x_{22}-x_{23},\ 2+5x_{23}/3)\to\min. \tag{19}$$

Здесь минимум берется по всей допустимой области значений переменных. Перебирая возможные варианты уравнивания соответствующих частных показателей, убеждаемся, что единственное решение соответствует системе

$$8-5x_{23}/3=8-x_{22}-x_{23}\Rightarrow x_{23}=18/10=1{,}8;$$
$$2+5x_{23}/3=8-x_{22}-x_{23}\Rightarrow 8-x_{22}-x_{23}=5\Rightarrow x_{22}=1{,}2.$$

При этом общее значение уравненных частных показателей равно $8-x_{22}-x_{23}=5$, не вошедший в тройку уравненных показателей (19) — $4-0,5x_{22}=3,4<5$. Значит, остальные частные показатели будут заведомо меньше 5, что и требовалось проверить. Это и есть минимальное значение показателя в задаче (19), равное нижней оценке в узле 3.

Точка, в которой достигается нижняя оценка, не имеет нулей x_{ij}, поэтому значение критерия равно максимуму показателей для всех переменных $\max(2,25;3,4;5;5;4,2;5)=5$.

Узел 4.

$$x_{22}=0, x_{23}=3 \Rightarrow \tau_{11}=3(x_{22}+x_{23})/2-2=5/2;\ \tau_{12}=4-x_{22}/2=4;\ \tau_{13}=8-5x_{23}/3=3;$$
$$\tau_{21}=8-x_{22}-x_{23}=5;\ \tau_{22}=3+x_{22}=3;\ \tau_{23}=2+5x_{23}/3=7;\ x_{11}=x_{22}+x_{23}-2=1;$$
$$x_{12}=4-x_{22}=4;\ x_{13}=3-x_{23}=0;\ x_{21}=4-x_{22}-x_{23}=1;\ x_{22}=0; x_{23}=3 \Rightarrow \max(5/2,4,5,7)=7>5.$$

Нижняя оценка получается в результате решения задачи

$$\max(3(x_{22}+x_{23})/2-2,\ 4-x_{22}/2,\ 8-x_{22}-x_{23},\ 2+5x_{23}/3) \to \min. \tag{20}$$

Здесь минимум берется по всей допустимой области значений переменных. Минимум достигается на прямой $8-x_{22}-x_{23}=2+5x_{23}/3 \Leftrightarrow x_{22}+8x_{23}/3=6$, когда общее значение $2+5x_{23}/3$ минимально, т.е. при $x_{23}=1,2$, когда $x_{22}=2,8$ и $2+5x_{23}/3=4$. Это и есть минимальное значение показателя в задаче (20), равное нижней оценке в узле 4.

Точка, в которой достигается нижняя оценка, не имеет нулей x_{ij}, поэтому значение критерия равно максимуму показателей для всех переменных $\max(4;2,6;6;4;5,8;4)=6$.

Узел 5.

$$x_{22}=1, x_{23}=3 \Rightarrow \tau_{11}=3(x_{22}+x_{23})/2-2=4;\ \tau_{12}=4-x_{22}/2=7/2;\ \tau_{13}=8-5x_{23}/3=3;$$
$$\tau_{21}=8-x_{22}-x_{23}=4;\ \tau_{22}=3+x_{22}=4;\ \tau_{23}=2+5x_{23}/3=7;\ x_{11}=x_{22}+x_{23}-2=2;$$
$$x_{12}=4-x_{22}=3;\ x_{13}=3-x_{23}=0;\ x_{21}=4-x_{22}-x_{23}=0;\ x_{22}=1;\ x_{23}=3 \Rightarrow \max(4,7/2,4,7)=7>5.$$

Нижняя оценка получается в результате решения задачи

$$\max\left(3(x_{22}+x_{23})/2-2,\ 4-x_{22}/2,\ 3+x_{22},\ 2+5x_{23}/3\right) \to \min. \tag{21}$$

Здесь минимум берется по всей допустимой области значений переменных. Минимум достигается на прямой $3+x_{22}=2+5x_{23}/3 \Leftrightarrow x_{22}=5x_{23}/3-1$, когда общее значение $3+x_{22}$ минимально, когда $x_{22}+x_{23}=2$, откуда $8x_{23}/3=3 \Rightarrow x_{23}=9/8=1,125 \Rightarrow x_{22}=2-x_{23}=0,875$ и $3+x_{22}=3,875$. Это и есть минимальное значение показателя в задаче (21), равное нижней оценке в узле 5. При этом $4-x_{22}/3 \approx 3,562<3,875$, что и требовалось проверить.

Точка, в которой достигается нижняя оценка, имеет два нуля $x_{13}=0$, поэтому значение критерия равно максимуму показателей для других переменных $\max(4;3,5;4;7)=7$.

1-мерные грани

Узел 6.

$$2<x_{22}<4,\ x_{23}=0 \Rightarrow \tau_{11}=3(x_{22}+x_{23})/2-2<4;\ \tau_{12}=4-x_{22}/2<3;\ \tau_{13}=8-5x_{23}/3=8;$$
$$\tau_{21}=8-x_{22}-x_{23}<6;\ \tau_{22}=3+x_{22}<7;\ \tau_{23}=2+5x_{23}/3=2;\ x_{11}=x_{22}+x_{23}-2=x_{22}->0;$$
$$x_{12}=4-x_{22}>0;\ x_{13}=3-x_{23}=3;\ x_{21}=4-x_{22}-x_{23}=4-x_{22}>0;\ x_{22}>2; x_{23}=0; \Rightarrow \max(4,3,8,6,7,8)=8>5.$$

Нижняя оценка:

$$\max(3(x_{22}+x_{23})/2-2,\ 4-x_{22}/2,\ 8-5x_{23}/3,\ 8-x_{22}-x_{23},\ 3+x_{22}) \to \min, \tag{22}$$

минимум берется по всей допустимой области значений переменных. Перебирая возможные варианты уравнивания соответствующих частных показателей, убеждаемся, что единственное решение соответствует системе

$$8-5x_{23}/3=8-x_{22}-x_{23} \Rightarrow x_{22}=5-5x_{23}/3=75/21=1,429;$$
$$3+x_{22}=8-x_{22}-x_{23} \Rightarrow 2x_{22}+x_{23}=5 \Rightarrow x_{23}=15/7 \approx 2,143.$$

При этом общее значение уравненных частных показателей равно $8-x_{22}-x_{23} \approx 4,429$, а не вошедшие в тройку уравненных показателей (22)

$$3(x_{22}+x_{23})/2-2 \approx 3,358<4,429, 4-x_{22}/2 \approx 3,285<4,429.$$

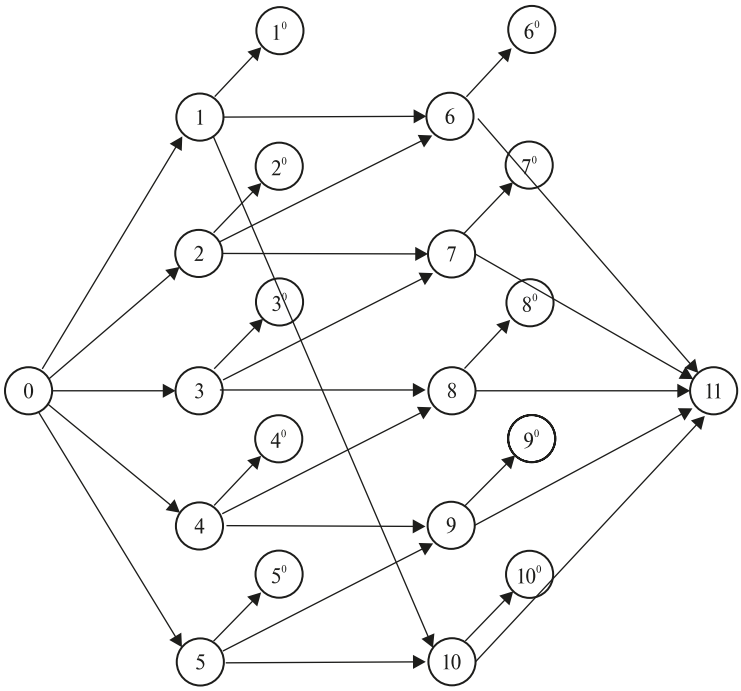


Рис. 2. Поисковый орграф в примере 1

Значит, остальные частные показатели будут заведомо меньше 4,429, что и требовалось проверить. Это и есть минимальное значение показателя в задаче (22), равное нижней оценке в узле 6.

Точка, в которой достигается нижняя оценка, не имеет нулей x_{ij}, поэтому значение критерия равно максимуму показателей для всех переменных $\max(3,358; 3,286; 4,428; 4,428; 4,428; 5,572) = 5,572$, как в вершине 2.

Узел 7.

$$x_{22}, x_{23} > 0,\ x_{22} + x_{23} = 2 \Rightarrow \tau_{11} = 3(x_{22} + x_{23})/2 - 2 = 1;\ \tau_{12} = 4 - x_{22}/2 < 4;\ 14/3 < \tau_{13} = 8 - 5x_{23}/3 < 8;$$
$$\tau_{21} = 8 - x_{22} - x_{23} = 6;\ 3 < \tau_{22} = 3 + x_{22} < 5;\ 2 < \tau_{23} = 2 + 5x_{23}/3 < 16/3;\ x_{11} = x_{22} + x_{23} - 2 = 0;$$
$$x_{12} = 4 - x_{22} > 2;\ x_{13} = 3 - x_{23} > 1;\ x_{21} = 4 - x_{22} - x_{23} = 2;\ x_{22} > 0; x_{23} > 0;\ \Rightarrow \max(6, 8 - 5x_{23}/3) \to \inf,$$
$$0 < x_{23} < 2 \Rightarrow 6 = 8 - 5x_{23}/3,\ x_{23} = 6/5 \Rightarrow \max = 6 > 5.$$

Нижняя оценка

$$\max(4 - x_{22}/2, 8 - 5x_{23}/3, 8 - x_{22} - x_{23}, 3 + x_{22}, 2 + 5x_{23}/3) \to \min \tag{23}$$

равна 5. Это показывается так же, как в основном случае, когда все переменные положительны. Основной случай обозначим узлом 11, чтобы в построенном орграфе дуги вели от вершин с меньшими номерами к большим. Введем еще начальный узел (узел 0), с которым соединим узлы 1–5. Кроме того, каждый узел соединим с терминальным узлом такого же номера, но пометим их индексом «0» и будем приписывать им значения терминального узла в случае его раскрытия, т.е. получения всех непосредственно следующих за ним узлов поискового орграфа (рис. 2).

Перебирая возможные варианты уравнивания соответствующих частных показателей, убеждаемся, как в основном варианте, что имеется только единственное решение $x_{23} = 1,8;\ x_{22} = 2$. При этом общее значение уравненных частных показателей равно 5. Значит, остальные частные показатели, не вошедшие в четверку конфликтующих, будут заведомо меньше 5, что и требовалось проверить.

Узел 8.

$$(x_{22} + x_{23}) - 2 < 7/2;\ \tau_{12} = 4 - x_{22}/2 = 4;\ 3 < \tau_{13} = 8 - 5x_{23}/3 = 14/3 < 5;\ \tau_{21} = 8 - x_{22} - x_{23} < 6;$$
$$\tau_{22} = 3 + x_{22} = 3;\ 16/3 < \tau_{23} = 2 + 5x_{23}/3 < 7;\ x_{11} = x_{22} + x_{23} - 2 > 0;\ x_{12} = 4 - x_{22} = 4;$$
$$x_{13} = 3 - x_{23} > 0;\ x_{21} = 4 - x_{22} - x_{23} > 0;\ x_{22} = 0; x_{23} > 2\ \Rightarrow \max(8 - x_{23}, 2 + 5x_{23}/3) \to \inf,$$
$$2 < x_{23} < 3 \Rightarrow 8 - x_{23} = 2 + 5x_{23}/3,\ x_{23} = 18/8 \Rightarrow \inf = 8 - x_{23} = 5,75 > 5.$$

Нижняя оценка:

$$\max(3(x_{22}+x_{23})/2-2,\ 4-/2x_{22},\ 8-5x_{23}/3,\ 8-x_{22}-x_{23},\ 2+5x_{23}/3)\to\min, \qquad (24)$$

минимум берется по всей допустимой области значений переменных. Перебирая возможные варианты уравнивания соответствующих частных показателей, убеждаемся, как и в вершине 2, что единственное решение соответствует системе

$$8-5x_{23}/3=8-x_{22}-x_{23}\Rightarrow 6=10x_{23}/3\Rightarrow x_{23}=18/10=1{,}8;$$
$$2+5x_{23}/3=8-x_{22}-x_{23}\Rightarrow x_{22}+8x_{23}/3=6\Rightarrow x_{22}=1{,}2.$$

При этом общее значение уравненных частных показателей равно $8-x_{22}-x_{23}=5$, а не вошедшие в тройку уравненных показателей (24) будут

$$3(x_{22}+x_{23})/2-2=2{,}5<5;\quad 4-x_{22}/2=3{,}6<5.$$

Значит, остальные частные показатели, не вошедшие в четверку конфликтующих, будут заведомо меньше 5, что и требовалось проверить. Это и есть значение минимального показателя в задаче (24), равное нижней оценке в узле 8.

Точка, в которой достигается нижняя оценка, не имеет нулей x_{ij}, поэтому значение критерия, как в вершине 3, равно максимуму показателей для всех переменных $\max(2{,}25;3{,}4;5;5;4{,}2;5)=5$.

Узел 9.

$$x_{22}=3,\ 0<x_{23}<1\Rightarrow\tau_{11}=3(x_{22}+x_{23})/2-2<4;\ \tau_{12}=4-x_{22}/2=2{,}5;$$
$$\tau_{13}=8-5x_{23}/3>6/3;\ \tau_{21}=8-x_{22}-x_{23}<5;\ \tau_{22}=3+x_{22}=6;\ \tau_{23}=2+5x_{23}/3<6/3;$$
$$x_{11}=x_{22}+x_{23}-2>1;\ x_{12}=4-x_{22}=1;x_{13}=3-x_{23}>2;\ x_{21}=4-x_{22}-x_{23}>0;$$
$$x_{22}=3;0<x_{23}<1;\ \Rightarrow\max(8-5x_{23}/3)\to\inf,\ 0<x_{23}<1\Rightarrow\inf=6/3>5.$$

Нижняя оценка:

$$\max(3(x_{22}+x_{23})/2-2,\ 4-x_{22}/2,\ 8-5x_{23}/3,\ 8-x_{22}-x_{23},\ 3+x_{22},\ 2+5x_{23}/3)\to\min. \qquad (25)$$

Минимум берется по всей допустимой области значений переменных. Это совпадает с основным случаем 11. Поэтому нижняя оценка в вершине 9, совпадающая с минимумом в (25), равна 5. Перебирая возможные варианты уравнивания соответствующих частных показателей, убеждаемся, как в основном варианте, что единственное решение $x_{23}=1{,}8$; $x_{22}=2$. При этом общее значение уравненных частных показателей равно 5. Значит, остальные частные показатели, не вошедшие в четверку конфликтующих, будут заведомо меньше 5, что и требовалось проверить.

Узел 10.

$$1<x_{22}<4,\ 0<x_{23}<3,\ x_{22}+x_{23}=4\Rightarrow x_{22}=4-x_{23},\ \tau_{11}=3(x_{22}+x_{23})/2-2=4;$$
$$\tau_{12}=4-x_{22}/2<3{,}5;\ \tau_{13}=8-5x_{23}/3<8;\ \tau_{21}=8-x_{22}-x_{23}=4;\ \tau_{22}=3+x_{22}<7;$$
$$\tau_{23}=2+5x_{23}/2<7;\ x_{11}=x_{22}+x_{23}-2=2;\ x_{12}=4-x_{22}>0;\ x_{13}=3-x_{23}>0;$$
$$x_{21}=4-x_{22}-x_{23}=0;\ x_{22}>1;\ x_{23}>0\Rightarrow\max(4,\ 8-5x_{23}/2,\ 3+x_{22}=7-x_{23},$$
$$2+5x_{23}/2)\to\inf,\ 0<x_{23}<3\Rightarrow 2+5x_{23}/2=7-x_{23}\Rightarrow x_{23}=15/8\Rightarrow\inf=7-x_{23}=41/8>5.$$

Нижняя оценка:

$$\max(3(x_{22}+x_{23})/2-2,\ 4-x_{22}/2,\ 8-5x_{23}/3,\ 3+x_{22},\ 2+5x_{23}/3)\to\min. \qquad (26)$$

И она равна 5. Это показывается так же, как в основном случае, когда все переменные положительны. Убеждаемся, как в основном варианте, что единственное решение $x_{23}=1{,}8$; $x_{22}=2$. При этом общее значение уравненных частных показателей равно 5. Значит, остальные частные показатели, не вошедшие в четверку конфликтующих, будут заведомо меньше 5, что и требовалось проверить.

Процесс раскрытия вершин в примере 1 в классической схеме метода ветвей и границ с использованием правила отсева из (Финкильштейн, 1976) приведен на рис. 3. Через косую черту около узлов указана нижняя оценка, перед чертой стоит значение общего показателя в точке, в которой достигается нижняя оценка. Классическое правило отсева состоит в том, что на каждом шаге отбрасываются узлы со значениями не меньше текущего рекорда r.

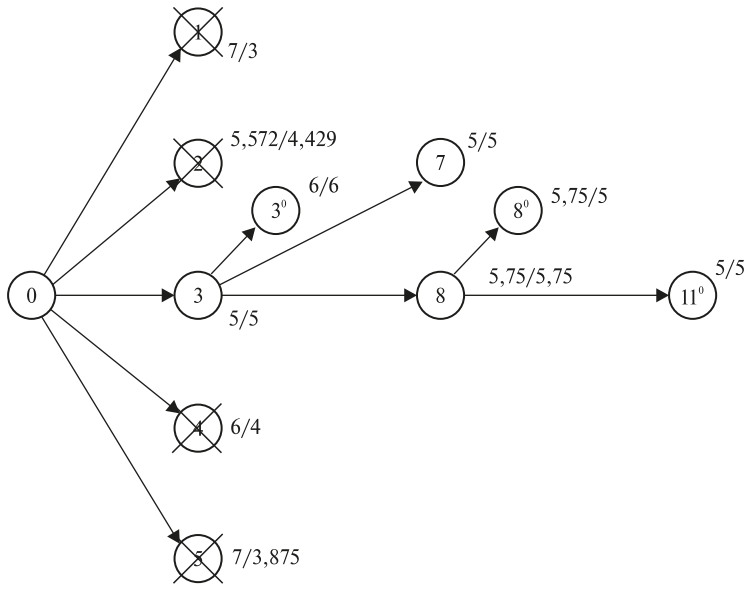


Рис. 3. Классическая схема метода ветвей и границ: рекорд — $r = 5$, точность — $\varepsilon = 0$, граница отсева — $b = r = 5$

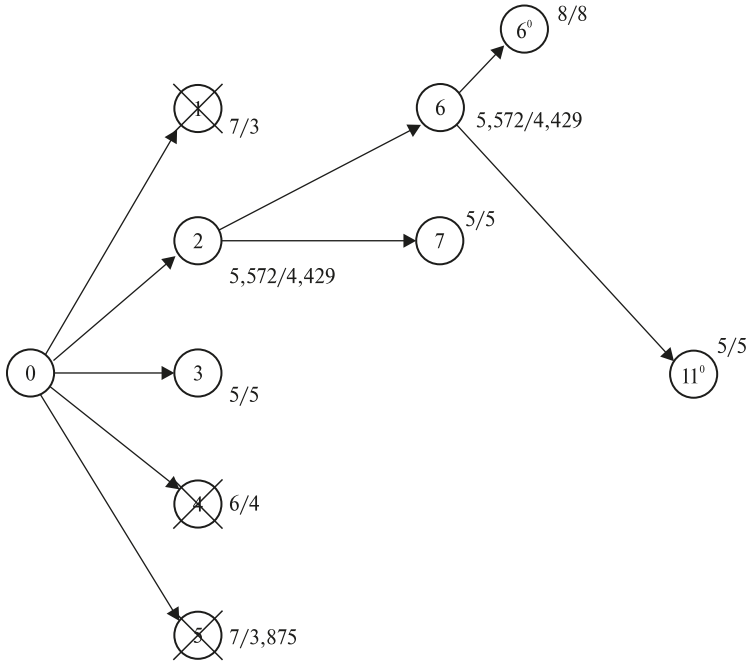


Рис. 4. Классическая схема метода ветвей и границ: рекорд — $r = 5$, точность — $\varepsilon = 0{,}15 = 15\%$, граница отсечения — $b = (1 + \varepsilon)r = 5{,}75$

Замечание 5. Сокращение МВГ было вызвано тем, что к этому времени на этапе определения решения уже отброшены все пустые грани прямым методом перебора граней, что эквивалентно этому решению, но служит для наглядности описания МВГ. Это позволяет проиллюстрировать МВГ в полноформатном модельном примере 2×3 и, в частности, получить контрпример супер-(суб-) модулярности ТЗНД по времени (Хачатуров и др., 20212).

Процесс раскрытия вершин в примере 1 в ε-оптимальной схеме метода ветвей и границ с использованием правила отсева из (Финкильштейн, 1976) приведен на рис. 4. Обобщенное правило отсева состоит в том, что на каждом шаге отбрасываются узлы со значениями не меньше текущего рекорда r, умноженного на $1 + \varepsilon$.

5. КОНТРПРИМЕР СУБМОДУЛЯРНОСТИ

Напомним, что функция $C = C(\omega)$, определенная на 2^J, называется супер- (суб-) модулярной, если $\forall \delta, \nu \in 2^J$ выполняется неравенство $C(\delta) + C(\gamma) \le (\ge) C(\delta \cup \gamma) + C(\delta \cap \gamma)$.

Пример 2. Для краткости будем обозначать тип $\theta(x)$ узла в примере 1 $x = (x_{11}, \ldots, x_{23})$ по знакам соответствующих компонент, определяемых функцией $\theta(x) = (\operatorname{sign} x_{11}, \ldots, \operatorname{sign} x_{23})$. Тогда $\theta(x)$ можно отождествить с индикаторной функцией подмножества пар индексов, $B(x) = \{(i, j) : x_{ij} > 0\}$ и применять к ним теоретико-множественные операции объединения и пересечения.

1. Пусть $\delta = 1$, $\theta(\delta) = (1,1,1,1,1,0)$, $\gamma = 2$, $\theta(\gamma) = (0,1,1,1,1,1)$. Тогда $\theta(\delta) \cup \theta(\gamma) = (1,1,1,1,1,1) = \theta(6)$, $\theta(\delta) \cap \theta(\gamma) = (0,1,1,1,1,0) = \theta(2)$ и $C(\delta) + C(\gamma) = 8 + 6 \ge C(\delta \cup \gamma) + C(\delta \cap \gamma) = 5 + 2$, где $C(\gamma) = I(B(\gamma))$ и x отождествляется с номером γ вершины поискового орграфа МВГ.

2. Пусть $\delta = 3$, $\theta(\delta) = (1,1,1,1,0,1)$, $\gamma = 5$, $\theta(\gamma) = (0,1,1,1,1,1)$. Тогда $\theta(\delta) \cup \theta(\gamma) = (1,1,1,1,1,1) = \theta(6)$, $\theta(\delta) \cap \theta(\gamma) = (0,1,1,1,0,1) = \theta(3)$ и $C(\delta) + C(\gamma) = 5{,}750 + 5{,}125 \le C(\delta \cup \gamma) + C(\delta \cap \gamma) = 5 + 6$.

6. МЕТОД СУБГРАДИЕНТНОГО СПУСКА ДЛЯ НАХОЖДЕНИЯ НИЖНИХ ОЦЕНОК

Рассмотрим задачу нахождения нижней оценки в узле $\bar{B}$:

$$\underline{I}_B = \min_{x \in X} I_B(x) = \min_{x \in X} \max_{(i,j) \in B} \tau_{ij}(x_{ij}). \tag{27}$$

Показатель (27) представляет собой выпуклую функцию. Исключая зависимые переменные из балансовых ограничений, как мы это делали в примере 1, приходим к задаче выпуклого программирования на множестве допустимых значений, заданной системой неравенств

$$F_k(x) \le 0, \quad k = 1, \ldots, l \tag{28}$$

с линейными функциями $F_k(x)$ и условием принадлежности объемлющему параллелепипеду W:

$$x_{ij} \in W_{ij} = \left[0, a_{ij}\right] \quad \forall (i, j), \tag{29}$$

которую можно свернуть в одно скалярное неравенство при помощи функции максимума

$$\max_{k=1,\ldots,l} F_k(x) \le 0. \tag{30}$$

Эту задачу можно решить методом Б.Т. Поляка (Поляк, 1983):

$$\begin{gathered} x_{ij}^{k+1} = P_{W_{ij}}(x_{ij}^k - \lambda_k \nu_{ij}^k) \quad \forall (i, j), \quad k = 0, 1, \ldots, \\ \nu^k \in \begin{cases} \partial I_B(x^k), F(x^k) \le 0, \\ \partial F(x^k), F(x^k) > 0, \end{cases} \quad \lambda_k \to +0, \quad \sum_{k=0}^{\infty} \lambda_k = \infty, \end{gathered} \tag{31}$$

где k — номер шага; λ_k — программный шаг метода; $P_{W_{ij}}(x_{ij})$ — оператор проектирования на компоненту W_{ij} объемлющего параллелепипеда W. Очевидно, что множество допустимых решений X ограничено и имеет внутренние точки. Тогда согласно результатам (Поляк, 1983, с. 259) справедлива следующая теорема сходимости.

Теорема 2. *Последовательность* $\left[x^k\right]$ *в методе* (31) *сходится к множеству решений задачи минимизации* (27).

Замечание 6. Для получения значения основного показателя в узле, заданном подмножеством B, решается задача минимизации штрафной функции $J_B(x)$ вместо $I_B(x)$ в (27) на всем множестве X.

7. ПРИЛОЖЕНИЕ К ТЗНД ПО ЦЕНЕ

Пусть, как в обычной транспортной задаче, через $i = 1, \ldots, m$ обозначены пункты производства (разработчики ПО) некоторого однородного товара (человеко-дней при стандартном 8-часовом дне чистого рабочего времени, определяемого по таймеру), через $j = 1, \ldots, n$ — пункты его потребления (заказчики ПО). Даны величины: $a_i > 0$ — объем производства в пункте производства i, $b_j > 0$ — объем потребления в пункте потребления j, отнесенные к одному дню (горизонту планирования).

Ищутся величины $x_{ij} \ge 0$ (объем перевозок из пункта i в пункт j), удовлетворяющие обычным транспортным ограничениям (1) и минимизирующие функцию

$$\max_{(i,j): x_{ij} > 0} c_{ij}(x_{ij}), \tag{32}$$

где

$$c_{ij}(x_{ij}) = \begin{cases} 0, & x_{ij} = 0 \\ \max(d_{ij} - c_{ij}x_{ij},\ 0), & x_{ij} > 0. \end{cases} \tag{33}$$

Здесь d_{ij} — базовые розничные цены одного дня производителя с учетом прибыли цифровой платформы, например 30%; $c_{ij}x_{ij}$ — скидка к цене на оптовую поставку объема x_{ij}.

Введением дополнительных целочисленных переменных ТЗНД (1), (32), (33) по времени может быть сведена к классической ТЗ по времени. Способ такого сведения был указан в (Balinski, 1961) для ТЗФД, он проходит и для ТЗНД (1), (32), (33) по времени с некоторыми особенностями.

Рассмотрим частично-целочисленную задачу

$$\min_{(i,j)} \max(d_{ij}y_{ij} - c_{ij}x_{ij}, 0) \to \max \tag{34}$$

при условиях (1) и дополнительных условиях (5).

Тогда задача (1), (5), (34) эквивалентна исходной задаче (1), (32), (33) и может быть аппроксимирована снизу (по значению) классической ТЗ по времени:

$$\min_{(i,j)} \max(d_{ij}y_{ij} - c_{ij}x_{ij}, 0) \geq \min_{(i,j)} \max(d_{ij} - c_{ij}M_{ij})y_{ij}, 0) = \min_{(i,j);x_{ij}>0} \max(d_{ij} - c_{ij}M_{ij}, 0) \to \max \tag{35}$$

при условиях (1). Таким образом, задача (1), (32), (33) аппроксимирована снизу обычной ТЗ (1), (5), (35) по времени, которую можно решить венгерским методом расстановки пометок.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложена практически значимая методика определения загрузки работ по исполнителям на рынке РПО, обеспечивающая учет скидок на опт. Основным результатом работы является постановка ТЗНД по времени, доказательство полунепрерывности общего показателя, из которого следует, что достигается его инфинум на ограниченном замкнутом множестве допустимых решений. Предложена геометрическая интерпретация решения задачи как минимума значений на непустых гранях и метод штрафов для их нахождения. Показано, что аналогично строятся нижние оценки показателя в методе ветвей и границ по непустым граням. Получена аппроксимация исходной задачи обобщенной задачей о назначения на узкие места методом (Balinski, 1961), которую можно решить модифицированным методом расстановки пометок, описанным в работе (Сергиенко, Симоненко, Симоненко, 2016), имеющим сложность $O(N \lg N)$, где $N = m + n$. Приведены числовые примеры всех задач и алгоритмов их решения.

Практическая значимость работы определяется применением в трансакционных платформах на рынке РПО для загрузки заданий по терминологии, обоснованной в работе (Устюжанина, Дементьев, Евсюков, 2021). Построена статическая модель загрузки заданий с двумя группами агентов — компаниями–разработчиками ПО и компаниями–заказчиками ПО, которые могут опередить свои резервные цены на рынке повременной аренды разработанного ПО в двухсекторной модели экономики (Васин, Морозов, 2005). Дискриминируемыми агентами являются компании–заказчики ПО, которые оплачивают услуги оператора платформы в виде процентных надбавок, включенных оператором в цену работы компаний–разработчиков ПО. Имеются в виду платформы-рынки, взаимодействие экономических агентов на которых носит эпизодический характер разовых сделок. Предполагается удаленное взаимодействие, т.е. возможность коммуникации между агентами, находящимися на любом расстоянии друг от друга.

Допускается возможность масштабирования, что означает теоретическое отсутствие ограничений для расширения поля взаимодействия (числа пользователей). Такое расширение возможно за счет перекрестного сетевого эффекта, когда численность одного вида пользователей влияет на численность другого вида (спрос порождает предложение, и наоборот). Предполагается, что цифровые трансакционные платформы могут оказывать влияние на объем коммуникации через уровень и структуру цен. Исходя из базовых характеристик поля взаимодействия, платформа РПО относится к двусторонним рынкам. Для одноранговых (peer-to-peer) (Устюжанина, Дементьев, Евсюков, 2021) цифровых трансакционных платформ, к которым относятся платформы на рынке РПО, организующих торговые трансакции, непосредственными агентами являются поставщики — агенты, разрабатывающие ПО, и потребители — агенты, использующие разработанное ПО для повременной сдачи в аренду.

Операторы платформы на рынке РПО могут получать доход в виде платы пользователей за покупку, которые, в свою очередь, имеют доход в виде платы за временное пользование разработанных ПО в двухсекторной модели экономики (Васин, Морозов, 2005), цена которого определяет резервные цены потребителей.

В заключение следует отметить, что настоящая статья является продолжением серии статей (Перевозчиков, Лесик, 2014, 2016, 2020, 2021) в части замены базовой статической ТЗНД по стоимости ТЗНД по времени, которая может служить фундаментальной основой для построения соответствующих цифровых платформ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

Васин А.А., Григорьева О.М., Лесик И.А. (2017). Синтез транспортной системы многоузлового конкурентного рынка с переменным спросом // *Прикладная математика и информатика*. Труды факультета ВМК МГУ им. М.В. Ломоносова. Под ред. В.И. Дмитриева. № 55. М.: МАКС Пресс. С. 74–90. [**Vasin A.A., Grigor'eva O.M., Lesik I.A.** (2017). Synthesis of the transport system of a multi-node competitive market with variable demand. *Applied Mathematics and computer science: Proceedings of the Faculty of Computational mathematics and cybernatics of Lomonosov Moscow State University.* V.I. Dmitrievedit (Ed.). Moscow: MAKS Press, 55, 74–90 (in Russian).]

Васин А.А., Григорьева О.М., Лесик И.А. (2018). Задача оптимизации транспортной системы энергетического рынка. В сб.: «IX Московская международная конференция по исследованию операций (ORM2018). Труды». А.А. Васин, А.Ф. Измаилов (отв. ред.). С. 247–251. [**Vasin A.A., Grigor'eva O.M., Lesik I.A.** (2018). The problem of optimizing the transport system of the energy market. In: *IX Moscow International Conference on Operations Research (ORM2018). Proceedings*. A.A. Vasin, A.F. Izmailov (Resp. Eds.), 247–251 (in Russian).]

Васин А.А., Григорьева О.М., Цыганов Н.И. (2017). Оптимизация транспортной системы энергетического рынка // *Доклады Академии наук*. Т. 475. № 4. С. 377–381. [**Vasin A.A., Grigor'eva O.M., Cyganov N.I.** (2017). Optimization of the transport system of the energy market. *Proceedings of the Russain Academy of Sciences,* 475, 4, 377–381 (in Russian).]

Васин А.А., Морозов В.В. (2005). Теория игр и модели математической экономики. М.: МАКС Пресс. [**Vasin A.A., Morozov V.V.** (2005). *Game theory and models of mathematical economics*. Moscow: MAKS Press (in Russian).]

Корбут А.А., Финкильштейн Ю.Ю. (1969). Дискретное программирование. Д.Б. Юдин (ред.). М.: Наука. [**Korbut A.A., Finkilstein Y.Y.** (1969). *Discrete programming.* D.B. Yudin (ed.). Moscow: Nauka (in Russian).]

Макаров В.Л., Рубинов Ф.М. (1973). Математическая теория экономической динамики и равновесия. М.: Наука. [**Makarov V.L., Rubinov F.M.** (1973). *Mathematical theory of economic dynamics and equilibrium*. Moscow: Nauka (in Russian).]

Мезоэкономика развития (2011). Г.Б. Клейнер (ред.). М.: Наука. [*Mesoeconomics of development* (2011). G.B. Kleiner (Ed.). Moscow: Nauka (in Russian).]

Перевозчиков А.Г., Лесик И.А. (2014). Нестационарная модель инвестиций в основные средства предприятия // *Прикладная математика и информатика. Труды факультета ВМК МГУ имени М.В. Ломоносова*. В.И. Дмитриев (ред.). М.: МАКС Пресс. № 46. С. 76–88. [**Perevozchikov A.G., Lesik I.A.** (2014). Non-stationary model of investment in fixed assets of the enterprise. *Applied mathematics and computer science: Proceedings of the Faculty of Computational mathematics and cybernatics of Lomonosov Moscow State University.* V.I. Dmitriev (Ed.). Moscow: MAKS Press, 46, 76–88 (in Russian).]

Перевозчиков А.Г., Лесик И.А. (2016). Определение оптимальных объемов производства и цен реализации в линейной модели многопродуктовой монополии // *Экономика и математические методы*. Т. 52. № 1. С.140–148. [**Perevozchikov A.G., Lesik I.A.** (2016). Determination of optimal production volumes and sales prices in a linear model of a multi-product monopoly. *Economics and Mathematical Methods*, 52, 1, 140–148 (in Russian).]

Перевозчиков А.Г., Лесик И.А. (2020). Динамическая модель инвестиций в научные исследования олигополии // *Экономика и математические методы*. Т. 56. № 2. С. 102–114. [**Perevozchikov A.G., Lesik I.A.** (2020). A dynamic model of investment in scientific research of an oligopoly. *Economics and Mathematical Methods*, 56, 2, 102–114 (in Russian).]

Перевозчиков А.Г., Лесик И.А. (2021). Динамическая модель разработки программного обеспечения на основе задачи о назначении на узкие места // *Экономика и математические методы*. Т. 56. № 4. С. 102–114. [**Perevozchikov A.G., Lesik I.A.** (2021). Dynamic model of the software development market based on the assignment problem on pain points. *Economics and Mathematical Methods*, 56, 2, 102–114 (in Russian).]

Поляк Б.Т. (1983). Введение в оптимизацию. М.: Наука. [**Polyak B.T.** (1983). *Introduction to optimization*. Moscow: Nauka (in Russian).]

Сергиенко А.М., Симоненко В.П., Симоненко А.В. (2016). Улучшенный алгоритм назначения для планировщиков заданий в неоднородных распределительных вычислительных системах // *Системні дослідженія та информаційни технологии*. № 2. С. 20–35. [**Sergienko A.M., Simonenko V.P., Simonenko A.V.** (2016). Improved assignment algorithm for task schedulers in heterogeneous distributed computing systems. *System Research and Information Technologies,* 2, 20–35 (in Russian).]

Сухарев А.Г., Тимохов, В.В., Федоров В.В. (1986). Курс методов оптимизации. М.: Наука. [**Sukharev A.G., Timokhov V.V., Fedorov V.V.** (1986). *Course in optimization methods*. Moscow: Nauka (in Russian).]

Устюжанина Е.В., Дементьев В.Е., Евсюков С.Г. (2021). Трансакционные цифровые платформы: задача обеспечения эффективности // *Экономика и математические методы*. Т. 57. № 1. С. 5–18. [**Ustyuzhanina E.V., Dement'ev V.E., Evsyukov S.G.** (2021). Transactional digital platforms: the task of ensuring efficiency. *Economics and Mathematical Methods*, 57, 1, 5–18 (in Russian).]

Федоров В.В. (1979). Численные методы максимина. М.: Наука. [**Fedorov V.V.** (1979). *Numerical methods of maximin*. Moscow: Nauka (in Russian).]

Финкильштейн Ю.Ю. (1976). Приближенные методы и прикладные задачи дискретного программирования. М.: Наука. [**Finkilstein Y.Y.** (1976). *Approximate methods and applied problems of discrete programming*. Moscow: Nauka (in Russian).]

Форд Л., Фалкерсон Д. (1966). Потоки в сетях. М.: Мир. [**Ford L., Fulkerson D.** (1966). *Flows in networks*. Moscow, Mir (in Russian).]

Хачатуров В.Р., Хачатуров Р.В., Хачатуров Р.В. (2012). Оптимизация супермодулярных функций (супермодулярное программирование) // *Журнал вычислительной математики и математической физики*. Т. 52. № 6. С. 999–1000. [**Khachaturov V.R., Khachaturov R.V., Khachaturov R.V.** (2012). Optimization of supermodular functions (supermodular programming). *Journal of Computational Mathematics and Mathematical Physics*, 52, 6, 999–1000 (in Russian).]

Balinski M.L. (1961). Fixed-cost transportation problems. *Naval Res. Log. Quart.*, 8, 1, 41–54.

Debreu G. (1954). Valuation equilibrium and pareto optimum. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA,* 40, 588–592.

Ding X., Wang K., Gibbons P.B., Zhang X. (2012). BWS: Balanced work stealing for time-sharing multicores. *Proceedings of the 7-th ACM European Conferens on Computer Systems*. EuroSys, 12. New York, 365–378.

Market's static model for software development based on a transport problem with non-fixed time additions

© 2022 I.A. Lesik, A.G. Perevozchikov

I.A. Lesik,
Joint-Stock Company Scientific and Production Association "Russian basic information technology", Moscow, Russia; e-mail: lesik56@mail.ru

A.G. Perevozchikov,
Joint-Stock Company Scientific and Production Association "Russian basic information technology", Moscow, Russia; e-mail: pere501@ yandex.ru

Received 29.11.2021

Abstract. The authors describe the formulation of the market's discrete-continuous static model for software development based on a transport problem with non-fixed time additions. In contrast to the existing transport problem with fixed cost surcharges, it is proposed to formulate a minimax setting in time with times that may contain a part that proportionate to the volumes of appointments. Thus, the authors come up with the idea of a hybrid formulation of transport problem with fixed cost surcharges and classical transport problem in time. Such problems arise when the total volume of vehicles which have to be used repeatedly on each route is limited, plus the fixed addition that arises taking into account the delay in making logistics decisions. It is shown that the set a discrete-continuous problem can be approximated from above by the classical transport problem in time, which can also be obtained according to the scheme used in the work by Balinski. The authors also describe an exact algorithm of the branch-and-bound method, based on the geometric interpretation of the problem, which decomposes into subproblems on non-empty faces of the polyhedral set of feasible solutions, which are convex programming problems that can be numerically solved by the subgradient method described in work by Polyak. The calculation of the lower estimates of the criterion proposed in the work is reduced to the same problems. It is shown that the function of the best values of the criterion on the edges is not sub- or supermodular, as a function of a subset of pairs of indices corresponding to the positive values of the transportation volumes, which makes it impossible to use supermodular programming methods. In connection with the latter, the authors also describe the ε-optimal polynomial version of the branch-and-bound method, obtained by analogy with the solution of the multidimensional assignment problem, and a numerical example of its use. The authors describe interpretation of transport problem with non-fixed additions as a generalized assignment problem with non-fixed price discounts, taking into account the difference between the wholesale and retail prices. The authors come up with the idea of the application for building digital platforms in the software development market for loading tasks for performers.

Keywords: transport problem with non-fixed time additions, approximation of the classical transport problem, geometric interpretation, branch-and-bound method, lower estimates of the criterion, ε-optimal version of the branch-and-bound method.

JEL Classification: O12, C51.

For reference: **Lesik I.A., Perevozchikov A.G.** (2022). Market's static model for software development based on a transport problem with non-fixed time additions. *Economics and Mathematical Methods*, 58, 2, 97–111. DOI: 10.31857/S042473880019969-4

ЭКОНОМИКА И МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ, 2022, том 58, № 2, с. 112–124

МЕТОДЫ ОПТИМИЗАЦИИ

Доходный подход к задачам оптимизации ремонтной политики

© 2022 г. С.А. Смоляк

С.А. Смоляк,
ЦЭМИ РАН, Москва; e-mail: smolyak1@yandex.ru

Поступила в редакцию 01.10.2021

Аннотация. Статья посвящена применению методов стоимостной оценки к задачам теории надежности — назначению сроков службы и сроков превентивного ремонта деградирующим объектам, подвергающимся отказам. В работах по надежности изменения характеристик объекта после ремонта описываются моделями Кидзимы и их модификациями, в которых состояние объекта характеризуется виртуальным/эффективным возрастом. Аналогичный показатель давно уже широко используется и в оценочной деятельности. Между тем, оказывается, что показатели такого типа не позволяют адекватно описать состояния деградирующих ремонтируемых объектов. Предлагается описывать их состояние двумя показателями — возрастом (наработкой) в начале текущего межремонтного цикла и временем работы в этом цикле. В сочетании с идеями Кидзимы это позволяет предложить более адекватную модель изменения характеристик объекта после ремонта. Для назначения сроков службы и сроков превентивного ремонта необходим обоснованный критерий оптимальности. Показано, что обычно принимаемый критерий минимума ожидаемых затрат на обслуживание и ремонт за единицу времени не отвечает интересам предприятий–участников рынка. Предлагается использовать доходный подход к стоимостной оценке, ориентированный на максимизацию стоимости предприятия (в простейшем случае такой подход приводит к критерию ожидаемых удельных дисконтированных затрат). Это дает возможность оценить необходимую для расчетов рыночную стоимость выполняемых объектом работ, причем соответствующий метод оценки может быть отнесен к затратному подходу. Построены и проанализированы соответствующие модели, приведен алгоритм их решения и численный пример, демонстрирующий нерациональность обычно используемых ремонтных политик.

Ключевые слова: срок службы, ремонтная политика, критерий оптимизации, деградация, модели Кидзимы, стоимостная оценка, доходный подход.

Классификация JEL: D21, D25, D46, D81.

Для цитирования: **Смоляк С.А.** (2022). Доходный подход к задачам оптимизации ремонтной политики // *Экономика и математические методы*. Т. 58. № 2. С. 112–124. DOI: 10.31857/S042473880019997-5

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Мы рассматриваем технические объекты (ТО), использующиеся в непрерывных производственных процессах предприятий–участников рынка и подвергающиеся отказам. Работа, выполняемая ТО, обладает полезностью для участников рынка и потому, согласно стандартам оценки (IVS, 2019), имеет определенную рыночную стоимость (РС). Иногда ее можно подтвердить данными рынка, но в общем случае, рассматриваемом в статье, эта РС требует оценки.

Состояние выпущенных, но еще не использованных ТО назовем *новым*. Все ТО, идентичные в новом состоянии, мы объединяем в одну *марку* (в технической литературе чаще говорят «модель»).

В процессе работы ТО подвергается физическому износу, его состояние ухудшается (в литературе это именуется деградацией). К тому же он может подвергнуться случайному отказу, что приведет к прерыванию производственного процесса и потерям для предприятия.

ТО подразделяются на ремонтируемые (РО) и неремонтируемые (НО). После отказа ТО необходимо утилизировать (вывести из эксплуатации) или заменить *новой копией* — ТО той же марки в новом состоянии, но РО можно еще и отремонтировать. Однако решение об утилизации, замене или (превентивном) ремонте можно принять и в отношении исправного ТО. Период использования РО разбивается ремонтами на межремонтные циклы (МРЦ). Ремонт устраняет некоторые последствия физического износа РО — тогда говорят об *устранимом* износе. Однако другие

последствия накапливаются и, в конце концов, могут привести к выходу объекта из строя. Такой износ называют *неустранимым* (IVS, 2019; Федотова, 2018).

Назначенным сроком службы НО называется срок, по окончании которого объект, не отказавший ранее, подлежит утилизации. *Назначенной длительностью межремонтного цикла* (МРЦ) называется срок, по окончании которого РО, не отказавший ранее в этом цикле, подлежит утилизации или превентивному ремонту.

Оптимальному назначению срока службы НО и длительностей МРЦ РО и другим задачам оптимизации (политики) технического обслуживания и ремонта (ТОиР) посвящено много публикаций. Мы будем выяснять, как в этих задачах задавать критерий оптимальности и описывать изменение эксплуатационных характеристик ТО в процессе его использования и после ремонта.

ХАРАКТЕРИЗАЦИЯ СОСТОЯНИЯ РЕМОНТИРУЕМОГО ОБЪЕКТА

Состояние НО, как и в теории надежности, удобно характеризовать возрастом (наработкой с начала эксплуатации). Однако этот измеритель не учитывает улучшения состояния РО после ремонта. В свое время Кидзима[1] в (Kijima, 1989) предложил более приемлемый измеритель — *виртуальный возраст* (ВВ) и две модели его динамики (позднее они многократно обобщались). Основная их идея сводилась к следующему. У нового объекта ВВ = 0. В процессе работы ВВ растет синхронно с хронологическим возрастом, но после ремонта скачком уменьшается. В модели I это уменьшение прямо пропорционально ВВ объекта перед ремонтом, в модели II — длительности предшествующего МРЦ. При коэффициенте пропорциональности $\beta = 1$ после ремонта состояние РО становится новым — такой («совершенный») ремонт эквивалентен замене РО новой копией. При $\beta = 0$ («минимальный» ремонт) состояние РО после ремонта оказывается таким же, как и до ремонта. Оба эти случая мы считаем нереалистичными и далее считаем, что $0 < \beta < 1$.

Между тем, основная идея описания состояния РО одним измерителем была предложена намного раньше. Так, еще в (Welch, 1943) отмечалось, что для стоимостной оценки зданий некоторые оценщики используют показатель *эффективного возраста* (ЭВ), отражающий возраст типично используемого аналогичного здания, находящегося в том же состоянии, что и оцениваемое. Начиная с 1950-х годов концепция ЭВ стала использоваться в США при оценке зданий, машин и оборудования (в том числе — для налогообложения). Вначале ЭВ объектов оценщики оценивали экспертно, затем появились более обоснованные методы и таблицы, с которыми, видимо, ни Кидзима, ни его последователи не были знакомы. С этих позиций модели Кидзимы можно считать применением концепции ЭВ к задачам теории надежности.

Между тем, можно доказать, что неадекватным будет *любой* измеритель состояния (ИС) РО, растущий с ухудшением состояния, непрерывно возрастающий в процессе работы и уменьшающийся после ремонта.

Рассмотрим РО, вводимый в эксплуатацию с ИС $= s_0$. Пусть его рациональное использование предусматривает превентивный ремонт при ИС $= s$, переводящий объект в состояние ХС $= s_1 < s$. Однако при отказе ремонт может потребоваться раньше, и после него (во втором МРЦ) состояние объекта окажется немного лучше: ИС $= s_2 < s_1$. Но в первом МРЦ он уже оказывался в состояниях s_1 и s_2. Значит, рационально использоваться он должен так же, как и в первом МРЦ: работать, пока не достигнет ИС $= s$, если не откажет раньше. Но тогда после очередного ремонта (в третьем МРЦ) у него снова будет ИС $< s_1$, и т.д. Таким образом, при рациональном использовании ИС объекта никогда не превысит s, а срок его службы будет неограниченным, что невозможно для ТО, подвергающихся *неустранимому* износу. Полученное противоречие показывает, что адекватно описать состояние обычных РО *одним* показателем типа ЭВ нельзя. Однако это можно сделать, используя *два* измерителя — возраст s в начале текущего МРЦ и время работы t в этом цикле[2] (Смоляк, 2013, 2014, 2019). Тогда зависимости характеристик РО от его состояния придется описывать функциями двух переменных. Оказывается, их можно упростить, используя идею Кидзимы.

---

[1] Соответствующий звук японского языка записывается в русской транслитерации (система Поливанова) как «дз», в английской (система Хэпберна) как «j». Поэтому в англоязычных текстах фамилия автора пишется «Kijima».

[2] Кстати, чтобы определить, как изменится состояние объекта после ремонта в модели II Кидзимы, нужно знать не только его виртуальный возраст перед ремонтом, но и виртуальный возраст в начале цикла.

Возьмем какую-нибудь эксплуатационную характеристику объекта (скажем, опасность отказа). Ее значение для объекта в состоянии (s, t) обозначим через $Z(s, t)$ и положим $z(t) = Z(0, t)$. Как и в модели I Кидзимы, примем, что характеристика РО, прошедшего первый ремонт в возрасте s, становится такой же, как и у РО меньшего возраста βs: $Z(s, 0) = Z(0, \beta s) = z(\beta s)$.

Но неустранимый износ первого РО — больше, чем у второго, значит, его характеристика будет далее ухудшаться быстрее. Иными словами, время для него как бы растет быстрее в некоторое число $1 + \delta$ раз. Поскольку через время t второй РО будет иметь характеристику $z(\beta s + t)$, то характеристика первого должна быть хуже — $Z(s, t) = z(\beta s + (1 + \delta)t)$. Логично считать, что «скорость роста времени» δ тем больше, чем больше различаются объекты по степени неустранимого износа и, значит, по возрасту[3]. Поэтому δ должна расти с увеличением s. Проще всего описать это прямой пропорциональной зависимостью $\delta = \gamma s$, трактуя коэффициент γ как «ускорение деградации», связанное с возрастом РО в начале цикла. Тогда зависимость характеристики РО от его состояния, учитывающая неустранимый износ, примет вид:

$$Z(s, t) = z(\beta s + t + \gamma st). \tag{1}$$

Такая модель, применимая к любым характеристикам РО, представляется более адекватной, чем модели Кидзимы, хотя и требует задавать дополнительный параметр γ.

КРИТЕРИЙ ОПТИМАЛЬНОСТИ

В многочисленных работах по теории надежности оптимальный вариант системы ТОиР выбирался по-разному (см., например, (Horenbeek, Pintelon, Muchiri, 2010)). Нередко предполагалось, что после замены ТО его новой копией начинается следующий аналогичный цикл. Здесь в качестве критерия выступали, например, средние за цикл число или стоимость ремонтов, суммарные дисконтированные затраты (Aven, 1983), средние за цикл затраты в единицу времени или их отношение к средней длительности цикла (Jiang, 2018). Правда, как справедливо отмечается в (Horenbeek, Pintelon, Muchiri, 2010), критерии оптимальности, как правило, выбираются без должных обоснований, в отрыве от интересов конкретного бизнеса.

Более того, и часто принимаемое допущение о неограниченной повторяемости циклов, и критерий дисконтированных затрат нельзя считать достаточно обоснованными. Конечно, указанное допущение сильно упрощает постановку задачи и дает возможность опереться на предельные теоремы теории вероятностей. К тому же, здесь вполне логично использовать критерий минимума суммарных (за бесконечный период) дисконтированных затрат. Однако это будет экономически необоснованным. Дело в том, что последовательное приобретение и использование ТО — это инвестиционный проект, а оптимальная политика ТОиР отвечает наилучшему его варианту. Но сравнивать варианты инвестиционного проекта по (суммарным дисконтированным) затратам можно только если они идентичны по достигаемым полезным результатам (Методические рекомендации..., 2000; Виленский, Лившиц, Смоляк, 2015). Между тем, при разных правилах выбора моментов превентивного ремонта будут разными и среднее число ремонтов, и средняя длительность цикла (если учесть время на ремонт и замену объекта), и средняя длительность перерыва производственного процесса в единицу времени. Но тогда будут различаться и средние результаты бизнеса (как за срок службы объекта, так и за единицу времени). Еще большие различия возникнут, если в процессе деградации ТО снижается его производительность (как, например, у строительных машин и некоторых станков).

Кроме того, оптимизируя бесконечную последовательность замен ТО, придется учесть, что в момент очередной замены может измениться экономическая ситуация (включая и систему цен) и появятся ТО новых марок, способные заменить выбывающий объект. Тогда придется выбирать и способ использования, и марку заменяющего объекта. Казалось бы, здесь можно построить модель оптимизации политики ТОиР для бесконечного периода. Но для ее применения потребуется прогноз цен и технического прогресса на неограниченную перспективу, что нереально. Мало этого, в такой модели решение предприятия о ремонте или утилизации объекта должно учитывать ситуации, которые могут возникнуть не только у них, но и у всех последующих его заменителей, тогда как интересы участников рынка — обычно краткосрочные (в лучшем случае — среднесрочные).

[3] Альтернативная модель, где ускорение деградации связывалось с порядковым номером МРЦ, исследовалась, например, в (Антонов, Поляков, Чепурко, 2011; Антонов, Пляскин, Татаев, 2013; Bartholomew-Biggs, Zuo, Li, 2009).

С этих позиций представляется правильнее ориентироваться на оптимизацию использования ТО только на протяжении срока его службы. При такой постановке задачи в теории надежности используют критерий средних затрат в единицу времени (с учетом или без учета дисконтирования), что, как отмечалось выше, некорректно. Более обоснованным представляется применение критериев, принятых в теории оценки эффективности инвестиционных проектов и теории стоимостной оценки.

При выборе оптимального варианта инвестиционного проекта обычно используется критерий ожидаемого чистого дисконтированного дохода (ЧДД, NPV) — ожидаемая сумма дисконтированных *чистых доходов* проекта (Виленский, Лившиц, Смоляк, 2015). Чистые доходы от проекта в некотором периоде при этом понимаются как доходы от реализации результатов проекта (производимой продукции) за вычетом затрат по проекту в этом периоде.

В теории стоимостной оценки основным видом стоимости считается *рыночная* (РС, *market value*). Подробное определение этого понятия и комментарии к нему даются в стандартах оценки (IVS, 2019), и мы не будем их здесь приводить. Укажем лишь, что РС объекта оценки (имущества, работы или услуги) на определенную дату (дату оценки) отражает:

– цену этого объекта в сделке, совершаемой на дату оценки между независимыми и ведущими себя экономически рационально участниками рынка при определенных (указанных в стандартах оценки) условиях;

– вклад объекта в РС владеющего им предприятия.

Для определения РС объекта используются три подхода.

При сравнительном (рыночном) подходе РС объекта оценивается по данным о ценах сделок, совершаемых на дату оценки с аналогичными объектами.

При затратном подходе РС объекта оценивается по затратам, необходимым для его создания. Этот подход используется, в основном, для оценки зданий и сооружений, но применимость его ограничена стандартами оценки и вообще представляется спорной, особенно в отношении машин и оборудования (Микерин, Смоляк, 2010; Смоляк, 2018).

Доходный подход основан на принципе ожидания выгод, упомянутом, но подробно не раскрытом, в (IVS, 2019). Мы будем опираться на следующую его формулировку (Смоляк, 2016).

РС объекта на дату оценки равна ожидаемой сумме дисконтированных выгод от его наиболее эффективного использования в прогнозном периоде (который может быть выбран произвольно) и дисконтированной (к дате оценки) РС того же объекта в конце периода.

К этой формулировке необходимо сделать ряд важных комментариев.

1. Термин «*ожидаемый*» в условиях вероятностной неопределенности понимается как математическое ожидание (в (IVS, 2019) — т.е. «взвешенное по вероятностям»).

2. *Выгоды* от использования объекта в некотором периоде определяются как РС результатов использования объекта за вычетом затрат на его использование в этом периоде. Они совпадают с чистыми доходами, если результаты использования объекта реализуются на рынке по РС. Обычно при разработке инвестиционных проектов реализуемая продукция и потребляемые ресурсы оцениваются в рыночных ценах, так что выгоды от проекта совпадают с чистыми доходами. В общем же случае понятие выгод шире, поскольку применимо и к объектам, результаты использования которых не обращаются на рынке (например, выполняющим промежуточные операции в технологическом процессе).

3. Длительность прогнозного периода может быть выбрана произвольно, поскольку РС объекта от этой длительности не зависит.

4. Наиболее эффективным считается способ использования, максимизирующий указанную в определении ожидаемую сумму.

5. Добавление к общей сумме выгод РС объекта в конце периода можно трактовать и как выгоды от (виртуальной) продажи объекта по РС в этот момент. При такой трактовке наиболее эффективное использование объекта может допускать и его продажу по РС в какой-то момент времени. На этом основании далее, говоря о *суммарных* выгодах от использования объекта в некотором периоде, мы будем включать в их состав и РС объекта в конце периода.

6. Наиболее эффективное использование объекта, находящегося в «плохом» состоянии, может предусматривать его утилизацию. Его рыночная стоимость в этот момент называется *утилизационной* (*salvage value*) и обычно определяется как РС годных к использованию отдельных элементов объекта (например, металлолома) за вычетом расходов на демонтаж и доставку элементов объекта к месту утилизации. Одновременно она отражает и выгоды от утилизации объекта (производимой наиболее эффективно).

7. Согласно стандартам оценки (IVS, 2019) для дисконтирования выгод должна использоваться после- или доналоговая ставка в зависимости от того, включен ли при их исчислении налог на прибыль в состав затрат или нет. Нам удобнее принять второй вариант и дисконтировать выгоды по номинальной доналоговой ставке r.

Мы видим, что при стоимостной оценке объектов (как и при оценке эффективности проектов) используется критерий ожидаемых суммарных дисконтированных выгод (ОСДВ). При этом максимальное значение ОСДВ от использования объекта совпадает с его РС. Но тогда оценка РС объекта предусматривает и выбор наиболее эффективного способа его использования, что позволяет предприятию получить максимальные ОСДВ и максимально увеличить свою стоимость. Именно на такой критерий оптимальности (максимизацию стоимости предприятия) мы ориентируемся.

Имеется много задач, связанных с формированием политики ТОиР. Для объектов, включающих взаимосвязанные ненадежные элементы, подвергающихся отказам разного типа и проходящих разного вида ремонты, в таких задачах возникает много специфических ограничений. Из-за этого предложить какую-то единую их постановку невозможно. По этой причине ниже мы рассмотрим две подобные задачи в более корректной, на наш взгляд, постановке, предполагая, что инфляция отсутствует, а налог на прибыль в составе затрат не учитывается.

ОПТИМИЗАЦИЯ НАЗНАЧЕННОГО СРОКА СЛУЖБЫ НЕРЕМОНТИРУЕМОГО ОБЪЕКТА

Мы рассматриваем НО определенной марки, приобретаемый предприятием–типичным участником рынка по РС K и используемый для осуществления непрерывного производственного процесса. Состояние исправного НО характеризуется его возрастом t. От него зависит интенсивность $C(t)$ операционных затрат (сумму этих затрат в малую единицу времени) и опасность отказа $\lambda(t)$, под которой мы понимаем $\lim\limits_{h\to 0} P(t,h)/h$, где $P(t, h)$ — вероятность того, что исправный НО, находящийся в состоянии t, откажет в ближайшем периоде h. Функции $\lambda(t)$ и $C(t)$ мы считаем неубывающими, однако хотя бы одна из них должна неограниченно возрастать при $t \to \infty$.

При отказе НО становится неисправным и утилизируется, а у предприятия возникают дополнительные затраты L. В их состав мы включаем потери (ущерб), связанные с прерыванием производственного процесса[4] за вычетом выгод от утилизации объекта (выгоды от утилизации неисправного объекта обычно меньше, чем от утилизации исправного, и могут даже быть отрицательными).

Поскольку с течением времени опасность отказа растет, политика ТОиР сводится к назначению срока службы T, по достижении которого исправный НО подлежит утилизации, приносящей выгоды в размере утилизационной стоимости U. Мы ставим задачу выбора оптимальной такой политики, т.е. оптимального T. Критерием оптимальности при этом будут ОСДВ от приобретения и использования НО за весь срок его службы.

Обозначим $\Lambda(t)=\int_0^t \lambda(x)dx$. Тогда вероятность безотказной работы объекта в течение времени t составит $e^{-\Lambda(t)}$, а вероятность его отказа в интервале $(t, t + dt)$ — $e^{-\Lambda(t)}\lambda(t)dt$.

Обозначим также через B (неизвестную) РС выполняемой объектом в единицу времени работы[5].

[4] При оценке указанного ущерба в некоторых случаях можно использовать РД 03-496-02 «Методические рекомендации по оценке ущерба от аварий на опасных производственных объектах» (утв. постановлением Госгортехнадзора России от 29.10.02 № 63).

[5] Независимость B от состояния объекта предполагает, что его производительность в процессе работы не меняется.

Основные соотношения модели

Допустим, что НО назначен срок службы T. Будем отсчитывать время от момента ввода объекта в эксплуатацию. Поскольку исправный НО в состоянии T (в момент T) должен быть утилизирован, то выгоды, получаемые предприятием от его использования, равны утилизационной стоимости U. Однако оказаться в состоянии T объект может только если он в течение времени T работал безотказно, а вероятность такого события равна $e^{-\Lambda(T)}$. Определим теперь выгоды от использования НО в малом периоде времени $(t, t + dt)$ при $t < T$. При этом учтем, что если НО дожил до момента t, то до этого момента он работал безотказно. Здесь возможны две ситуации.

1. НО проработал безотказно до момента времени t, но отказал в малом периоде $(t, t + dt)$, нанеся предприятию ущерб L. Вероятность этой ситуации $e^{-\Lambda(t)}\lambda(t)dt$.

2. НО проработал безотказно до момента времени t и не отказал в периоде $(t, t + dt)$. Вероятность этой ситуации $e^{-\Lambda(t)}[1-\lambda(t)dt]$. Здесь выгоды предприятия будут равны стоимости выполненных объектом работ за вычетом операционных затрат Bdt — $C(t)dt$.

Умножая указанные выгоды на вероятности их получения, дисконтируя к дате оценки и суммируя, получим следующую формулу для ОСДВ $V(T)$ от принятого способа использования объекта за весь срок его службы:

$$V(T)=\int_0^T e^{-rt}\left[B-C(t)\right]e^{-\Lambda(t)}dt-\int_0^T e^{-rt}Le^{-\Lambda(t)}\lambda(t)dt+e^{-rT}Ue^{-\Lambda(T)}. \tag{2}$$

Решение. Наиболее эффективный способ использования НО должен обеспечивать максимальное значение ОСДВ. Легко видеть, что $V'(T)=\{B-C(t)-[L+U]\ (t)-rU\}e^{-rt-\Lambda(t)}$. При этом выражение в фигурной скобке с ростом T неограниченно убывает, а, значит, при больших T становится отрицательным. Если оно отрицательно при малых $T > 0$, то оптимальным решением будет $T = 0$. Но в этом случае использовать объект по назначению становится неэффективным, хотя типичные участники рынка его используют. Поэтому такой случай невозможен. Но тогда $V'(0) > 0$, а в этом случае существует единственное конечное положительное T, при котором $V'(T) = 0$. Оно же и будет оптимальным. Другое дело, что для определения T необходимо узнать пока неизвестную величину B.

Чтобы ее найти, воспользуемся принципом ожидания выгод. Из него следует, что заданные формулой (2) ОСДВ не превосходят РС объекта на дату оценки (K) и совпадают с K при наиболее эффективном использовании объекта, т.е. при оптимальном T. Отсюда и из (1) вытекает, что

$$B\le\left(K+\int_0^T e^{-rt-\Lambda(t)}\left[C(t)+L\lambda(t)\right]dt-U\,e^{-rT-\Lambda(T)}\right)\Big/\int_0^T e^{-rt-\Lambda(t)}\,dt, \tag{3}$$

причем равенство здесь достигается при оптимальном T, которое, как мы видели, единственное.

Выражение, стоящее в правой части (3), можно трактовать как *ожидаемые удельные дисконтированные затраты* от использования НО — отношение ожидаемых суммарных дисконтированных затрат к ожидаемому дисконтированному объему производства работ. Правда, в отличие от обычно используемого в работах по надежности показателя затрат за единицу времени, здесь затраты и результаты дисконтируются, а учитываемые затраты и потери уменьшаются на утилизационную стоимость выбывающего объекта.

Поскольку равенство в формуле (2) имеет место при оптимальном T, из нее вытекает, что наиболее эффективный способ использования объекта обеспечивает минимальное значение ОУДЗ, что может рассматриваться как некоторое оправдание применяемому в теории надежности критерию. В связи с этим укажем, что применение критерия удельных дисконтированных затрат для оптимизации сроков службы в детерминированной ситуации было обосновано еще в 1970-е годы (Лившиц, Смоляк, 1971, 1972; Смоляк, 1988), и такой критерий практически применялся при установлении норм амортизации некоторых строительных машин.

Отметим, что формула (2) позволяет оценить РС выполняемых объектом работ, даже если они не обращаются на рынке, и эта РС совпадает с определенным образом подсчитанными ожидаемыми затратами на наиболее эффективное выполнение работ, что отвечает затратному подходу к оценке.

К сожалению, в более сложных задачах оптимизации столь простого критерия уже не получается. Мы покажем это в следующем разделе.

ОПТИМИЗАЦИЯ СРОКОВ ПРЕВЕНТИВНЫХ РЕМОНТОВ

Рассмотрим теперь ремонтируемый объект (РО), выполняющий некоторую работу в рамках производственного процесса предприятия. При случайном отказе РО у предприятия возникают потери L из-за прерывания производственного процесса, а РО придется утилизировать или подвергнуть аварийному ремонту. Все ремонты объекта имеют одну и ту же стоимость R. Утилизационную стоимость объекта будем считать нулевой. Состояние объекта характеризуется парой (s, t), где s — возраст объекта в начале межремонтного цикла (МРЦ), t — время его работы в этом цикле. Время на утилизацию и на проведение ремонта считается пренебрежимо малым, так что объект в состоянии (s, t), подлежащий ремонту, после ремонта переходит в состояние $(s + t, 0)$.

Опасность отказа и интенсивность операционных затрат РО в состоянии (s, t) обозначим соответственно через $\lambda(s, t)$ и $C(s, t)$. Как и раньше, будем считать, что эти функции — неубывающие по своим аргументам, но хотя бы одна из них неограниченно растет при $s \to \infty$ и при $t \to \infty$. Введем также обозначение $\Lambda(s,t) = \int_0^t \lambda(s,x)\,dx$.

МРЦ, в начале которого РО имеет возраст s, обозначим M_s, а его назначенную длительность — T_s. Это значит, что РО, доживший до состояния (s, T_s), подлежит превентивному ремонту или утилизации. РС объекта в состоянии (s, t) обозначим $V(s, t)$ и положим $f(s) = V(s,0)$. Получим для $f(s)$ оценку сверху.

Заметим, что РО в начале цикла M_s приносит выгоды с интенсивностью $B - C(s, 0)$, имеет опасность отказа $\lambda(s, 0)$, но затем эти характеристики ухудшаются до конца цикла, после чего объект переходит в следующий МРЦ. Отсюда видно, что его стоимость не больше, чем у виртуального объекта, всегда приносящего выгоды с интенсивностью $B - C(s, 0)$, отказы которого происходят с постоянной интенсивностью $\lambda(s, 0)$ и не приводят к потерям. Но такой объект за малое время dt отказывает с вероятностью $\lambda(s, 0)\,dt$, а значит, требует ожидаемых затрат на ремонт $\lambda(s, 0)\,Rdt$ и приносит ожидаемые выгоды $[B - C(s,0) - \lambda(s,0)R]dt$. Поэтому ОСДВ от его использования за бесконечный срок службы равны $[B - C(s,0) - \lambda(s,0)R]/r$. Если эта величина положительна, то она совпадает с РС виртуального объекта $W(s)$, иначе использовать виртуальный объект неэффективно, и его стоимость $W(s)$ равна нулю. Но тогда $W(s) = \max\{[B - C(s,0) - \lambda(s,0)R]/r; 0\}$, а $f(s) \le W(s) = \max\{[B - C(s,0) - \lambda(s,0)R]/r; 0\}$. Поскольку хотя бы одна из функций $C(s, 0)$ и $\lambda(s, 0)$ неограниченно возрастает при $s \to \infty$, отсюда следует, что для достаточно больших s будет $f(s) = 0$.

Пусть $g(x)$ — РС объекта возраста x, находящегося в конце цикла (перед утилизацией или ремонтом). Она отвечает суммарным выгодам от лучшего варианта дальнейшего использования этого РО. Но утилизация РО дает нулевые выгоды, а ремонт требует затрат R и переводит объект в начало следующего цикла — в состояние $(x,0)$, где он будет иметь стоимость $f(x)$. Следовательно,

$$g(x) = \max\left[f(x) - R; 0\right]. \tag{4}$$

Циклы M_s, в которых $f(s) > 0 = g(s + T_s)$, назовем *завершающими* — в них эффективно использовать РО по назначению, но в конце цикла — утилизировать.

Величину B — РС работ, выполняемых исправным объектом за малую единицу времени, временно будем считать известной. В таком случае выгоды, приносимые РО в состоянии (s, t), за малое время безотказной работы dt составят $Bdt - C(s, t)dt$.

Политика ТОиР здесь состоит в том, чтобы назначить для каждого цикла M_s длительность T_s и указать, какие из них — завершающие.

Оптимизационная модель. Допустим, что для цикла M_s назначена длительность T. Возьмем РО в начале этого цикла и найдем ожидаемые суммарные дисконтированные (к началу цикла) выгоды $Q(s, T)$, приносимые им за цикл, раздельно учитывая выгоды от его использования по назначению, потери от отказа и стоимость РО в конце цикла.

Заметим вначале, что длительность цикла M_s с вероятностью $e^{-\Lambda(s,T)}$ равна T, а с вероятностью $\lambda(s,x)e^{-\Lambda(s,x)}dx$ — лежит в интервале $(x, x + dx)$ при $x < T$.

При длительности цикла T объект в конце цикла имеет возраст $s + T$ и РС $g(s + T)$. Потерь от отказа при этом нет. Длительность цикла $x < T$ возможна только если РО отказал в состоянии (s, x), когда его возраст составлял $s + x$. Но тогда суммарные выгоды при этом будут включать РС объекта в конце цикла за вычетом потерь от отказа, т.е. $g(s + x) - L$.

Выгоды от использования по назначению РО в состоянии (s, x) за малый период dx составляют $[B - C(s, x)]dx$. Однако РО принесет их только если за время x его работы в цикле не произойдет отказа, т.е. с вероятностью $e^{-\Lambda(s,x)}$.

Теперь, учитывая величину возможных выгод и их вероятности, можно найти искомые ОСДВ:

$$Q(s,T)=\mathrm{e}^{-rT}\,\mathrm{e}^{-\Lambda(s,T)}\,g(s+T)+\int_0^T \mathrm{e}^{-rx}\left[g(s+x)-L\right]\ (s,x)\mathrm{e}^{-\Lambda(s,x)}\,dx+$$
$$+\int_0^T \mathrm{e}^{-rx}\,\mathrm{e}^{-\Lambda(s,x)}\left[B-C(s,x)\right]dx=\mathrm{e}^{-N(s,T)}\,g(s+T)+\int_0^T \mathrm{e}^{-N(s,x)}H(s,x)\,dx, \tag{5}$$

где

$$N(s,x)=rx+\Lambda(s,x);\quad H(s,x)=B-C(s,x)+\lambda(s,x)\left[g(s+x)-L\right]. \tag{6}$$

Заметим теперь, что стоимость $f(s)$ РО в начале цикла M_s равна максимальному значению $Q(s, T)$, откуда и в силу (5) имеем:

$$f(s)=\max_T Q(s,T)=\max_T\left\{\mathrm{e}^{-N(s,T)}\,g(s+T)+\int_0^T \mathrm{e}^{-N(s,x)}\,H(s,x)\,dx\right\}. \tag{7}$$

При этом оптимальное T_s будет тем значением T, при котором $Q(s, T)$ максимально. Но, быть может, таких T несколько либо $T=\infty$. Рассмотрим оба этих варианта.

1. Допустим, что максимум $Q(s, T)$ достигается и при $T=T'$, и при $T=T''>T'$. Но работающий в цикле M_s объект, прежде чем попасть в состояние (s, T''), должен вначале оказаться в состоянии (s, T'), где будет принято решение о его ремонте или утилизации. Поэтому при рациональном использовании РО просто не доживет до состояния (s, T''). Это значит, что в качестве T_s необходимо принять наименьшее из всех возможных значений T, обеспечивающих максимум $Q(T)$.

2. Случай $T=\infty$ невозможен, поскольку $Q(s, T)$ при больших T убывает. Действительно, как показано выше, при достаточно больших s будет $f(s)=0$. Отсюда и из (4) следует, что при фиксированном s и достаточно большом T будет $g(s+T)=0$, а тогда в силу (5) и (6) $Q(s,T)=\int_0^T \mathrm{e}^{-N(s,x)}\,H(s,x)\,dx$ и $Q'_T(s,T)=\mathrm{e}^{-N(s,T)}\left[B-C(s,T)-\lambda(s,T)L\right]$. Поскольку хотя бы одна из функций $C(s, t)$ и $\lambda(s, t)$ при $t\to\infty$ неограниченно возрастает, при достаточно большом T будет $Q'_T(s,T)<0$, а $Q(s, T)$ будет убывать, что и требовалось доказать.

Для дальнейшего важно отметить, что функция $Q(s, T)$ — непрерывная, но не монотонная по T и потому может иметь несколько локальных максимумов в точках $T^1(s)$, $T^2(s)$,... Разумеется, в качестве T_s должно быть принято такое $T^k(s)$, для которого значение $Q(s, T^k(s))$ наибольшее. Пусть, например, при некотором s будет $Q(s, T^1(s)) > Q(s, T^2(s)) > Q(s, T^3(s)) >...$, так что $T_s=T^1(s)$. Однако при изменении s указанный порядок может измениться, а некоторые из локальных максимумов могут просто исчезнуть. В результате зависимость T_s от s может оказаться разрывной, и в точках разрыва максимальное значение $Q(s, T)$ будет достигаться сразу в двух точках. Аналогичные ситуации могут возникнуть и при фиксированном s, если начать изменять исходные данные, например величину потерь L или зависимости $\lambda(s, t)$ и $C(s, t)$.

Решение модели. Для нахождения неизвестной функции $f(s)$ подставим в формулу (7) обозначение (4) и представим ее в виде

$$f(s)=\mathbf{G}\left(f(s)\right), \tag{8}$$

где $\mathbf{G}$ — оператор, переводящий функцию одного переменного $\varphi(s)$ в другую функцию $\phi(s)$ следующим образом:

$$\phi(s)=\mathbf{G}\left(\varphi(s)\right)\triangleq\max_{T\ge 0}\left\{\max\left[\varphi(s+T)-R;0\right]\mathrm{e}^{-N(s,T)}+\right.$$
$$\left.+\int_0^T \mathrm{e}^{-N(s,x)}\left[B-C(s,x)+\lambda(s,x)\max\left[\varphi(s+x)-R;0\right]-\lambda(s,x)L\right]dx\right\}. \tag{9}$$

Нетрудно убедиться, что если функция $\varphi(s)$ непрерывная, неотрицательная и ограниченная при $s\ge 0$, то и функция $\phi=\mathbf{G}(\varphi)$ будет такой же. Легко видеть также, что оператор $\mathbf{G}$ монотонный: если $\varphi_1(s)\ge\varphi_2(s)$, то и $\phi_1(s)\ge\phi_2(s)$. Это позволяет решать уравнение (8) методом итераций. Например, за первое приближение можно взять полученную выше верхнюю оценку для $f(s)$: $f_1(s)=W(s)$, а последующие — находить по формуле $f_{n+1}=\mathbf{G}(f_n)$. Тогда последовательность $\{f_n(s)\}$ будет монотонной и ограниченной, а значит, будет иметь предел («неподвижную точку» оператора $\mathbf{G}$) — искомую функцию $f(s)$, равную нулю для достаточно больших s. Одновременно для каждого цикла M_s определится и его

назначенная длительность T_s — наименьшее T, при котором достигается максимум в (5). Разумеется, длительности T_s разных МРЦ будут разными, что выявилось еще в детерминированной ситуации, например в (Смоляк, 2013, 2014). Далее можно определить все завершающие циклы, а также максимальный срок службы РО T_{max} — он отвечает наименьшему s, при котором $f(s) = 0$. Зная $f(s)$, можно рассчитать и РС объектов, находящихся в любых состояниях. Соответствующие формулы выводятся аналогично формулам (5) и (7), но нам они не потребуются.

Определение неизвестной стоимости работ *B*. В изложенной процедуре РС работ, выполняемых исправным объектом за малую единицу времени, B считалась известной, хотя обычно владельцам машин и оборудования она неизвестна, да и оценщики почти никогда не оценивают стоимость работ (кроме, пожалуй, строительно-монтажных и ремонтных работ).

Для решения этой проблемы заметим, что указанную процедуру можно проводить при разных значениях B, причем все стоимости $f(s)$ будут неубывающими функциями от B. Это относится и к РС нового РО $f(0)$. Но эта стоимость нам известна и равна K. Поэтому искомая величина B должна быть корнем уравнения $f(0) = K$. Такой метод оценки стоимости работ точно отвечает затратному подходу к оценке, хотя именно в данном виде он до сих пор оценщиками не использовался.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РАСЧЕТЫ

По описанной выше модели были проведены экспериментальные расчеты. В них принималось:

– РС нового объекта $K = 100$;

– стоимость ремонта $R = 25$;

– интенсивность операционных затрат нового объекта $C_0 = C(0, 0) = 40$.

В первом межремонтном цикле интенсивность операционных затрат $C(0, t)$ растет линейно с возрастом со скоростью $i = 0{,}03$, а отказы имеют распределение Рэлея с параметром ω (среднее время работы до отказа при этом равно $\omega\sqrt{\pi/2}$). В других циклах M_s интенсивность операционных затрат и опасность отказа определялись по модели (1):

$C(s,t) = C_0\left[1 + i\left(\beta s + t + \gamma st\right)\right]$; $\lambda(s,t) = \left(\beta s + t + \gamma st\right)/\omega^2$, где $\beta = 0{,}4$, $\gamma = 0{,}2$.

Потери от отказа L и параметр распределения отказов ω варьировались. РС работ, выполняемых объектом в малую единицу времени, B, подбиралась так, чтобы выполнялось условие $f(0) = K$.

Мы изучали влияние параметров L и ω на назначенные сроки превентивных ремонтов и максимальный срок службы объекта T_{max}. Приведем лишь часть полученных результатов (в полном объеме они заняли бы слишком много места).

Величина L варьировала от 100 до 1000 (от однократной до десятикратной стоимости объекта). Ее влияние при ω = 4 и 8 лет показано на рис. 1–3. На рис. 1 представлена зависимость от L

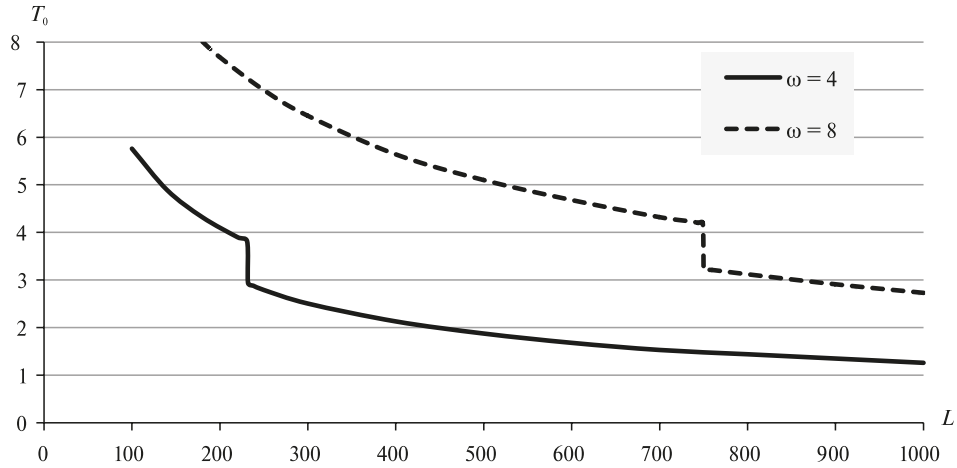


Рис. 1. Зависимости назначенного срока первого ремонта (T_0, годы) от L при ω = 4 и 8 лет

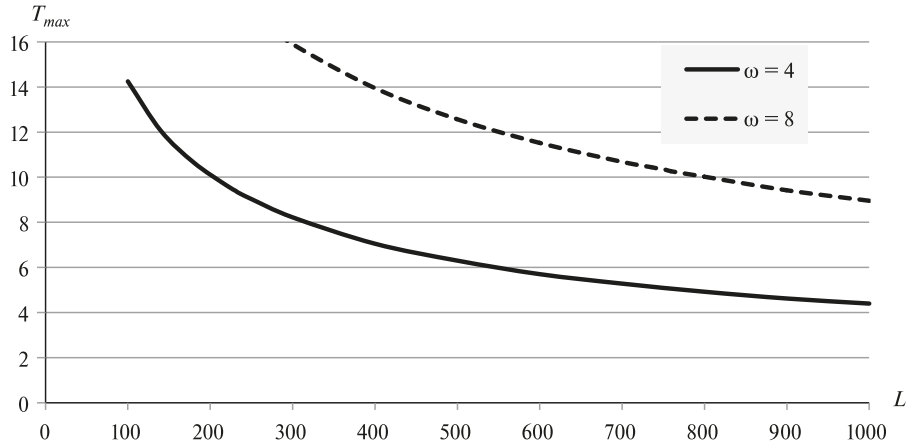


Рис. 2. Зависимости максимального срока службы объекта (T_{max}, годы) от L при ω = 4 и 8 лет

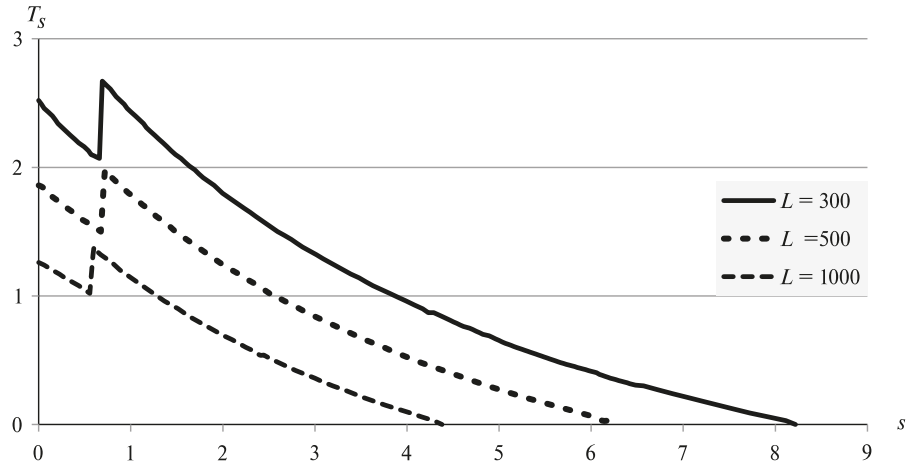


Рис. 3. Зависимости назначенного срока превентивного ремонта (T_s, годы) от возраста объекта в начале цикла (s, годы) при ω = 4 года и разных L

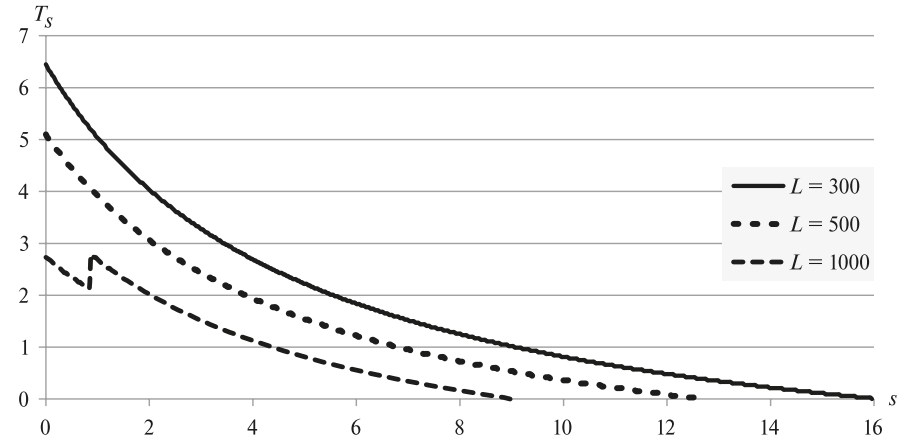


Рис. 4. Зависимости назначенного срока превентивного ремонта (T_s, годы) от возраста объекта в начале цикла (s, годы) при ω = 8 лет и разных L

назначенного срока первого ремонта (T_0, годы). Скачки на графике отвечают описанным в предыдущем разделе ситуациям, когда максимальное значение $Q(s, T)$ достигается сразу в двух точках. Зависимость максимального срока службы объекта ($T_{\max}$, годы) от L представлена на рис. 2. Рис. 3–4 демонстрируют зависимости длительности циклов (T_s, годы) от возраста объекта в начале цикла (s, годы) при разных сочетаниях L и ω. Из них видно, что оптимальная политика ТОиР существенно отличается от распространенной, при которой сроки превентивного ремонта назначаются одинаковыми или зависящими от порядкового номера ремонта, независимо от размера ущерба, вызываемого отказом. Отметим, что объектам «достаточно большого» возраста необходимо назначать совсем короткие сроки очередного ремонта, что технически неудобно и дает небольшой экономический эффект. Поэтому таким объектам целесообразно вообще не назначать срока очередного превентивного ремонта, утилизируя их только при очередном отказе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Затратные критерии, применяемые в теории надежности для оптимизации политики ремонта объектов, не в полной мере отвечают коммерческим интересам предприятий. Экономически обоснованное решение подобных задач обеспечивают методы и критерии, используемые в теории стоимостной оценки. Они позволяют оценить стоимость работ (услуг), выполняемых объектами, а в частном случае — приводят к критерию минимума ожидаемых удельных дисконтированных затрат, изредка встречающемуся в литературе по надежности (в общем случае столь простого результата не получается).

Изменение технико-экономических характеристик объекта после ремонта в литературе по надежности описывают моделями виртуального (эффективного) возраста Кидзимы. Аналогичный показатель за полвека до Кидзимы был предложен для стоимостной оценки активов и практически используется оценщиками и сейчас. Однако мы показываем неадекватность описания состояния ремонтируемых объектов каким-то одним подобным показателем. Более адекватным представляется характеризовать их состояние двумя показателями — временем работы (наработкой) в начале межремонтного цикла и в течение этого цикла.

Изложенные положения позволяют построить модели оптимизации ремонтной политики, отвечающей экономическим интересам участников рынка. Показано, что в каждом межремонтном цикле срок очередного превентивного ремонта должен назначаться в зависимости от ущерба, вызываемого отказом, и возраста объекта в начале цикла, а не от порядкового номера ремонта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

Антонов А.В., Пляскин А.В., Татаев Х.Н. (2013). К вопросу расчета надежности резервированных структур с учетом старения элементов // *Надежность*. № 1. С. 55–67. DOI: 10.21683/1729-2646-2013-0-1-55-67. [**Antonov A.V., Plyaskin A.V., Tataev Kh.N.** (2013). On the issue of reliability calculation for redundant structures in view of ageing elements. *Dependability*, 1, 55–67 (in Russian)]. DOI: 10.21683/1729-2646-2013-0-1-55-67 (in Russian).]

Антонов А.В., Поляков А.А., Чепурко В.А. (2011). Модель анализа надежности объектов с неполным восстановлением // *Надежность*. № 3 (38). С. 33–41. [**Antonov A.V., Polyakov A.A., Chepurko V.A.** (2011). A model for analyzing the reliability of objects with incomplete restoration. *Dependability*, 3 (38), 33–41 (in Russian)].

Виленский П.Л., Лившиц В.Н., Смоляк С.А. (2015). Оценка эффективности инвестиционных проектов: теория и практика. Учебное пособие. Изд. 5-тое. М.: ПолиПринтСервис. 1300 с. [**Vilensky P.L., Livshits V.N., Smolyak S.A.** (2015). *Evaluation of the efficiency of investment projects: Theory and practice*. Textbook. 5th ed. Moscow: PolyPrintService. 1300 p. (in Russian).]

Лившиц В.Н., Смоляк С.А. (1971). Сроки службы основных фондов в оптимальном плане. В кн.: Первая конференция по оптимальному планированию и управлению народным хозяйством. Тезисы докладов. Секция 1. Вып. 1. М.: ЦЭМИ РАН. С. 352–357. [**Livshits V.N., Smolyak S.A.** (1971). Service life of fixed assets in the optimal plan. In: *The first conference on optimal planning and management of the national economy*. Abstracts of reports. Section 1. Issue 1. Moscow: CEMI RAS. 352–357 (in Russian).]

Лившиц В.Н., Смоляк С.А. (1972). Экономико-математические модели локальной оптимизации. В кн.: Труды четвертой школы по математическому программированию и смежным вопросам. Вып. IV. М.: ЦЭМИ РАН. С. 179–213. [**Livshits V.N., Smolyak S.A.** (1972). Economic and mathematical models of local optimization. In: *Proceedings of the Fourth school on mathematical programming and related issues.* Issue IV. Moscow, CEMI RAS, 179–213 (in Russian).]

Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов (2 редакция) (2000). М.: Экономика. 421 с. [*Methodological recommendations for evaluating the efficiency of investment projects.* Second edition (2000). Moscow: Ekonomika 421 p. (in Russian).]

Микерин Г.И., Смоляк С.А. (2010). Оценка эффективности инвестиционных проектов и стоимостная оценка имущества: возможности конвергенции. М.: ЦЭМИ РАН. 120 с. [**Mikerin G.I., Smolyak S.A.** (2010). *Efficiency assessment of investment projects and property valuation: Opportunities for convergence*. Moscow: CEMI RAS. 120 p. (in Russian).]

Смоляк С.А. (1988). Оптимизация управления развитием многономенклатурных производств. Дис... докт. экон. наук: 08.00.13. М.: ЦЭМИ РАН. [**Smolyak S.A.** (1988). *Optimization of management of the development of diversified industries*. Dr. Econ. Sci. Diss. 08.00.13. Moscow: CEMI RAS (in Russian).]

Смоляк С.А. (2013). Оценка рыночной стоимости машин с учетом устранимого и неустранимого износа // *Экономика и математические методы*. Т. 49. Вып. 1. С. 54–72. [**Smolyak S.A.** (2013). Valuation of machines and equipment in view of curable and incurable depreciation. *Economics and Mathematical Methods*, 49, 1, 54–72 (in Russian).]

Смоляк С.А. (2014). Оптимизация ремонтной политики и оценка стоимости машин с учетом их надежности // *Журнал Новой экономической ассоциации*. Т. 2 (22). С. 102–131. [**Smolyak S.A.** (2014). Overhaul policy optimization and equipment appraisal concerning its reliability. *Journal of the New Economic Association*, 2 (22), 102–131 (in Russian).]

Смоляк С.А. (2016). Стоимостная оценка машин и оборудования (секреты метода ДДП). М.: Опцион. [**Smolyak S.A.** (2016). *Valuation of machinery and equipment (secrets of the DCF method)*. Moscow: Option (in Russian).]

Смоляк С.А. (2018). О затратном подходе к оценке машин и оборудования // *Вестник ЦЭМИ РАН*. Вып. 1. DOI: 10.18254/S0000090-2-1 [**Smolyak S.A.** (2018). On the cost approach to the machinery and equipment valuation. *Bulletin of CEMI*. Issue 1. DOI: 10.18254/S0000090-2-1 (in Russian).]

Смоляк С.А. (2019). Оптимизация количества и периодичности ремонтов // *Экономическая наука современной России*. № 2. С. 84–103. [**Smolyak S.A.** (2019). Optimization of the number and frequency of repairs. *Economics of Contemporary Russia*, 2, 84–103. DOI: 10.33293/1609-1442-2019-2(85)-84-103 (in Russian).]

Федотова М.А. (ред.). (2018). Оценка машин и оборудования. Учебник. Изд. 2-е. М.: ИНФРА-М. 324 с. [**Fedotova M.A.** (Ed.). (2018). *Machinery and Equipment Valuation*. Textbook. 2nd ed. Moscow: INFRA-M. 324 p. (in Russian).]

Aven T. (1983). Optimal replacement under a minimal repair strategy. *Advances in Applied Probability*, 15, 1, 198–211. DOI: 10.2307/1426990

Bartholomew-Biggs M., Zuo M.J., Li X. (2009). Modelling and optimizing sequential imperfect preventive maintenance. *Reliability Engineering & System Safety*, 94, 53–62. DOI: 10.1016/j.ress.2008.03.002

Horenbeek A. van, Pintelon L., Muchiri P. (2010). Maintenance optimization models and criteria. *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, 1 (3), 189–200. DOI: 10.1007/s13198-011-0045-x

IVS (2019). *Effective 31 January 2020.* London: International Valuation Standards Council.

Jiang R. (2018). Performance evaluation of seven optimization models of age replacement policy. *Reliability Engineering & System Safety*, 180 (C), 302–311. DOI: 10.1016/j.ress.2018.07.030

Kijima M. (1989). Some results for repairable systems with general repair. *Journal of Applied Probability*, 26, 89–102.

Welch R.B. (1943). *Depreciation of buildings for assessing purposes*. Chicago: International association of assessing officers.

The income approach to the problems of optimizing the repair policy

© 2022 S.A. Smolyak

S.A. Smolyak,
Central Economics and Mathematics Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia; e-mail: smolyak1@yandex.ru

Received 01.10.2021

Abstract. The article is devoted to the application of approaches and methods used in the valuation of assets to the problems of reliability theory — the assignment of service life and the timing of preventive repairs to degrading item that is subject to failures. In the works on reliability, changes in the characteristics of the item after repair are described by Kijima models and their modifications, in which the state of item is characterized by a virtual / effective age. A similar indicator has been widely used in appraisal activity since the middle of the last century. Meanwhile, it turns out that indicators of this type do not allow us to adequately describe the state of degraded repairable items. It is proposed to describe their condition by two indicators — the age (operating time) at the beginning of the current inter-repair cycle and the same in this cycle. In combination with Kijima's ideas, this allows us to offer a more adequate model of changing the item's characteristics after repair. To assign service life and terms of preventive maintenance of items, a well-grounded criterion of optimality is required. It is shown that the usually accepted criterion of the minimum expected maintenance and repair costs per unit of time do not meet the interests of enterprises participating in the market. We propose to use the so-called income approach to valuation, focused on maximizing the market value of the enterprise (in the simplest case, this approach leads to the criterion of the expected discounted costs per unit of work performed by the item). This makes it possible to assess the market value of the work performed by the item necessary for calculations, and the corresponding assessment method can be attributed to the cost approach. We construct and analyze the corresponding mathematical models, provide an algorithm for solving them and a numerical example demonstrating the irrationality of commonly used repair policies.

Keywords: lifetime, repair policy, optimization criterion, degradation, Kijima models, valuation, income approach.

JEL Classification: D21, D25, D46, D81.

For reference: **Smolyak S.A.** (2022). The income approach to the problems of optimizing the repair policy. *Economics and Mathematical Methods*, 58, 2, 112–124. DOI: 10.31857/S042473880019997-5

ЭКОНОМИКА И МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ, 2022, том 58, № 2, с. 125–126

М.Д. Ильменскому — 85

Михаил Дмитриевич Ильменский — кандидат технических наук, руководитель научного направления «Экономическая информатика», член дирекции и ученого совета ЦЭМИ РАН, действительный член Международной академии информатизации. Окончил Московский авиационный институт и курсы повышения руководящих работников при Московском энергетическом институте.

С 1960 по 1966 г. работал в НИИ, а с 1966 по 2016 г. руководил лабораторией глобальных вычислительных сетей и информационно-управленческих технологий ЦЭМИ РАН, с апреля 1996 по май 2018 г. — заместитель директора по научной работе, а начиная с июня 2018 г. — научный руководитель направления и отделения «Экономической информатики» ЦЭМИ РАН.

Кандидатская диссертация Михаила Дмитриевича «Принципы построения комплекса технических средств АСУ крупного автотранспортного предприятия», защищенная в 1974 г., стала одной из пионерных работ в нашей стране в этом направлении и была посвящена решению самой актуальной на тот момент задачи — ускоренной информатизации ключевых отраслей народного хозяйства. И сегодня эта задача не потеряла свою актуальность, поэтому при возникшей необходимости активного импортозамещения продукции IT-сферы подходы к разработке автоматизированных систем, предложенные М.Д. Ильменским, получат дополнительный импульс к внедрению.

М.Д. Ильменский является одним из ведущих специалистов в области внедрения новых информационных технологий в экономические исследования. Под его руководством и непосредственном участии был создан Вычислительный центр института, на базе которого были проведены исследования на Автокомбинате № 1 Главмосавтотранса, а также выполнялись работы по заказам различных министерств и ведомств. В течение ряда лет М.Д. Ильменский являлся одним из руководителей по международному проекту с НИВЦ города Братислава.

В начале 1990-х годов М.Д. Ильменский принял активное участие в создании в нашей стране системы Интернет. В это время в руководимом им отделении был создан первый в стране узел сети «Bitnet» на базе отечественной вычислительной техники, который позднее стал узлом Интернет в сети РАН–МГУ. Функционирующий в настоящее время узел является головным в Отделении общественных наук РАН. К узлу ЦЭМИ РАН в сети Интернет подключены институты гуманитарного профиля, вузы и другие научные организации. На узле института в сети РАН–МГУ внедряются новые современные информационные технологии и аппаратно-программные средства, а также проводятся работы по созданию распределенных информационных систем, баз данных для экономических исследований, защите информации, анализу трафика информационных потоков.

В ЦЭМИ РАН Михаил Дмитриевич также участвовал в выполнении совместных исследований с Московским казначейством, Госкомпромом СССР, Министерством культуры, Госкомспортом, различными медицинскими институтами и другими организациями.

В возглавляемом М.Д. Ильменским отделении ведутся исследовательские и практические работы по внедрению новых информационных технологий в экономические исследования, а также по компьютерным сетям, созданию Web-серверов, распределенным информационным и управляющим системам, созданию базы данных по российским ресурсам Интернет, развитию и адаптации программных средств, внедрению компьютерных технологий в издательскую деятельность, защите информации и др. Под руководством и при непосредственном участии М.Д. Ильменского имеющийся узел международной компьютерной сети Интернет, функционирующий в настоящее время в корпоративной сети РАН–МГУ, был значительно модифицирован в связи с резко возросшими киберугрозами.

В возглавляемых Михаилом Дмитриевичем подразделениях выполнялся большой объем работ по программам Отделения общественных наук РАН, целевым программам РАН, приоритетным направлениям РАН, грантам РФФИ и РГНФ. Михаил Дмитриевич имеет более шестидесяти опубликованных работ.

В разные годы М.Д. Ильменский входил в состав ряда комиссий Российской академии наук, а в качестве полномочного представителя директора ЦЭМИ РАН активно работал в Совете директоров РАН.

Помимо научно-практической деятельности, Михаил Дмитриевич отдает много сил решению многочисленных текущих вопросов, поставленных Министерством науки и высшего образования, связанных как со сложной хозяйственной деятельностью института, так и с сопровождением современных систем учета научной информации, необходимых для успешной реализации национальных целей развития России.

За значительный вклад в развитие научной сферы и добросовестный труд Михаил Дмитриевич награжден двенадцатью правительственными наградами, имеет благодарность от Минобрнауки РФ, президента РАН, неоднократно награждался почетными грамотами Президиума РАН, отмечался Фондом содействия науки, грантом «Открытое общество».

Коллектив ЦЭМИ РАН и редколлегия журнала сердечно поздравляют Михаила Дмитриевича с 85-летием. Желают ему здоровья и новых творческих успехов!

ЭКОНОМИКА И МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ, 2022, том 58, № 2, с. 127–128

Ю.Е. Сцепинский

7 марта 2022 г. на восемьдесят седьмом году жизни после тяжелой болезни скончался известный ученый, доктор экономических наук, профессор, генерал в отставке Юрий Евгеньевич Сцепинский.

Юрий Евгеньевич в 1958 г. окончил физический факультет Саратовского государственного университета им. И.Г. Чернышевского. С 1958 по 1968 г. Сцепинский работал в НИИ-4 Министерства обороны СССР; затем в 1966–1967 гг. стажировался в качестве аспиранта в Лондонском университете, а в 1968–1972 гг. возглавлял работы по советско-германскому контракту в Министерстве приборостроения СССР.

В 1969 г. он защитил кандидатскую диссертацию, посвященную исследованию адаптивных автоматизированных систем телеконтроля и управления методами имитационного моделирования на ЭВМ.

В ЦЭМИ АН СССР Юрий Евгеньевич Сцепинский работал с июля 1973 по май 1985 г. Свой трудовой путь в ЦЭМИ РАН он начинал в должности старшего научного сотрудника в лаборатории автоматизированных систем управления объединениями и предприятиями. Затем стал руководителем научной группы учета внешних факторов в системах управления, а потом возглавил лабораторию ситуационного моделирования в отделе сложных социально-экономических систем. В апреле 1984 г. Юрий Евгеньевич был назначен на должность заместителя директора по науке ЦЭМИ АН СССР, в которой проработал до апреля 1985 г.

В 1972–1982 гг. институты Академии наук СССР выполняли научно-исследовательскую работу по теме «Экспорт-АН». Инициаторами работ по этой теме были академики Н.П. Федоренко, Е.М. Примаков, Г.А. Арбатов и Н.Н. Иноземцев, доктора экономических наук А.А. Модин и В.С. Дадаян. В результате консультаций с представителями аналитической службы заказчика было сформировано общее техническое задание на комплексную научно-исследовательскую работу, целью которой являлось создание методологии оценки состояния международных отношений, выявление и прогнозирование признаков возникновения кризисных ситуаций и возможных конфликтов, порождающих угрозу безопасности Советского Союза и стран социалистического содружества.

Ю.Е. Сцепинский являлся высококвалифицированным специалистом в области информационно-аналитических систем и применения математических методов и вычислительной техники для исследования экономических и социально-политических процессов. Это позволило ему стать одним из авторов в комплексном плане исследований по теме «Экспорт-АН». Результаты этой работы имели

важное военно-экономическое и политическое значение для безопасности и обороны нашей страны. Разработчиками были предложены модели: СОВМОД (эконометрическая модель экономики СССР), МОДУС (эконометрическая модель экономики США), МИЛЕКС (информационно-аналитическая система для оценки военно-экономической деятельности стран мира), ТРИАДА (информационно-аналитическая модель отношений США — СССР — Китай), «Расстановка» (проблемно-ориентированная информационно-аналитическая система для анализа расстановки политических сил в Конгрессе США по основным вопросам советско-американских отношений).

В ЦЭМИ РАН Юрий Евгеньевич создал ряд препринтов и статей, главу в монографии, методические рекомендации общим объемом более 50 п.л. В 1984 г. он защитил докторскую диссертацию на тему «Проблемы методологии информационно-аналитического моделирования военно-экономической деятельности зарубежных государств».

После ухода из ЦЭМИ РАН Юрий Евгеньевич в 1990–1991 гг. входил в группу авторов, разрабатывавших Концепцию безопасности России и Закон РФ от 1992 г. «О безопасности». В 1991–1994 гг. он возглавлял Российский институт стратегических исследований в должности директора.

Юрий Евгеньевич — автор специальных исследований военно-экономической деятельности США, сопоставительного анализа военных расходов США и СССР (1940–1995 гг.), НАТО и стран Варшавского договора, результатом которых явился прогноз соотношения сил сторон и последствий милитаризации советской и российской экономик. В 1992 г. Юрий Евгеньевич опубликовал служебный справочник данных по НАТО, который был распространен среди всех членов Верховного Совета РСФСР. Юрий Евгеньевич входил в авторскую группу западноевропейских ученых по оценке хода экономических реформ в России и участвовал в переговорах российских парламентариев с представителями НАТО.

Юрий Евгеньевич уделял большое внимание развитию международных научных контактов. Был организатором ряда международных семинаров и конференций — «Конверсия и сотрудничество» (1992 г.), «Финансовая стратегия экономических реформ в России» (1993 г.) — под эгидой Российского института стратегических исследований. Он постоянно вел активную научно-исследовательскую и преподавательскую работу, являясь членом Международного института мира (IIP) в Вене (Австрия).

С середины 1990-х годов Юрий Евгеньевич осуществлял научно-консультационную работу, будучи советником Федеральной службы по валютно-экспортному контролю РФ (1995 г.), советником министра юстиции РФ (1996 г.), советником министра внутренних дел РФ, уполномоченным Председателя Правительства РФ по привлечению инвестиций в российскую экономику, советником Председателя Счетной палаты РФ (2000–2005 гг.), экспертом Федеральной службы по военно-техническому сотрудничеству с иностранными государствами (2001–2012 гг.), вице-президентом Международного делового клуба «Экономист» (2003–2010 гг.).

С 2002 по 2013 г. Юрий Евгеньевич — советник генерального директора НПО «Омский радиозавод им А.С. Попова», а с 2013 г. — председатель совета директоров Группы компаний «Дукс».

Юрий Евгеньевич Сцепинский был профессором, генерал-майором в отставке, членом-корреспондентом РАЕН, академиком Академии военных наук.

Юрий Евгеньевич оставил о себе добрую память у всех, кто знал его лично, работал с ним или просто общался. Внимательный и доброжелательный, Юрий Евгеньевич всегда был готов прийти на помощь нуждающимся в ней. Он постоянно поддерживал коллег и своих учеников. До последних дней он сохранял контакты с ЦЭМИ РАН.

Светлая память о Юрии Евгеньевиче останется в сердцах его коллег, учеников, последователей и друзей.

Коллектив ЦЭМИ РАН, друзья и коллеги Юрия Евгеньевича выражают соболезнования его родным и близким. Редколлегия журнала ЭММ присоединяется к ним.

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
АКАДЕМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ
ГУМАНИТАРНЫХ НАУК

НА БАЗЕ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

с 1994 года

Преподаватели – ведущие российские ученые

- более 30% – доктора наук
- более 45% - кандидаты наук

Стажировки в:

- ведущих научно-исследовательских организациях
- органах государственной власти
- крупнейших общественных организациях
- бизнес-структурах

Интеграция науки и образования

Бюджетные места

Насыщенная студенческая жизнь

Отсрочка от армии

БАКАЛАВРИАТ

МАГИСТРАТУРА

АСПИРАНТУРА

НАПРАВЛЕНИЯ ПОДГОТОВКИ:

- История
- Философия
- Политология
- Социология
- Международные отношения
- Зарубежное регионоведение
- Востоковедение и африканистика
- Психология
- Культурология
- Археология
- Менеджмент
- Юриспруденция
- Экономика

КОНТАКТНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Горячая линия: +7 (499) 238-04-12

E-mail: info@gaugn.ru

facebook.com/gaugn

instagram.com/gaugn_/

vk.com/gaugn

gaugn.ru

Лицензия 90Л01 № 0009385 регистр. № 2323 от 9 августа 2016 г.
Свидетельство о государственной аккредитации № 3207 от 24 июля 2019 г.

ЭКОНОМИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

НА БАЗЕ ЦЕНТРАЛЬНОГО ЭКОНОМИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА РАН

БАКАЛАВРИАТ

Экономика

Экономическая логистика

Менеджмент организации

Менеджмент в СМИ и рекламе

МАГИСТРАТУРА

Экономика и управление наукой, технологиями и инновациями

Общий и стратегический менеджмент

АСПИРАНТУРА

Экономика

ЦЭМИ РАН — крупнейший центр отечественной и мировой экономической науки, собравший под своей эгидой целое созвездие блестящих ученых с мировыми именами. Теоретические дисциплины преподают ведущие ученые, а практические занятия — специалисты бизнес-школ и консультанты по управлению, маркетингу и финансам.

Студенты факультета с первых дней могут проходить стажировки в ведущих научных институтах, принимать участие в различных проектах, международных симпозиумах и конференциях.

Выпускники факультета получают фундаментальную экономическую подготовку, умение квалифицированно разбираться во всех разделах и современных течениях экономической и управленческой науки, что дает им дополнительные преимущества для трудоустройства в органах государственного управления, коммерческих и консалтинговых компаниях, исследовательских центрах, рекламных и информационных агентствах, а также в сфере науки и высшего образования.

5 ПРИЧИН ПОСТУПИТЬ В ГАУГН

ВЫДАЮЩИЕСЯ ПРЕПОДАВАТЕЛИ

Ученые из научно-исследовательских институтов РАН, включая академиков, членов-корреспондентов, докторов и кандидатов наук.

ВОСТРЕБОВАННОСТЬ ВЫПУСКНИКОВ

Выпускники востребованы на рынке труда. Контакты с будущими работодателями устанавливаются во время практики.

МЕЖДУНАРОДНОЕ СОТРУДНИЧЕСТВО

Некоторые лекции читают приглашенные специалисты из других стран. Большое внимание уделяется языковой подготовке.

УДОБСТВО

Факультеты находятся в Москве в непосредственной близости от метро. Обучение в магистратуре и аспирантуре в основном проходит в вечернее время. Подать документы можно онлайн.

СТУДЕНЧЕСКАЯ ЖИЗНЬ

Студенты ГАУГН могут участвовать в многочисленных студенческих клубах («Что? Где? Когда?», Клуб политического анализа, Китайский разговорный клуб и др.).