ISSN 0424-7388

Том 60, № 3 Июль – Август – Сентябрь 2024

ЭКОНОМИКА И МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ

НАУКА
1727

Российская академия наук

ЭКОНОМИКА И МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ

Том 60 № 3 2024

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, И.У. Зулькарнай, В.Л. Квинт, Г.Б. Клейнер, М. Кубонива, А.М. Либман, В.Н. Лившиц, В.Л. Макаров, В.В. Окрепилов, В.М. Полтерович, А.В. Савватеев, Н.М. Светлов, 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, 2024
© Составление. Редколлегия журнала «Экономика и математические методы», 2024

СОДЕРЖАНИЕ

Том 60, № 3, 2024

Теоретические и методологические проблемы

Седунова Р.Т., Голиченко О.Г. Взаимосвязь результативности инновационной деятельности промышленных предприятий с показателями технологической новизны продукции 5

Мировая экономика

Фальцман В.К. Экологическая трансформация капитализма 20

Плущевская Ю.Л. Модель «векового» цикла накопления финансового капитала 30

Народнохозяйственные проблемы

Торопцев Е.Л., Кандохова М.М., Гудиева Н.Г. Динамический межотраслевой баланс как инструмент анализа структурной политики 43

Региональные проблемы

Окрепилов В.В., Гагулина Н.Л. Моделирование качества жизни Санкт-Петербурга и регионов Северо-Запада 54

Отраслевые проблемы

Быстров А.В., Радайкин А.Г., Загуменнов Ф.А., Бутенко Ю.В. Экосистемная модель развития отрасли беспилотных авиационных систем 70

Арсланов М.В., Ратникова Т.А. Ценовой индекс на компьютерные игры: что скрыто от невооруженного глаза? 82

Математический анализ экономических моделей

Акбердина В.В., Шориков А.Ф., Коровин Г.Б., Сиротин Д.В. Агент-ориентированная модель трехуровневого иерархического минимаксного управления региональным промышленным комплексом 94

Косимов З.О. Методы оценивания интегрированной дисперсии: проблемы устойчивости к скачкам в высокочастотных временных рядах 107

Муляев К.Н., Переход С.А. Деформация кривых волатильности российского фондового рынка на примере маржируемых опционов на фьючерсные контракты на индекс РТС 118

Russian Academy of Sciences

ECONOMICS AND MATHEMATICAL METHODS

Volume 60 No. 3 2024

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), Gavrilets Yu.N., Kleiner G.B., Kuboniwa M., Kvint V.L., Libman A.M., Livshits V.N., Makarov V.L., Okrepilov V.V., Polterovich V.M., Savvateev A.V., Shitova I.S. (Deputy Editor-in-Chief), Svetlov N.M., Ustyuzhanina E.V. (Deputy Editor-in-Chief), Volchkova N.A., Volkonskiy V.A., Zulkarnay I.U.

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, 2024
© Composition. Editorial Board of Economics and Mathematical Methods, 2024

CONTENTS

Volume 60, no. 3, 2024

Theoretical and methodological problems

Sedunova R.T., Golichenko O.G. Connection of innovation activity effectiveness and technological novelty of innovation output 5

World economy

Fal'tsman V.K. Ecological transformation of capitalism 20

Plushchevskaya Y.L. Model of "secular" cycle of financial capital accumulation 30

Problems of national economy

Toroptsev E.L., Kandokhova M.M., Gudieva N.G. Dynamic input–output balance as a tool for structural policy analysis 43

Regional problems

Okrepilov V.V., Gagulina N.L. Quality of life modeling in St. Petersburg and the Northwest regions 54

Industrial problems

Bystrov A.V., Radaykin A.G., Zagumennov F.A., Butenko Yu.V. Ecosystem model of development of the unmanned aircraft systems industr 70

Arslanov M.V., Ratnikova T.A. Price index for computer games: What is hidden from the naked eye? 82

Mathematical analysis of economic models

Akberdina V.V., Shorikov A.F., Korovin G.B., Sirotin D.V. Agent-oriented model of three-level hierarchical minimax management of a regional industrial complex 94

Kosymov Z.O. Methods for estimating integrated variance: Jump robustness issues in high frequency time series 107

Mulyaev K.N., Perekhod S.A. Assessment of the deformation of volatility curves of the Russian stock market on the example of margined options on futures contracts on the RTS index 118

ЭКОНОМИКА И МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ, 2024, том 60, № 3, с. 5–19

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ

Взаимосвязь результативности инновационной деятельности промышленных предприятий с показателями технологической новизны продукции

© 2024 г. Р.Т. Седунова, О.Г. Голиченко

Р.Т. Седунова,
ЦЭМИ РАН, Москва; e-mail: ravilyasedunova@yandex.ru

О.Г. Голиченко,
ЦЭМИ РАН, Москва; e-mail: golichenko@rambler.ru

Поступила в редакцию 26.07.2023

Авторы выражают благодарность к.т.н., с.н.с. ЦЭМИ РАН Петру Федоровичу Андруковичу за ряд ценных предложений, которые позволили значительно улучшить данную работу, а также за помощь в обработке статистических данных при поиске функциональной зависимости, аппроксимирующей один из участков инновационной кривой. Также благодарим анонимного рецензента, критические замечания которого позволили исправить ряд недостатков и недочетов работы и сделать изложение более четким и ясным.

Аннотация. В работе исследуется связь результативности инновационной деятельности российских предприятий промышленности с уровнем технологической новизны выпускаемой ими инновационной продукции. Для этого вводится инновационная функция, которая отображает зависимость «выхода (то есть результата инновационного процесса), от факторов, измеряемых затратами на процессные и продуктовые инновации. При анализе данной функции учитывается взаимосвязь между этими двумя видами затрат. Обсуждаются гипотезы относительно свойств инновационной функции. В качестве показателя технологической результативности используется отношение величины выпуска инновационной продукции к затратам ресурсов, необходимых для ее производства. Исследуется зависимость показателя результативности от затрат на инновации. Находятся точки локальных максимумов показателя результативности (локальных технологических оптимумов) для разных размерных классов российских промышленных предприятий. Показано, что существует взаимосвязь между результативностью инновационной деятельности и уровнем технологической новизны инновационной продукции. В качестве показателя уровня технологической новизны используется доля выпуска радикально новой во всей инновационной продукции. В результате анализа определено, что при приближении к технологическому оптимуму (по мере повышения показателя результативности инновационной деятельности) происходит смена ориентации инновационного производства с выпуска радикальной на выпуск инкрементальной инновационной продукции.

Ключевые слова: инновационный процесс, продуктовые и процессные инновации, зависимость выпуска инновационной продукции от затрат на инновации, инновационная функция, технологический оптимум, радикальные инновации.

Классификация JEL: O31, O47.

УДК: 330.341.

Для цитирования: **Седунова Р.Т., Голиченко О.Г.** (2024). Взаимосвязь результативности инновационной деятельности промышленных предприятий с показателями технологической новизны продукции // *Экономика и математические методы*. Т. 60. № 3. С. 5–19. DOI: 10.31857/S0424738824030015

ВВЕДЕНИЕ

Для исследования связи результативности инновационной деятельности российских предприятий промышленности с уровнем технологической новизны выпускаемой ими инновационной продукции необходимо установить зависимость результата («выхода») инновационной деятельности от необходимых факторов инновационного производства. Для этого в первом разделе вводится инновационная функция, отображающая эту зависимость.

В литературе известна модель функции, связывающей выпуск с факторами производства — производственная функция. Возникает вопрос, насколько концепция производственной функции

(даже с учетом технического прогресса) применима к описанию инновационной функции. Этот вопрос обсуждается в первом разделе работы.

Далее принимается во внимание существующее в литературе, посвященной инновациям, мнение о наличии связи между продуктовыми и процессными инновациями. В какой-то мере такая взаимосвязь напоминает связь между факторами эффективности производственных ресурсов неоклассической производственной функции, описываемой в литературе по индуцированным инновациям. Природа и свойства функциональной связи между процессными и продуктовыми инновациями, ее учет в инновационной функции, а также характеристики самой инновационной функции (с учетом этой связи) анализируются во втором разделе работы. Здесь же определяется зависимость технологического оптимума от рассматриваемых характеристик данной функции.

В третьем разделе излагается методология построения локальных одномерных инновационных функций, обладающих необходимыми свойствами, для российских предприятий промышленности. Методология построения апробируется на статистических данных, предоставляемых Росстатом РФ.

В четвертом разделе исследуются характеристики найденных технологических оптимумов. В частности, анализируется наличие взаимосвязи между близостью фирмы к технологическому оптимуму и избираемой фирмой инновационной стратегией.

1. ИННОВАЦИОННАЯ ФУНКЦИЯ

Нас будет интересовать *инновационная деятельность фирмы*, под которой понимается совокупность всех процессов внутри фирмы, результатом которых является выпуск продукции, обладающей свойствами технологической новизны. Будем рассматривать инновационный процесс как «черный» ящик со своими «входами» и «выходами» (Голиченко, 2016).

«Входы» и «выходы» производственного и инновационного процессов

Следует отметить, что «выходом» производственной функции является выпуск всей продукции соответствующих производственных единиц, в то время как в инновационной функции в качестве «выхода» рассматривается *инновационная продукция*, т.е. продукция, обладающая свойством технологической новизны.

«Входами» в производственную функцию служат такие производственные факторы, как труд, капитал, земля и предпринимательская деятельность. Иногда в качестве фактора производственной функции рассматривается фактор научно-технического прогресса (см., например, (Acemoglu, 2009, 2015)).

В производственной функции все факторы научно-технического прогресса, как правило, рассматриваются как источники процессных инноваций (Acemoglu, 2009). Что же касается «выхода» производственной функции, учитывающей научно-технический прогресс, то в нем специально не выделяется инновационной части продукции. Однако инновационный процесс гораздо шире, чем применение фирмой процессных инноваций. В первую очередь он заключается в создании продуктовых инноваций, которых характеризует смена качества выпускаемого продукта, а также проведение поддерживающих ее процессных инноваций (Clark, Fujimoto, 1992; Abernathy, William, James, 1978).

В инновационной функции «входами» служат два интегральных фактора: затраты на продуктовые и процессные инновации. Они включают затраты на достаточно широкий диапазон факторов (OECD, Eurostat, 2018): исследования и разработку новых продуктов, дизайн новых продуктов, приобретение машин и оборудования, связанных с созданием технологических инноваций, приобретение новых технологий, патентов, лицензий, промышленных образцов и полезных моделей, программных средств, а также инжиниринг, обучение и подготовку персонала, маркетинговые исследования, связанные с инновациями, и т.п.

Описание зависимости между «входами» и «выходом» инновационной функции

Перейдем к обсуждению свойств, которыми должна, на наш взгляд, обладать инновационная функция:

$$P = f(x, y), \tag{1}$$

где P — объем выпуска инновационной продукции; x — ресурсы, непосредственно направленные на создание продуктовых инноваций (измеряемые затратами на продуктовые инновации); y — ресурсы, направленные на создание процессных инноваций (измеряемые затратами на процессные инновации), поддерживающих инновации продуктовые.

Для удобства формального анализа примем, что инновационная функция является непрерывно дифференцируемой. Также будем считать, что ее первые частные производные по каждому интегральному фактору (виду затрат) положительны на интервале $(0, \infty)$, полагая, что, как и в случае неоклассической производственной функции, вовлечение каждой новой единицы фактора (затрат на него) приводит к увеличению объемов инновационной продукции.

Важным свойством неоклассической производственной функции является так называемое условие Инады (Inada) (Uzawa, 1963). Его содержательный смысл заключается в том, что условно «первая» единица капитала или труда, вовлекаемого в производственный процесс, высокопродуктивна, так как предельный продукт стремится к бесконечности. В то же время условно «последняя» единица вовлекаемого ресурса избыточна, а предельный продукт, возникающий в результате ее вовлечения, близок к нулю.

Для инновационной функции нельзя утверждать, что «первая» единица вовлекаемого инновационного ресурса высокопродуктивна, в силу большой неопределенности и высоких рисков, сопровождающих инновационный процесс на начальной стадии. Более того, можно считать, что «первая» единица вовлекаемого ресурса не приносит дохода и фактически направлена не на выпуск, а на организацию производства инновационной продукции, а так называемая последняя единица вовлекаемого инновационного ресурса приносит нулевой доход (точнее — нулевой объем инновационной продукции). Тогда для P_x и P_y — частных производных функции $P(x, y)$ по x и y для $x > 0$ и $y > 0$ — имеем аналог условия Инады:

$$\lim_{x\to 0} P_x(x,y) = 0, \quad \lim_{x\to \infty} P_x(x,y) = 0, \tag{2}$$

$$\lim_{y\to 0} P_y(x,y) = 0, \quad \lim_{y\to \infty} P_y(x,y) = 0. \tag{3}$$

Кроме того, допустим, что частные производные функции ограничены на интервале $(0, \infty)$ и положительны. В силу действия условий (2) и (3) естественно считать, что предельная производительность какого-либо инновационного ресурса при фиксации другого на одних интервалах положительной полуоси возрастает, а на других убывает. Иными словами, вместо закона убывающей доходности, действующего для неоклассической производственной функции, для инновационной функции предполагается действие закона смены монотонности доходности на $(0, \infty)$.

2. УЧЕТ ВЗАИМОСВЯЗИ МЕЖДУ ПРОДУКТОВЫМИ И ПРОЦЕССНЫМИ ИННОВАЦИЯМИ

В литературе часто проводятся различия между продуктовыми и процессными инновациями. Под первыми обычно понимается введение (в производство или на рынок) нового продукта, под вторыми — инновации, связанные с уменьшением стоимости производства уже существующего продукта.

Более полное и точное определение этих типов инноваций, которого мы будем придерживаться ниже, находим в так называемом Руководстве Осло (OECD, Eurostat, 2018). Предлагается считать, что *продуктовые инновации* представляют собой внедренный на рынке новый или усовершенствованный продукт (товар, услугу), значительно отличающийся от продукта, производившегося ранее. Под *процессными инновациями* понимается внедрение нового или улучшенного бизнес-процесса, значительно отличающегося от соответствующего бизнес-процесса, применявшегося ранее (OECD, Eurostat, 2018).

Вопросам выяснения роли процессных инноваций и анализа взаимосвязи между продуктовыми и процессными инновациями посвящено много работ (Clark, 1985; Clark, Fujimoto, 1992; Abernathy, 1975; Abernathy, William, James, 1978; Damanpour, Aravind, 2006; Kraft, 1990). Так, согласно Кларку жизненные циклы продуктовых и процессных инноваций тесно взаимосвязаны. С одной стороны, продуктовые инновации стимулируют изменения в процессах, которые должны обеспечивать производство нового продукта. С другой стороны, процессные инновации способны запустить изменения в характеристиках выпускаемого продукта. Можно сделать вывод о том, что продуктовые инновации, а значит, и затраты на них, задают необходимый для их создания состав и масштабы процессных инноваций.

Следует также отметить, что и в теории производственной функции, и в литературе, посвященной *индуцированным инновациям*, также специально исследуется вопрос о наличии связи между различными факторами технического прогресса. Так, в работе (Kennedy, 1964) автор рассматривает взаимосвязь между темпами прироста коэффициентов эффективности производственных факторов — труда и капитала. Эти коэффициенты можно трактовать как факторы технического прогресса. Здесь речь идет о возможности замещения дополнительной единицы одного фактора технического прогресса единицей другого.

В настоящей работе полагается существование иной взаимосвязи между двумя характеристиками технического прогресса (более точно — *инновационного*): между затратами на продуктовые инновации и на процессные инновации, поддерживающие продуктовые. Эта связь описывает не процессы замещения факторов одного вида другими, а процессы их дополнения. Иными словами, будем считать, что каждая новая единица затрат на продуктовые инновации требует вовлечения дополнительных затрат на процессные инновации. Следуя этому правилу, примем:

$$y = \varphi(x), \tag{4}$$

$$\varphi(0) = 0. \tag{5}$$

Примем, что $\varphi(x)$ является непрерывно дифференцируемой функцией, имеет положительную первую производную при $x \in (0,\infty)$. Одновременно первая единица затрат на продуктовые инновации не требует значительных средств на поддерживающие их процессные инновации, т.е.

$$\lim_{x\to 0} \varphi'(x) = 0, \tag{6}$$

а при значительных объемах затрат на продуктовые инновации действует принцип «избыточности» затрат на процессные инновации:

$$\lim_{x\to \infty} \varphi'(x) = 0. \tag{7}$$

С учетом описанной взаимосвязи представим инновационную функцию как функцию лишь от затрат на продуктовые инновации $P = f(x, \varphi(x)) = P(x)$. Далее x будем называть инновационным ресурсом.

Характеристики инновационной функции

При исследовании процесса создания инновационной продукции нас будет интересовать средняя производительность инновационного ресурса

$$AP(x) = P(x)/x \tag{8}$$

и его предельная производительность

$$MP(x) = dP(x)/dx. \tag{9}$$

Будем считать, что чем выше значение средней производительности инновационного ресурса $AP(x)$, тем более эффективным (в смысле экономической отдачи инновационного ресурса) является инновационный процесс в точке x. Величину инновационного ресурса x_0, при котором достигается максимум $AP(x)$, назовем технологическим оптимумом инновационного процесса, или точкой максимальной отдачи процесса. Что же касается предельной производительности, то нетрудно заметить, что в силу предположений о характере зависимости (2), (3), (5)–(7) имеют место соотношения $\lim_{x\to 0} MP(x) = 0$ и $\lim_{x\to \infty} MP(x) = 0$.

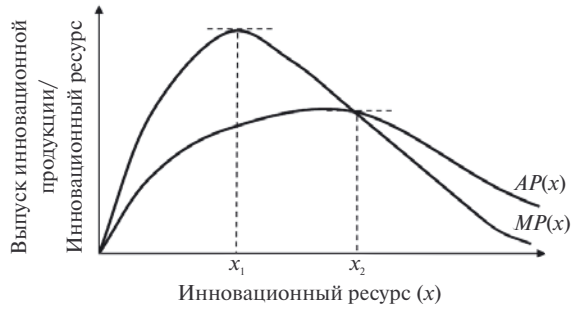

Рис. 1. Кривые зависимости средних (*AP*) и предельных (*MP*) продуктов от инновационного ресурса

Последние в известном смысле дублируют соотношения (2) и (3) при учете связи между процессными и продуктовыми инновациями. Их следствие состоит в том, что на действительной полуоси $(0,\infty)$ кривая $MP(x)$ имеет интервалы, на которых возрастание функции $MP(x)$ сменяется ее убыванием.

Обсудим поведение кривых $MP(x)$ и $AP(x)$, для рассматриваемой инновационной функции. Положим, что на искомых участках кривая $MP(x)$ имеет куполообразный вид (рис. 1). Причем в некоторой точке x_2 кривые $MP(x)$ и $AP(x)$

пересекаются и значения среднего и предельного продуктов совпадают. В этой точке $AP(x)$ достигает максимума.

Принимая описанные зависимости средних и предельных инновационных продуктов как данные, нетрудно установить вид функции выпуска инновационной продукции от инновационного ресурса. Действительно, принимая во внимание, что $MP(x)$ в произвольной точке x равно тангенсу угла наклона касательной к кривой $P(x)$ в точке x, а значение $AP(x)$ в точке x равно тангенсу угла наклона, составленного лучом, проведенным из начала координат к точке плоскости с координатами $(x, P(x))$, можно изобразить кривую выпуска инновационной продукции от инновационного ресурса (рис. 2). Все выше сказанное, и в частности вид кривой $P(x)$, позволяет предположить, что модель инновационной функции в предлагаемой выше интерпретации близка к некоторой сигмоидальной зависимости.

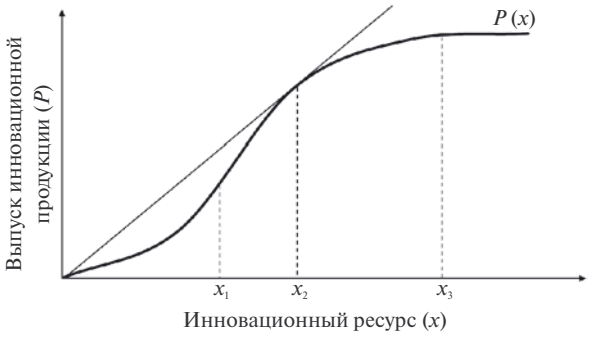

Рис. 2. Кривая зависимости выпуска инновационной продукции от инновационного ресурса

Далее будем считать, что инновационная функция на определенном участке затрат найдена, если удалось установить вид зависимости объемов инновационной продукции от выпуска, согласующийся с видом кривой рис. 2. После установления аналитического вида инновационной функции непосредственно вычисляются ее характеристики $AP(x)$ и $MP(x)$ и ищется точка пересечения соответствующих им кривых, т.е. локальный технологический оптимум.

3. МЕТОДОЛОГИЯ ПОСТРОЕНИЯ ЛОКАЛЬНЫХ ОДНОМЕРНЫХ ИННОВАЦИОННЫХ ФУНКЦИЙ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ И НАХОЖДЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОПТИМУМОВ

Источником статистических данных, используемых в работе, является информация, содержащаяся в «Сведениях об инновационной деятельности организации» (форма № 4-инновация), предоставленных в разрезе «группировки организаций в зависимости от численности работников». Кодировка используемых таблиц данной формы указана в табл. 1, содержание — в табл. 2–4.

К сожалению, доступные статистические данные не позволяют непосредственно определить «выходы» и «входы» инновационного процесса для конкретных промышленных предприятий. Однако это возможно для совокупностей предприятий, сгруппированных по размерным классам, состоящих из фирм, численность занятых на которых ограничена определенным диапазоном, задаваемым Росстатом. Предприятия группируются в следующие совокупности с числом занятых (человек): ≤ 49; 50–99; 100–199; 200–249; 250–499; 500–999; 1000–4999; 5000–9999; 10 000 и более.

Таблица 1. Перечень таблиц-источников статистических данных формы № 4-инновации

Показатель, используемый в работе	Кодировка таблицы	Название таблицы	Строка или столбец искомого показателя
Объем выпуска инновационной продукции	T7.1-T-2(5)	Объем инновационных товаров, работ, услуг организаций промышленного производства и сферы услуг (без НДС, акцизов и других аналогичных платежей), осуществлявших технологические инновации	Столбец 9
Затраты на продуктовые инновации	T8.2-T5	Затраты на технологические, маркетинговые и организационные инновации по видам деятельности организаций, осуществлявших технологические инновации	Строка 527
Число предприятий, осуществлявших технологические инновации	T5-T5	Число организаций, имевших завершенные инновации	Столбец 4

Таблица 2. Объем выпуска инновационной продукции, тыс. руб., 2013–2018 гг.

Численность работников предприятия, человек	Объем выпуска инновационной продукции					
	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Всего по РФ	2 012 407 933	1 439 595 734	1 997 198 947	2 475 674 018	2 092 809 755	1 987 007 081
≤ 49	2 771 822	2 491 505	1 914 363	11 166 096	14 616 803	5 166 742
50–99	3 028 287	7 118 934	7 033 675	12 654 739	12 147 333	5 870 024
100–199	30 823 512	19 691 667	36 381 223	29 839 168	36 685 566	53 633 726
200–249	10 049 784	15 294 488	11 173 079	18 486 274	21 115 087	28 483 776
250–499	51 961 198	109 842 964	139 916 501	106 461 660	109 588 487	83 333 600
500–999	74 305 061	80 532 940	143 509 174	161 792 477	200 087 197	188 766 589
1 000–4 999	1 289 728 107	687 494 492	1 089 008 428	1 540 606 389	950 221 420	899 756 696
5 000–9 999	152 277 520	203 110 613	313 018 656	272 599 654	305 655 967	391 260 347
10 000 и более	397 462 642	314 018 132	255 243 848	322 067 562	442 691 896	330 735 582

Таблица 3. Затраты на продуктовые инновации, тыс. руб., 2013–2018 гг.

Численность работников предприятия, человек	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Всего по РФ	511 111 005	612 249 064	600 394 721	658 529 539	753 480 974	783 866 365
≤ 49	3 542 170	4 061 337	3 755 694	3 615 814	5 183 401	4 935 661
50–99	3 836 844	5 676 321	6 584 040	5 982 571	5 511 289	8 278 611
100–199	18 598 734	11 902 480	17 459 656	23 537 928	27 435 633	15 981 634
200–249	7 144 258	9 166 925	7 344 425	15 038 053	13 381 815	16 566 839
250–499	38 756 799	41 491 444	37 391 030	46 486 653	57 117 847	44 221 173
500–999	49 703 719	78 353 861	98 148 664	71 959 125	95 404 711	88 139 101
1 000–4 999	242 363 547	327 279 419	271 195 536	335 840 537	334 895 964	374 332 917
5 000–9 999	102 828 873	103 178 706	122 298 883	116 133 521	113 662 532	117 316 825
10 000 и более	44 336 061	31 138 573	36 216 794	39 935 337	100 887 783	114 093 605

Таблица 4. Число предприятий, осуществлявших технологические инновации, ед., 2013–2018 гг.

Численность работников предприятия, человек	Число предприятий					
	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Всего по РФ	4392	4452	4437	4662	4499	4725
≤ 49	556	606	615	710	668	812
50–99	374	379	392	425	400	450
100–199	718	738	771	798	769	772
200–249	301	310	309	325	298	298
250–499	785	805	784	817	778	800
500–999	688	670	652	674	697	707
1 000–4999	833	809	782	779	759	762
5 000–9999	99	96	96	92	90	87
10 000 и более	38	39	36	42	40	37

Исходя из имеющихся в открытом доступе данных (см. табл. 2–4), представляется рациональным использовать концепцию типичного представителя, или репрезентативного агента, который рассматривается как некоторое «усредненное» предприятие в данном размерном классе. Для того чтобы ввести такого «представителя», каждый экономический показатель, соответствующий размерному классу, делится на число предприятий в нем. Введение «представителя» означает, что (по умолчанию) делается предположение об однородности инновационных предприятий класса[1]. При этом характеристики, полученные для представителей каждого размерного класса, значительно разнятся. В этом проявляется разнородность совокупности рассматриваемых однородных размерных классов.

При установлении количественных соотношений между объемом инновационной продукции и затратами на продуктовые инновации учитывается наличие временного лага между приложенными усилиями (в данном случае — между затратами на продуктовые инновации) и результатом (инновационной продукцией). Для этого производилось усреднение значения указанных показателей за 6 лет (в период с 2013 по 2018 г.). Данные, представленные ниже, указаны в ценах 2018 г.

Полученные точки с координатами (x, y), равными средним затратам на продуктовые инновации и среднему объему выпуска инновационной продукции, соединяются плавной кривой, которую мы назовем инновационной кривой. При этом полученная инновационная кривая не является общей, универсальной для всех размерных классов, а представляет собой объединение совокупности локальных инновационных кривых. Следует отметить, что для используемого массива данных найденная кривая описывает взаимно однозначную зависимость между затратами на продуктовые инновации и выпуском инновационной продукции, а каждая ее часть характеризует действие локальной инновационной функции на определенном интервале затрат. Признаком перехода к новой технологии, т.е. к новой локальной инновационной функции, является смена убывающей доходности на возрастающую на стыке соответствующих интервалов затрат. Существование подобной технологической трансформации скорее всего связано с тем, что классы предприятий, типичные представители которых имеют затраты на соответствующих интервалах, привязаны к определенным отраслям производства или видам экономической деятельности, требующих применения разных инновационных технологий. Проверить данную гипотезу, к сожалению, не удается, поскольку предоставляемые в открытом доступе статистические данные не позволяют непосредственно ассоциировать размерные классы с конкретными видами экономической деятельности.

Необходимо отметить, что в силу сказанного переход предприятий из одного размерного класса в другой затруднен для разделенных участков кривой, соответствующих разным локальным инновационным функциям (т.е. разным видам экономической деятельности). Это означает, что определенные выше типичные представители достаточно жестко привязаны к определенным интервалам затрат.

Алгоритм нахождения технологического оптимума

Для нахождения технологического оптимума для российских инновационных предприятий в промышленности применяется следующий алгоритм.

1. На первом этапе, используя статистические данные, устанавливается примерный вид инновационной кривой $P(x)$. На плоскости, по горизонтальной оси которой откладываются затраты на продуктовые инновации, а по вертикальной — значения объемов инновационной продукции, плавной линией соединяются соответствующие точки (x, y).

2. Далее приблизительно определяются интервалы, на которых происходит смена возрастающей доходности инновационного ресурса на убывающую.

3. На каждом интервале осуществляется построение в явном виде локальной инновационной функции.

4. Для каждой локально определенной инновационной функции аналитически вычисляются $MP(x)$ и $AP(x)$.

5. Для полученных локальных $AP(x)$ и $MP(x)$ ищутся точки их пересечения. Анализируется положение локальных максимумов $AP(x)$.

[1] Здесь и далее под инновационными предприятиями понимаются предприятия, осуществлявшие технологические инновации.

Для поиска аналитического вида инновационной кривой будем использовать логистическую функцию в виде $P(x) = a / \left(1 + e^{-b(x-c)}\right)$, где a, b и c — некоторые положительные константы.

Следует отметить, что концепция сигмоидальных (S-образных) кривых занимает заметное место в литературе, описывающей инновационные процессы. Обычно эти работы посвящены жизненному циклу инновационного продукта, в частности его диффузии. К ним следует прежде всего отнести основополагающие работы Р. Фостера (Фостер, 1987) и Е. Роджерса (Rogers, Singhal, Quinlan, 2014), нашедшие широкий отклик среди исследователей (см., например, Сахал, 1985; Варшавский, 1984; Дубинина, 2018; Щепина, 1990). В нашем случае сигмоидальная кривая возникает как способ описания производства, т.е. начала жизненного цикла целой совокупности продуктов, воплощающих технологические изменения.

Инновационная кривая российских предприятий промышленности

Выполняя предложенный алгоритм, был найден примерный вид инновационной кривой российских инновационных предприятий промышленности (рис. 3).

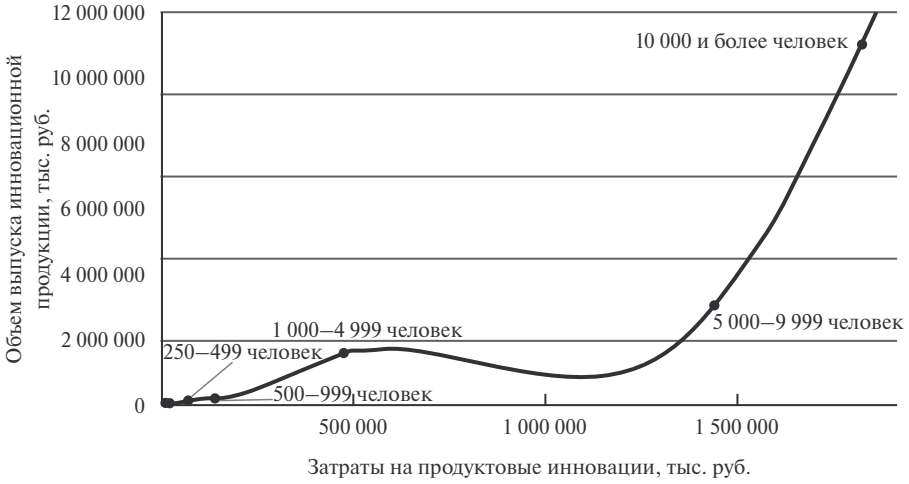

Рис. 3. Кривая зависимости объема инновационной продукции от затрат на продуктовые инновации для российских промышленных предприятий, 2013–2018 гг.

Эта гладкая кривая получена интерполяцией кубическим сплайном[2]. Кривая позволяет выделить две группы размерных классов и два диапазона затрат, для которых предложенная теоретическая модель инновационной функции локально применима. В первую группу вошли размерные классы с числом занятых до 999 человек, во вторую группу — от 500 до 4999 человек. Размерный класс с 500–999 занятыми является пограничным для двух данных групп и учитывается дважды.

Что касается наиболее крупных предприятий (с 5000 и более занятыми), то они, по сути являясь конгломератом неоднородных производств, противоречат гипотезе об однородности производства. Иными словами, введение типичного представителя для них является некорректным. В дальнейших рассуждениях будем избегать анализа поведения подобных предприятий.

Инновационная функция предприятий с числом занятых до 999 человек

Рассмотрим подробнее первую совокупность предприятий — с числом занятых до 999 человек. На рис. 4 изображена инновационная кривая, действующая на соответствующем интервале затрат, которая задается формулой $P(x) = 349990{,}2583 / \left(1 + 24{,}94061434\, e^{-0{,}000053x}\right)$. Она получена в результате непосредственной настройки сигмоидальной модели инновационной функции, а именно логистической функции, аппроксимирующей значения в точках типичных представителей на выделенном диапазоне затрат методом наименьших квадратов. В силу того что крайняя точка типичного представителя с 500–999 занятыми является граничной и принадлежит двум интервалам затрат, допускается большее отклонение кривой от данной точки, чем от других. Коэффициент детерминации для такой модели составляет 0,9966 (без учета крайней точки).

[2] Использовался кубический сплайн SRS1 Cubic_Spline for Excel (https://www.srs1software.com/SRS1CubicSplineForExcel.aspx).

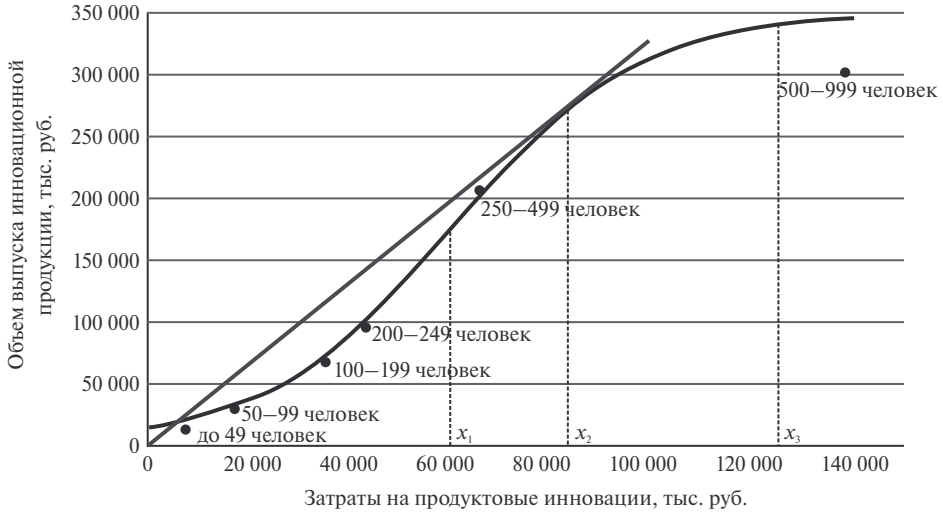

Рис. 4. Возможная инновационная кривая для российских промышленных предприятий с числом занятых до 999 человек, 2013–2018 гг.

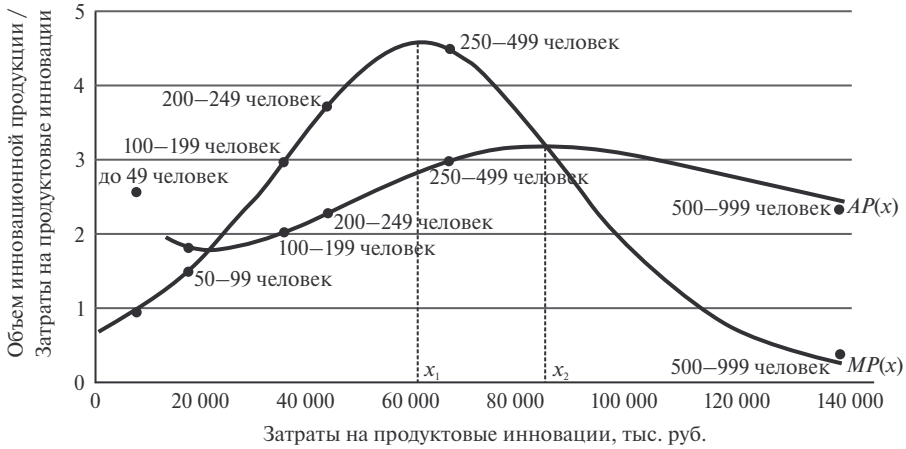

Рис. 5. Кривые зависимости средних и предельных продуктов от затрат на продуктовые инновации для российских предприятий промышленности с числом занятых менее 999 человек, 2013–2018 гг.

На рис. 4 также отмечены точки, соответствующие типичным представителям размерных классов.

Для полученной функциональной зависимости «выхода» инновационного производства от инновационного ресурса $P(x)$ были найдены ее производная и зависимость средней производительности от инновационного ресурса (рис. 5).

Из графика видно, что локальный технологический оптимум для данной группы размерных классов достигается при среднегодовых затратах на продуктовые инновации около 83 млн руб. Величина локального технологического оптимума при этом — около 3,2. Наиболее близким размерным классом к локальному технологическому оптимуму является класс предприятий с числом занятых от 250 до 499 человек.

Инновационная функция предприятий с числом занятых более 500 человек

Что касается второго интервала затрат, на который приходятся три размерных класса с числом занятых более 500 человек, то и здесь настройка сигмоидальной зависимости инновационной функции, точнее — логистической, осуществлялась вдоль кривой, полученной методом кубического сплайна (см. рис. 3).

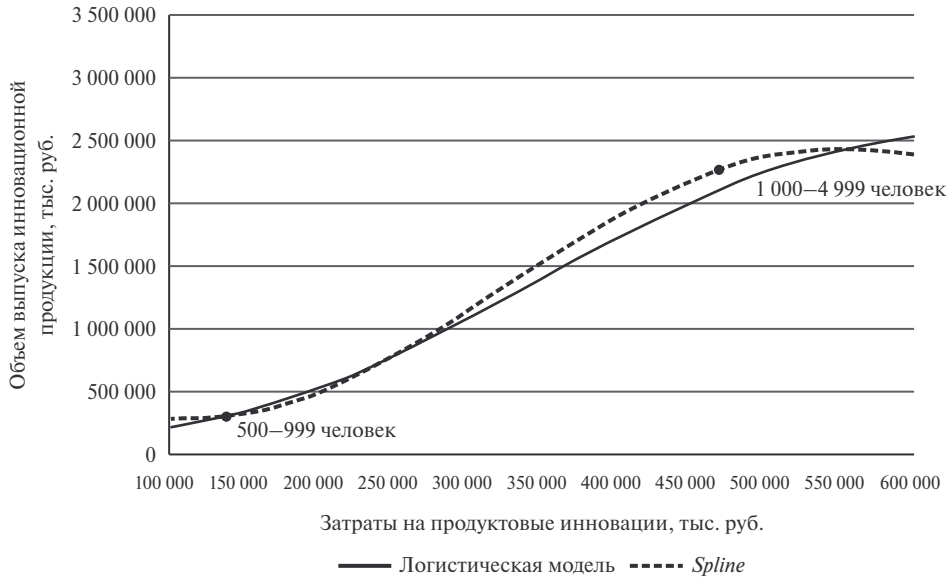

Рис. 6. Возможная инновационная кривая для российских промышленных предприятий с числом занятых более 500 человек, 2013–2018 гг.

Для определения параметров этой функции достаточно определить ее значения в точках, близких к асимптотам (т.е. близких к ее минимуму и максимуму) и точке перегиба. Поэтому за первые две точки примем точки локальных максимума и минимума инновационной кривой, имеющих следующие координаты: $x_{min} = 138\,302$, $y_{min} = 300339$; $x_{max} = 552\,000$, $y_{max} = 2\,428133$, а координаты точки перегиба в силу симметричности логической функции можно найти из соотношений $x = 0{,}5\left(x_{min} + x_{max}\right)$, $y = 0{,}5\left(y_{min} + y_{max}\right)$.

В результате искомая логистическая функция примет вид

$$P\left(x\right) = 2728472 / \left(1 + 32{,}6677\,\mathrm{e}^{-0{,}00001010489x}\right). \tag{10}$$

Две возможные инновационные кривые, одна из которых получена методом кубического сплайна, а вторая отражает найденную зависимость в виде логистической функции (10), показаны на рис. 6.

Далее, использовав аналитическое выражение инновационной функции (10), были получены зависимости средних и предельных продуктов от инновационного ресурса (рис. 7). Локальный

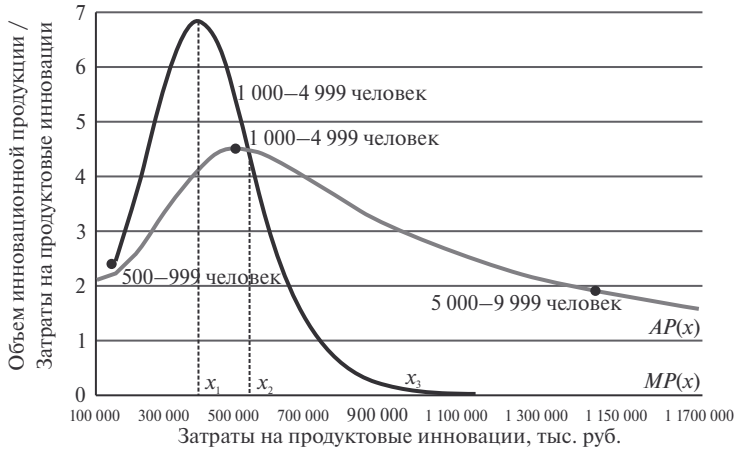

Рис. 7. Кривая зависимости средних и предельных продуктов от затрат на продуктовые инновации для российских предприятий промышленности с числом занятых более 500 человек, 2013–2018 гг.

технологический оптимум данной группы размерных классов достигается при среднегодовых затратах на продуктовые инновации около 575 млн руб. Величина оптимума составляет 3,8, оптимум достигается вблизи размерного класса предприятий с 1000–4999 занятыми.

В силу малого числа точек для аппроксимации инновационной кривой вид (10) локальной инновационной функции весьма приблизительный. Однако если считать, что гипотезы, сформулированные в предыдущих частях работы, для этой функции выполняются, то можно принять, что кривые, приведенные на рис. 7, качественно верно характеризуют ситуацию и позволяют достаточно адекватно судить об особенностях инновационного поведения российских промышленных предприятий данного класса.

4. АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ

Полученные кривые для двух групп размерных классов предприятий (инновационная кривая; кривая средней производительности инновационного ресурса; кривая предельной производительности инновационного ресурса) соответствуют предполагаемому виду кривых (см. рис. 1–2). Иными словами, удалось выделить два интервала затрат, на которых подтверждается гипотеза о смене участков возрастающей и убывающей доходности. Определены точки локальных технологических оптимумов и размерные классы, наиболее близкие к ним. Первый из локальных технологических оптимумов находится в окрестности размерного класса 250–499 человек, второй — вблизи размерного класса с 1000–4999 занятыми. Значения максимумов различаются незначительно (3,2 и 3,8 соответственно).

Влияние инновационной стратегии предприятий на близость к технологическому оптимуму

Интерес представляет ответ на вопрос, зависит ли инновационная стратегия фирмы от ее близости к технологическим оптимумам.

Напомним, что инновационная продукция делится по степени технологической новизны на значительно технологически улучшенную продукцию, являющуюся результатом существенных изменений уже известной продукции на рынке, и продукцию, не имеющую аналогов на рынке (OECD, Eurostat, 2018). Первую категорию продукции относят к инкрементальным инновациям, а вторую — к радикальным (Leiferet al., 2000).

В качестве инновационных стратегий фирмы будем рассматривать: выпуск инкрементальных и выпуск радикальных инноваций. В реальности обычно фирмы комбинируют эти стратегии, поэтому в качестве показателя ориентации инновационной стратегии фирмы на создание того или иного вида инновации, будем использовать долю выпуска радикальных инноваций в общем объеме выпуска инновационной продукции.

Для расчета этого показателя дополнительно к данным из табл. 2–4 использовались также сведения, указанные в табл. 6–7.

Таблица 6. Источник статистических данных об объеме выпуска радикальных инноваций Формы № 4-инновации

Показатель, используемый в работе	Кодировка таблицы	Название таблицы	Строка или столбец
Объем выпуска радикальных инноваций	Т7.4–Т-2(5)	Объем инновационных товаров, работ, услуг организаций промышленного производства и сферы услуг (без НДС, акцизов и других аналогичных платежей), новых для рынка сбыта организации, осуществлявших технологические инновации	Столбец 6

Таблица 7. Объем выпуска радикальных инноваций, тыс. руб.

Численность работников предприятия, человек	Объем выпуска радикальных инноваций					
	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Всего по Российской Федерации	327 542 238	333 062 444	310 850 891	354 444 002	537 775 461	416 246 640
≤ 49	2 178 773	2 324 479	1 516 392	10 190 815	13 362 693	3 000 069
50–99	1 539 281	1 932 898	1 753 155	3 774 241	10 574 195	2 856 847

Окончание таблицы 7

Численность работников предприятия, человек	Объем выпуска радикальных инноваций					
	2013	2014	2015	2016	2017	2018
100–199	4 718 905	6 826 183	12 541 484	7 014 568	20 223 168	18 784 490
200–249	3 682 363	2 699 750	2 189 179	6 169 087	7 202 798	8 742 452
250–499	19 948 715	26 367 327	32 955 473	19 475 113	47 026 503	30 261 341
500–999	9 239 792	27 401 741	29 311 849	71 476 841	95 897 514	43 330 306
1 000–4 999	92 106 760	131 086 931	131 054 051	172 136 925	185 994 719	192 903 912
5 000–9 999	19 670 933	95 012 969	53 002 831	40 968 023	38 028 501	57 145 553
10 000 и более	174 456 717	39 410 166	46 526 478	23 238 389	119 465 371	59 221 671

Для ответа на поставленный вопрос совместим на одном графике кривую среднего инновационного продукта $AP(x)$ и гистограммы доли выпуска радикальной технологически-инновационной продукции для типичных представителей различных размерных классов (рис. 8).

Анализ проводится для типичных представителей двух совокупностей размерных классов, упомянутых выше. Из данных на рис. 8 видно, что самые малые предприятия с числом занятых до 49 человек обладают наиболее высоким показателем доли радикальных инноваций: почти 87% выпускаемой инновационной продукции является новой для рынка. При увеличении численности занятых доля новой для рынка продукции снижается. Для предприятий, на которых занято от 50 до 99 человек, данный показатель вдвое меньше по сравнению с самым малым классом предприятий по численности работников и составляет 44%; для предприятий с числом занятых от 100 до 199 человек — 32,6%, а для предприятий, на которых работают от 200 до 249 человек и от 250 до 499 человек, доля новой для рынка продукции равна 28,3 и 29,4% соответственно.

Получаем эмпирическую закономерность, которая показывает, что чем ближе размерный класс предприятия к локальному технологическому оптимуму, т.е. максимуму средней производительности инновационного ресурса, тем его стратегия менее ориентирована на создание радикальных инноваций. Аналогичная эмпирическая зависимость наблюдается и для второй совокупности размерных классов.

Рис. 8. Доля новой для рынка продукции и кривая среднего инновационного продукта для типичных представителей предприятий с числом занятых до 999 человек, 2013–2018 гг. (слева — по вертикали гистограмма, справа — кривая среднего инновационного продукта $AP(x)$; по горизонтали — объем затрачиваемого инновационного ресурса)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основной задачей работы являлось исследование зависимости технологической результативности инновационных производств от затрат на создание инновационной продукции. Для решения задачи было введено понятие «инновационная функция», в рамках которого инновационный процесс рассматривался как «черный» ящик со «входами» (затратами на процессные и продуктовые инновации) и «выходом» (инновационной продукцией). В этой функции, в отличие от неоклассической производственной функции с учетом научно-технического прогресса, «выходом» служит не общий объем отгруженной продукции, а выпуск инновационной продукции. «Входами» в инновационную функцию являются как традиционные производственные факторы, связанные непосредственно с производством инновационной продукции, так и специфичные инновационные факторы, формирующие затраты на процессные и на продуктовые инновации.

Отличия во «входах» и «выходах» двух функций и порождают иные требования к описанию функциональной зависимости между «выходом» и «входами» инновационной функции. Выполнение этих требований приводит к необходимости замены гипотезы убывающей доходности (неоклассическая производственная функция) предположением о существовании и смене участков возрастающей и убывающей доходности инновационной функции.

Был исследован вопрос о связи двух «входов» в инновационную функцию: процессных и продуктовых инноваций. Опираясь на ряд литературных источников, принята гипотеза о наличии связи между продуктовыми и поддерживающими их процессными инновациями и введена функция зависимости процессных инноваций от задающих их продуктовых. Учет этой зависимости позволил перейти к однофакторной инновационной функции, «выход» которой зависит только от затрат на продуктовые инновации. Показано, что в рамках сделанных предположений моделью такой функции является сигмоида.

Полученная модель инновационного процесса использовалась для нахождения точек технологического оптимума инновационных производств России. Для построения инновационной функции использовалось разделение инновационно активных предприятий по классам размерности. Для каждого размерного класса предприятий определялся типичный представитель, характеризующийся усредненными по данному размерному классу показателями.

Найдены две совокупности размерных классов предприятий, для которых предложенная модель инновационной функции оказалась применимой. Для каждой совокупности были установлены точки локальных технологических оптимумов и построены кривые зависимостей среднего и предельного инновационного продуктов от инновационного ресурса.

Получен ответ на вопрос о наличии взаимосвязи между инновационными стратегиями фирм (выпуска инкрементальных или радикальных инноваций) и их близостью к технологическому оптимуму. Оказалось, что по мере приближения фирмы к технологическому оптимуму меняется ориентация инновационного производства фирмы с выпуска радикальной на создание инкрементальной инновационной продукции. Если считать, что показатель технологического оптимума характеризует отдачу от инновационной деятельности, а показатель «радикальности» отображает ее разнообразие, то полученный результат можно трактовать как подтверждение известной в литературе об инновациях закономерности: рост разнообразия результатов инновационной деятельности ведет к падению отдачи, а рост отдачи приводит к падению разнообразия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

Варшавский А.Е. (1984). Научно-технический прогресс в моделях экономического развития. М.: Финансы и статистика. [**Varshavsky A.E.** (1984). *Technological progress in economic development models*. Moscow: Finansy i Statistika (in Russian).]

Дубинина М.Г. (2018). Моделирование диффузии прогрессивных технологий (на примере технологий фиксированного и мобильного широкополосного подключения к интернету) // *Вестник ЦЭМИ РАН (электронная публикация)*. № 2. Режим доступа: https://cemi.jes.su/s111111110000029-4-1/ [**Dubinina M.G.** (2018). Modeling the diffusion of advanced technologies (using the example of fixed and mobile broadband Internet connection technologies. *Vestnik CEMI RAS*, 2. Available at: https://cemi.jes.su/s111111110000029-4-1/ (in Russian).]

Голиченко О.Г. (2016). Основные типы процессов и ресурсов в национальной инновационной системе // *Инновации*. № 7 (213). С. 50–60. [**Golichenko O.G.** (2016). The general types of processes and resources in national innovation systems. *Innovations*, 7 (213), 50–60 (in Russian).]

Сахал Д. (1985). Технический прогресс: концепции, модели, оценки. М.: Финансы и статистика. [**Sahal D.** (1985). *Technical progress: Concepts, models, assessments*. Moscow: Finansy i Statistika (in Russian).]

Фостер Р. (1987). Обновление производства: атакующие выигрывают. М.: Прогресс. [**Foster R.** (1987). *Production update: Attackers win*. Moscow: Progress (in Russian).]

Щепина И.Н. (1990). Модели диффузии и замещения нововведений. Обзор литературы. М.: ЦЭМИ, АН СССР. [**Schepina I.N.** (1990). *Models of diffusion and substitution of innovations. Literature review*. Moscow: CEMI, USSR Academy of Sciences (in Russian).]

Abernathy W. (1975). A dynamic model of process and product innovation. *Omega*, 3, 639–656.

Abernathy W., William J., James M. (1978). Patterns of industrial innovation. *Technology Review*, 80, 7, 40–47.

Acemoglu D. (2009). *Introduction to modern economic growth*. Princeton: Princeton university press.

Acemoglu D. (2015). Localised and biased technologies: Atkinson and Stiglitz's new view, induced innovations, and directed technological change. *The Economic Journal*, 125, 583, 443–463.

Clark K. (1985). The interaction of design hierarchies and market concepts in technological evolution. *Research Policy*, 14, 5, 235–251.

Clark K., Fujimoto T. (1992). Product development and competitiveness. *Journal of the Japanese and International Economies*, 6, 2, 101–143.

Damanpour F., Aravind D. (2006). Product and process innovations: A review of organizational and environmental determinants. In: *Innovation, science, and industrial change: A research handbook*. Oxford: Oxford University Press, 38–66.

Kennedy C. (1964). Induced bias in innovation and the theory of distribution. *The Economic Journal*, 74, 295, 541–547.

Kraft K. (1990). Are product and process innovations independent of each other? *Applied Economics*, 22, 8, 1029–1038.

Leifer R., McDermott C., O`Connor G., Peters L., Rice M., Veryzer R. (2000). *Radical innovation: How mature companies can outsmart upstarts*. Boston, MA: Harvard Business Press.

OECD, Eurostat (2018). Oslo manual 2018: Guidelines for collecting, reporting and using data on innovation. Paris: OECD. DOI: 10, 24132764

Rogers E.M., Singhal A., Quinlan M.M. (2014). Diffusion of innovations. In: *An integrated approach to communication theory and research*. N.Y.: Routledge, 432–448.

Uzawa H. (1963). On a two-sector model of economic growth II. *The Review of Economic Studies*, 30 (2), 105–118.

Connection of innovation activity effectiveness and technological novelty of innovation output

© 2024 R.T. Sedunova, O.G. Golichenko

R.T. Sedunova,
Central Economics and Mathematics Institute, RAS, Moscow, Russia; e-mail: ravilyasedunova@yandex.ru

O.G. Golichenko,
Central Economics and Mathematics Institute, RAS, Moscow, Russia; e-mail: golichenko@rambler.ru

Received 26.07.2023

The authors express gratitude to P.F. Andrukovich, Candidate of Sciences (Techn.), Senior researcher at CEMI RAS, for a number of valuable suggestions that made possible to significantly improve this work, as well as for assistance in processing statistical data. We also thank the anonymous reviewer, whose critical comments made possible to correct a number of shortcomings of the work and make the presentation clearer and more understandable.

Abstract. The paper studies the relationship between the innovation performance of Russian industrial enterprises and the degree of technological novelty of their innovative products. For this purpose, the innovation function is introduced. That function reflects the dependence of the "output" of the innovation process on its factors measured by the costs of process and product innovations. Hypotheses about the properties of this function are discussed. The relationship between the two types of innovation costs is considered. As an indicator of technological efficiency the ratio of the value of innovative products to the innovative resource costs is used. The dependence of the performance indicator on innovation costs is investigated. The points of local maxima (local technological optimum) of the performance indicator for the size classes of Russian industrial enterprises are found. It is shown that there is a relationship between the effectiveness of innovative activity and the degree of technological novelty of innovative products. As an indicator of the degree of technological novelty the share of the innovative products new to the market in all innovative products is used. It was established that there is a change in the trend of innovative production from the production of radical to incremental innovative products when approaching the technological optimum.

Keywords: innovation process, product and process innovations, dependence of innovation output and the costs of innovation, innovation function, technological optimum, radical innovations.

JEL Classification: O31, O47.

UDC: 330.341.

For reference: **Sedunova R.T., Golichenko O.G.** (2024). Connection of innovation activity effectiveness and technological novelty of innovation output. *Economics and Mathematical Methods*, 60, 3, 5–19. DOI: 10.31857/S0424738824030015 (in Russian).

ЭКОНОМИКА И МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ, 2024, том 60, № 3, с. 20–29

МИРОВАЯ ЭКОНОМИКА

Экологическая трансформация капитализма[1]

© 2024 г. В.К. Фальцман

В.К. Фальцман,
РАНХиГС, Москва; e-mail: m975032@gmail.com

Поступила в редакцию 17.01.2024

Аннотация. Конференция ООН по изменению климата (COP28) (Объединенные Арабские Эмираты, Дубай с 30 ноября по 12 декабря 2023 г.) показала провал мировой стратегии, заложенной в целях Парижского соглашения по климату. Это побуждает вернуться к проблеме дополнительных мер защиты природной среды обитания за счет перехода к умеренным темпам роста экономики, численности населения и антропогенной нагрузки на природную среду. Статья посвящена экологическим пределам роста мировой капиталистической системы, ее экономики и численности населения планеты. Во имя сохранения природной среды обитания капитализму неотвратимо предстоит трансформация в новую посткапиталистическую формацию, способную обеспечить умеренную антропогенную нагрузку на среду обитания одновременно с ростом достигнутого уровня благосостояния населения и сохранением природной среды обитания для будущих поколений. В опасной близости от экологических пределов роста предстоит отказаться от господствующих целей максимизации прибыли, расширения масштабов экономики, численности населения. Предлагается также переориентировать население развивающихся стран мира на умеренную рождаемость за счет возрастания индексов человеческого развития и качества жизни, особенно в странах с их низким уровнем при высоком приросте численности населения. Предложена трехмерная система измерителей экономического роста, модель экономического роста, сбалансированного с состоянием природной среды.

Ключевые слова: пределы роста, численность населения, экологическая трансформация капитализма, модель посткапитализма, индекс человеческого развития, индекс качества жизни, демографическая политика Китая.

Классификация JEL: O44.

УДК: 330.35.01.

Для цитирования: **Фальцман В.К.** (2024). Экологическая трансформация капитализма // *Экономика и математические методы*. Т. 60. № 3. С. 20–29. DOI: 10.31857/S0424738824030021

1. ВВЕДЕНИЕ

Капитализм обеспечил гигантские темпы роста мировой экономики, а вслед за тем — и численности населения планеты. Всего за 70 лет (1950–2020 гг.) мировая экономика выросла в 6,8 раза, а численность населения, сформировавшаяся за многие прошлые тысячелетия, за этот небольшой исторический отрезок времени увеличилась в результате демографического взрыва в 3,1 раза. Опережающий рост мировой экономики с некоторым лагом по времени предшествовал демографическому взрыву. Иначе и быть не могло: без экономического взрыва демографический взрыв был бы невозможен.

Капитализм справился с такой высокой антропогенной нагрузкой: душевой доход — источник благосостояния человечества — в период демографического взрыва в среднем возрос в 2,2 раза (6,8 / 3,1 = 2,2). Но высокий динамизм экономики и общества сопровождался широкомасштабным разрушением природной среды обитания. Капитализм не только и даже не столько эксплуатировал труд, сколько природу. По словам Элвина Тоффлера, «“борьба с природой” достигла критической точки. Биосфера просто не вынесет дальнейшего наступления промышленности» (Тоффлер, 2004). Этот вывод подтвердила климатическая конференция ООН COP 28[2].

[1] Продолжение статьи (Фальцман, 2023).

[2] COP28 UAE — United Nations Climate Change Conference (https://www.cop28.com/).

Какова в этих условиях судьба мировой капиталистической системы хозяйства? По мнению многих классиков, включая Карла Маркса, капитализм должен погибнуть. Но — как и почему, если он так успешен? По этому вопросу существуют разные точки зрения. Некоторые из них рассмотрены в первой части статьи (см. (Фальцман, 2023)). Наряду с ними ответ на этот судьбоносный вопрос автор обосновывает следующим образом: капитализм задушит чрезмерно интенсивное разрушение окружающей природной среды обитания, в особенности — трагические последствия потепления климата.

В разд. 2 анализируются некоторые проблемы будущей экологической трансформации капитализма. Суть трансформации заключается в потери родового признака капитализма — высокого динамизма развития, после которой капитализм, подобно остановившемуся велосипеду, падает.

Ресурсы жизнеобеспечения планеты ограничены. Мировая капиталистическая система приблизилась к *пределам роста антропогенной нагрузки на среду* обитания. Развитые страны увеличивают антропогенную нагрузку за счет избыточного потребления, сверхмерного роста оборонных расходов и других затрат, непосредственно не влияющих на качества жизни. В свою очередь, при более скромном душевом потреблении многие развивающиеся страны вносят весомый вклад в антропогенную нагрузку на окружающую среду вследствие демографического взрыва численности населения. В этих условиях мировая экономика и/или, соответственно, численность населения вынуждены осознанно или стихийно тормозить свой рост. Рынки будут стагнировать. Капитализм уступит лидерство посткапиталистической системе экономики.

В разд. 3 рассмотрены движущие силы трансформации капиталистической системы — от регулирования государством (китайский путь) до саморегулирования рождаемости и прироста населения при их переходе в умеренный режим (европейский путь развития), а впоследствии — при их переходе к регулированию международным сообществом (предложение автора). Для регулирования рождаемости и прироста населения предложено использовать такие показатели международной статистики, как Индекс человеческого развития и Индекс качества жизни.

Для анализа трансформации капитализма предложено трехмерное измерение экономического роста. Сформулированы три условия экономического роста, сбалансированного с состоянием среды обитания.

2. ПОЧЕМУ ПОГИБНЕТ КАПИТАЛИЗМ

«Может ли капитализм выжить?» — этим вопросом задается Йозеф Шумпетер (Шумпетер, 1942). И отвечает: «Нет, не думаю».

Что же погубит весьма успешный мировой капитализм? По этому вопросу существуют различные точки зрения.

Обосновывая свои сомнения, Шумпетер рассматривает некоторые эндогенные угрозы капитализму: отмирание предпринимательских функций, процессы монополизации производства и реализации, подрывающие основы конкуренции, растущая социальная враждебность в обществе и другие.

Карл Маркс предсказывал гибель капитализма вследствие борьбы классов. Но о какой классовой борьбе может идти речь, например, в современной Японии, где 90% населения относит себя к среднему классу? В этих условиях проблемы классовой борьбы против капиталистической эксплуатации труда сдвигаются в сторону развивающегося мира.

А как относиться к проблеме безудержной эксплуатации природы?

Джон Гэлбрейт считает, что устои капитализма разрушит техноструктура — менеджеры, инженеры, исследователи, растущее влияние которых мотивировано не столько прибылью, сколько упрочнением собственного статуса и престижа (Гэлбрейт, 2004, первоначально опубликовано в 1967 г.). Как ни парадоксально звучит этот вывод, на наш взгляд, он близок к истине: именно научно-технические достижения лежат в основе высокого динамизма капитализма, в конечном итоге пагубного для его будущего.

Джордж Сорос развивает теорию неизбежного кризиса капитализма, связывая его с недостатками финансовых рынков и несостоятельностью политики на национальном и международном уровнях (Сорос, 2004, первоначально опубликовано в 1999 г.).

Пол Самуэльсон определил родовой признак капитализма, которым является максимизация а) прибыли предпринимателей; б) темпов экономического роста государств (Самуэльсон, 2004, первоначально опубликовано в 1970 г.). Потери этих ориентиров конкуренции, по нашему мнению, ведут к перерождению мировой капиталистической системы в некую новую историческую фармацию — *посткапитализм*.

В настоящей статье изложена концепция автора, согласно которой капитализм погубит его избыточный динамизм и непосильная нагрузка на природную среду обитания. Экзогенными источниками гибели капитализма могут стать естественные законы природы.

Мировая экономика воздействует на природную среду как на входе в систему в форме потребления природных ресурсов, в большей части невосстановимых, так и на выходе — в виде выбросов, загрязняющих атмосферу, сушу и воды. Из двух направлений роста антропогенной нагрузки загрязнение климата, видимо, несет первостепенную угрозу человечеству. Что же касается исчерпания запасов нефти и других полезных ископаемых, то вследствие успехов геологоразведки создается иллюзия их бездонности и возрастания. Поэтому для реалистичной оценки динамики прироста природных ископаемых может быть использован метод ретроспективной инвентаризации (Фальцман, 1999).

Жизненное пространство и ресурсы природной среды ограничены, а поэтому противоречат высокому динамизму капиталистической системы. Угроза заключается в том, что капитализм в силу своего динамизма не в состоянии обеспечить сохранения природной среды обитания, ведет к ее уничтожению намного более успешно, чем любые другие исторические формации. Процесс потепления климата является ключевым фактором, подтверждающим реальность возможной гибели капитализма под воздействием окружающей среды.

Угрозы изменения климата признаны всеми государствами. Система мер борьбы с потеплением климата единодушно одобрена всеми государствами в форме Парижского соглашения по климату 2015 г. (Редкий, если не единственный, случай единодушия стран мира.) Парижское соглашение предполагает ограничение потепления мирового климата за счет использования таких природосберегающих технологий, как, например, возобновляемые источники энергии (ВИЭ). Однако быстрый рост населения и потребностей в энергии в относительно бедных развивающихся странах с первых же шагов поставил под сомнение возможность ограничения нагрева атмосферы Земли пределами 1,5–2,0°C исключительно за счет отказа от традиционных ископаемых источников энергии и их замены на дорогие ВИЭ. При том что Парижское соглашение не предусматривало каких-либо санкций за невыполнение странами декларированных ими целей по защите климата. Сомнения подтвердились: потребление ископаемого топлива не только не сокращается, но быстро нарастает. Растут и выбросы парниковых газов.

Очередная Конференция ООН по проблемам глобального климата COP 28 подтвердила провал Парижского соглашения (Никифоров, 2023). На Конференции были определены дополнительные технологические источники сокращения выбросов парниковых газов. Однако мировые климатические институты констатируют нереальность этих предложений для окончательного решения задач Парижского соглашения (Николаев, 2023). В этих условиях становятся актуальны такие радикальные меры сокращения антропогенной нагрузки, как переход ряда стран в режим *умеренного прироста населения*.

Может ли человеческое сообщество обеспечить выполнение ответственных требований к сохранению климата, предусмотренных Парижским соглашением? По-видимому, да, может. Но, на наш взгляд, не только вследствие существенного увеличения использования ВИЭ, но и за счет сокращения демографического взрыва рождаемости в ряде развивающихся стран, не располагающих ресурсами для достойного жизнеобеспечения нового поколения. Этот явный источник достижения сбалансированности экономического роста с природной средой обычно деликатно замалчивается. Такое происходит, вероятно, еще и потому, что для перехода от высокой к умеренной рождаемости потребуется воля, средства и время. Например, высокоорганизованному Китаю для такого перехода потребовалось 3–4 десятилетия.

Наряду с природосберегающими технологиями выход из создавшейся ситуации, на наш взгляд, следует искать в переходе некоторых развивающихся стран от чрезмерно высоких темпов роста населения к умеренным темпам за счет *регулирования рождаемости*, *повышения индексов человеческого развития* (ИЧР) и *качества жизни* (ИКЖ) (Фальцман, 2023).

Примерно такой вариант развития в национальных границах реализует Китай. Правда, он противоречит родовому признаку капитализма — максимизации прибыли и экономического роста, что ведет к трансформации капитализма в некую новую экономическую формацию. Но такой вариант развития отвечает условиям долговременного устойчивого существования человеческого сообщества.

Хотя переход к умеренному росту населения противоречит естественному инстинкту безграничного размножения любых биологических популяций, однако он соответствует возможностям Homo sapiens обеспечивать его устойчивое и благополучное существование на длительную перспективу.

3. ПЕРЕХОД ОТ КАПИТАЛИЗМА К ПОСТКАПИТАЛИЗМУ

Показанный выше бурный рост численности человеческого сообщества замедляется, а примерно в 30 государствах он уже перерос в *стадию депопуляции*. Это преимущественно — экономически развитые страны. Причем число стран с депопуляцией населения растет и, по мнению специалистов, будет расти в будущем. Правительства этих стран в меру своих возможностей борятся с депопуляцией населения. Но в большинстве развивающихся стран рост населения происходит чрезвычайно высокими темпами. Эта тенденция является господствующей в мировой демографии. Соответственно растет антропогенная нагрузка на природную среду планеты. *Нынешнее поколение проедает ресурсы для будущего*.

Наибольший прирост населения мира, наряду с Индией, обеспечивают Нигерия, Пакистан, Демократическая Республика Конго, Эфиопия, Танзания, Индонезия, Египет. Развивающиеся страны в своей совокупности определили общую закономерность быстрого роста населения планеты.

Снизить чрезмерно высокую антропогенную нагрузку на окружающую среду позволяют природосберегающие технологии. Например, Парижское соглашение по климату предусматривает переход на возобновляемые источники энергии (ВИЭ). Однако высокая стоимость подобных технологий сдерживает их применение. Особенно в бедных странах, где население и потребление энергии растут особенно быстро, а средств для природоохранных технологий не хватает. Для снижения антропогенной нагрузки в этих странах ограничиться только природосберегающими технологиями не удастся.

По нашему мнению, для сбережения природной среды для потомков необходим переход развивающихся стран на умеренные темпы прироста населения, как в большинстве развитых стран, а в последние десятилетия — в Китае.

Емкость природной среды ограничена для каждого государства в каждый интервал времени. Поэтому ограничены оптимальные масштабы ее заселения. Балансирование численности населения с наличием природных ресурсов неизбежно. В отличие от других биологических популяций человеческое сообщество располагает реальными возможностями для контроля и регулирования прироста населения, сбалансированного с сохранением природной среды, не преступая допустимых пределов антропогенной нагрузки. В этих целях предстоит преодолеть неравномерность роста численности населения в послевоенный период в развитых странах Европы в сравнении со странами Азии и Африки (табл. 1).

В терминах S-кривой (логисты) европейские страны вступили в фазу низких темпов роста населения, когда закономерность роста можно интерпретировать как линейную зависимость в виде прямой линии с малым углом наклона к оси времени. В отличие от этого страны Азии и Африки находятся в предыдущей фазе развития высокой рождаемости и гиперболического роста населения. Причем страны азиатского континента в противовес странам Африки уже миновали точку перегиба, когда *ускорение сменяется замедлением*. В опасной близости от пределов роста

Таблица 1. Рост численности населения по континентам

Континент	1950–1980	1981–2020	1950–2020
Европа	1,21	1,11	1,34
Азия	1,89	1,54	2,91
Африка	2,13	2,11	4,49

Источник: рассчитано по данным Human Development Report 2020 (https://hdr.undp.org/content/human-development-report-2020).

человеческое сообщество должно помочь этим странам перейти на предстоящую стадию умеренного роста населения.

Как видно из данных табл. 1, численность населения европейских стран, даже с учетом притока мигрантов, растет значительно медленней, чем в странах Азии и Африки. Темпы роста численности населения в странах Азии в два с лишним раза выше, чем в странах Европе. Темпы роста населения Африки выше европейских в 3,4 раза. Такая неравномерность роста населения чревата возникновением экономических и политических коллизий. Но главная угроза направлена на будущее разрушение природной среды обитания под воздействием быстро растущего населения и мировой экономики. Прежде всего на потепление климата.

Европа уже находится на пределе антропогенной нагрузки. Правда, рост населения Европы имеет тенденцию затухать: в 1950–1980 гг. индекс роста населения составил в Европе 1,21, а в последующее 40 лет он снизился до 1,11. Прирост населения стран Европы происходит за счет мигрантов. Например, в 2023 г. численность населения Европы увеличилась на 735 тыс. человек (0,9% роста), из которых на естественный прирост населения пришлось только 162 тыс. человек, а на долю мигрантов — 573 тыс. человек. При том что реальное число мигрантов было существенно больше (897 тыс.). По опыту ряда европейских стран, с депопуляцией населения естественный прирост населения в Европе стремится к нулю.

Рост населения Азии тоже затухает, в том числе за счет Китая. Но в целом для стран азиатского континента он остается на высоком уровне: если предположить, что затухание роста в будущем останется таким же, как в прошлом, то население Азии стабилизируется не ранее чем через 60 лет — к 2080 г.

Наибольшую угрозу миру сулит рост населения стран Африка. Быстрый рост населения этого континента не собирается затухать: в период 1981–2020 гг. рост населения Африки остался примерно на уровне прошлого тридцатилетия. В этих условиях прогнозировать возможность стабилизации численности населения африканского континента было бы преждевременно.

Быстрый рост населения многих развивающихся стран пагубно отразился на качестве жизни их населения. Но главный глобальный итог заключался в непомерной антропогенной нагрузке на природную среду, уничтожении многих ее компонентов, в первую очередь климата.

В условиях появления новых технических средств мобильности нарастают волны *неузаконенной миграции избыточного населения* Азии и Африки в Европу. Приведенные выше показатели роста населения позволяют предположить, что этот процесс сохранится на долгие годы. Рассчитывать на самопроизвольное прекращение роста населения было бы рискованно. Демографический взрыв, по-видимому, в некоторых странах продлится, пусть и затухающими темпами.

Китай первым предпринял успешные шаги в регулировании рождаемости и прироста населения. В 1979–2015 гг. в этой стране проводилась демографическая политика, основанная на принципе «Одна семья — один ребенок». На государственном уровне было признано, что огромное по численности население страны перегружает ее земельные, водные и энергетические ресурсы. Проводились кампании планирования рождаемости, нацеленные на поздние браки и удлинение интервалов между рождением детей.

В 1982 г. положение о контроле рождаемости было внесено в Конституцию КНР. Статья 25 Конституции КНР гласит, что государство осуществляет планирование рождаемости, с тем чтобы привести рост населения в соответствие с планами экономического и социального развития.

К концу 1990-х годов контроль над рождаемостью стал приносить ощутимые плоды. Среднее число детей, рожденных одной женщиной, снизилось с 6 до 1,6. Прирост населения приблизился к уровню замещения поколений — 2,1 ребенка. К 2000 г. численность населения страны вышла примерно на уровень, намеченный в планах еще в 1979 г. Существенно вырос уровень образования. В 2015 г. появилась возможность ослабить жесткость первоначальных ограничений рождаемости.

Критическое осмысление опыта Китая, бесспорно, полезно развивающимся странам, особенно на первом этапе проведения новой демографической политики. Более того, на наш взгляд, было бы хорошо для начала заключить международное соглашение для контроля, регулирования рождаемости и прироста населения. Однако в дальнейшем *предпочтительней было бы управлять процессом прироста населения* — преимущественно за счет косвенного воздействия на повышение

уровня цивилизационного развития населения и перейти к саморегулированию его возрастания, как это происходит в развитых странах.

В чем же состоит суть экологической трансформации капиталистической системы хозяйства?

В докапиталистической формации экономический рост отождествлялся с накоплением национального богатства («богатства нации», по Адаму Смиту). Развитой капитализм вследствие своей высокой динамичности перешел к измерению экономического роста с помощью показателей национального дохода (ВВП и др.), которые измеряют динамику текущего благосостояния стран и народов. При этом измерение национального богатства отошло на второй план. Между тем *национальное богатство представляет собой ресурсы для будущего*. Его перевод в число второразрядных показателей означал размен интересов будущих поколений на приоритет текущих нужд. Отказавшись по умолчанию от контроля динамики национального богатства, общество пошло по пути проедания ресурсов для будущего (Фальцман, 1999).

Для оптимизации экономического роста в посткапиталистической формации можно рекомендовать систему из трех показателей:

– национальный доход (Y) на душу населения Y/N, характеризующий динамику текущего благосостояния населения (N — численность населения);

– совокупное национальное богатство $X(N)$, включая запасы природных ресурсов и человеческий капитал, отражающее факторы будущего экономического роста;

– характеристика загрязнения природной среды $Z(N)$. Например, повышение ее температуры до конца века на 1,5°С, как в Парижском соглашении, соответствующие масштабы выбросов в атмосферу CO_2 либо какие-то иные показатели, характеризующие состояние природной среды обитания.

Экономический рост можно считать сбалансированным с состоянием природной среды, если динамика показателей роста экономики отвечает следующим трем условиям.

1. Загрязнение природной среды не возрастает во времени (t):

$$Z(N,t)-Z(N,\ t\ +1\ )\geq 0. \tag{1}$$

2. Национальный доход на душу населения не убывает во времени (t):

$$(Y\ /\ N,t)-(Y\ /\ N,t+1)\leq 0. \tag{2}$$

Это условие предполагает, как минимум, сохранение достигнутого уровня жизни.

3. Совокупное национальное богатство, аккумулирующее ресурсы для будущего развития экономики, возрастает за счет прироста человеческого капитала:

$$X(N,t)-X(N,\ t+1)<0. \tag{3}$$

Условие (1) является строгим, а (2) и (3) — нет: в отдельные годы они могут не выполняться, но в остальное время должны компенсировать нежелательные отклонения.

Рекомендованное выше трехмерное измерение роста в посткапиталистической формации отличается от линейных представлений о развитии капитализма и предшествующих формаций прежде всего тем, что фактор состояния природной среды обитания в ней поставлен во главу угла, на один уровень с повышением текущего благосостояния, а оскудение природных запасов может компенсировать накопление человеческого капитала.

Регулирующим параметром выступает численность населения и определяющий ее показатель рождаемости. Размер численности населения, обеспечивающий достижение целевого значения показателя $Z(N)$, определяется для условий максимального использования возможностей сохранения природной среды за счет природоохранных технологий (Env).

4. СПОСОБЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ И САМОРЕГУЛИРОВАНИЯ РОСТА НАСЕЛЕНИЯ

В большинстве стран с высокой рождаемостью общественное мнение одобряет ее уровень. В этом случае переход к умеренным темпам рождаемости требует изменения менталитета. Как показывает опыт Китая, для этого можно использовать систему экономических и административных мер с преобладанием мягкой силы. Система мер корректировки менталитета может быть закреплена на международном уровне в форме соглашения для регламентирования рождаемости

Таблица 2. Зависимость прироста населения от ИЧР

Показатели	Мир	Развитые страны	Развивающиеся страны	В том числе слаборазвитые страны
Число стран	189	50	139	49
Прирост населения на 1 тыс. жителей	8,7	3,3	10,7	22,6
ИЧР	0,721	0,898	0,658	0,515
ВНП на душу населения	20,12	48,56	9,97	3,03

Источник: рассчитано автором по данным Отчета ООН о развитии человечества — Human Development Report (https://hdr.undp.org/sites/default/files/hdr 2020_ru.pdf).

и прироста населения. Поскольку вопросы сохранения климата имеют глобальный характер, наряду с государственными соглашениями потребуются *международные демографические соглашения*.

Соглашению, возможно, должен предшествовать ряд научных публикаций и выступлений в СМИ, обосновывающих преимущества умеренных темпов рождаемости и прироста населения. Лозунг такого соглашения: «Пролетарии всех стран, соединяйтесь в борьбе за сохранение природной среды обитания, климата и качества жизни».

Международная помощь слаборазвитым странам должна быть скоординирована с таким соглашением. Правовой основой регламентирования рождаемости должны оставаться права человека. Однако высокая рождаемость имеет многие глобальные последствия: изменение климата, незаконная аннексия жизненного пространства стран Европы и США мигрантами из бедных стран, войны за ресурсы и т.д. Поэтому проблемы регламентирования рождаемости и прироста населения, по-видимому, должны найти более полное *отражение в государственном и международном праве*.

Необходимым условием завершения демографического взрыва, сокращения высокого уровня рождаемости в некоторых развивающихся странах до его умеренного уровня является повышение индекса человеческого развития (ИЧР)[3] населения этих стран. ИЧР — интегральный показатель человеческого развития введен в мировую статистику по предложению ООН. Показатель изменяется в пределах от 0 до 1. Индекс рассчитывается по данным ВНП на душу населения, по показателям ожидаемой продолжительности жизни и периода обучения. Среднее значение ИЧР для всех стран мира равно 0,721. В табл. 2 показано влияние ИЧР на прирост населения в развитых, развивающихся и слабо развитых странах.

Показатель прироста населения в развитых странах на 1 тыс. жителей составляет 3,3. Он — втрое меньше, чем в развивающихся странах (10,7), что является следствием более высокого человеческого развития, включая существенно более высокий уровень производства на душу населения: в развитых странах среднедушевое производство почти в 5 раз выше по сравнению с развивающимися странами. ИЧР населения развитых стран — выше в 1,4 раза. Таким образом, прирост населения тем больше, чем бедней страна, ниже индекс человеческого развития её населения.

Закономерность повышения прироста населения по мере снижения уровня человеческого развития однозначно подтверждает статистика слаборазвитых стран. Здесь прирост населения на 1 тыс. жителей возрастает еще в два раза. Бедность плодит саму себя своей избыточной многодетностью.

Хуже того: чрезмерно быстрый рост населения в некоторых развивающихся странах определяет глобальную тенденцию роста антропогенной нагрузки на среду обитания и ее уничтожения. Поэтому мировое сообщество должно взять под контроль прирост населения, оказать содействие развивающимся странам в повышении ИЧР и, соответственно, — в сокращении прироста их населения. В сохранении климата, сокращении избыточной антропогенной нагрузки заинтересованы все без исключения страны мира.

Ограничение рождаемости сокращает рост оборонного и экономического потенциала государства. Поэтому новая демографическая политика, хотя и направлена на сохранение природной среды обитания, может встретить противодействие со стороны определенных кругов общества. Но ниже приведены результаты исследования положительного влияния перехода к умеренной рождаемости

[3] Human Development Index.

Таблица 3. Влияние демографических показателей на качество жизни

№ группы стран	Средний индекс качества жизни по группе	Число рождаемых на 1 тыс. жителей	Прирост населения на 1тыс. жителей
1	181	11,2	1,8
2	166	11,4	1,6
3	153	11,4	1,6
4	138	11,5	3,7 (0,8)
5	123	13,9	5,4
6	109	15,9	7,5
7	100	14,3	7,1
8	76	21,9	15,3

Источник: рассчитано автором по данным статистики ООН.

и сдержанному приросту населения на качество жизни. Поэтому новая демографическая политика, способная повысить качество жизни, всегда найдет поддержку у широких слоев населения.

Качество жизни — сложный и комплексный показатель, характеризующий все стороны жизнедеятельности человека — уровень удовлетворения его материальных, духовных и социальных потребностей. Индекс качества жизни за 2021 г. был подсчитан в рамках программы ООН для 83 стран мира. Индекс оценивался по следующим показателям: ВВП на душу населения, свобода делать жизненный выбор, доверие к социальным и политическим институтам, продолжительность жизни, уровень здравоохранения, социальные программы (забота о людях). Значение индекса качества жизни изменялось в пределах от 191 (Швейцария) и 190 (Дания) до 65 (Иран и Бангладеш) и 52 (Нигерия).

В табл. 3 приведены показатели для 80 стран мира, ранжированные и сгруппированные в восемь групп по значению индекса качества жизни. Объектом настоящего исследования являются усредненные показатели по каждой группе. Работа со средними по группе показателями позволяет нивелировать многообразные специфические особенности каждой входящей в нее страны.

Первые четыре группы стран характеризует рождаемость примерно одного уровня — в среднем около 11,0–11,5 рожденных на 1 тыс. жителей. Исключение представляет только Оман с вдвое более высоким уровнем рождаемости. Прирост населения в этих группах находится также примерно на одном уровне (1,6–1,8 на 1 тыс. жителей). Исключением является четвертая группа, в которой показатель прироста населения составляет 3,7. Это исключение определили две страны с повышенным приростом населения — Саудовская Аравия (15,2 на 1 тыс. жителей) и Израиль (16,4 на 1 тыс. жителей). Если исключить эти две страны как нетипичные для группы, то средний прирост населения по группе (указан в скобках) четко соответствует динамике показателя.

Показатель качества жизни в странах, составляющих первые четыре группы, инвариантен по отношению к воспроизводству населения. Высокое качество жизни в странах этих групп определяют другие факторы: инновации — в странах Европы, Северной Америки, в Японии и Южной Корее, нефтяная рента — в странах Ближнего Востока. С рядом оговорок страны из первых четырех групп по критерию инвариантности качества жизни по отношению к воспроизводству населения можно классифицировать как *развитые* страны.

Принципиальное отличие следующих четырех групп (№ 5 — № 8) от предыдущих является значимая зависимость среднего уровня индекса качества жизни населения от показателей рождаемости и его естественного прироста. По мере убывания среднего индекса качества жизни со 123 (в группе № 5) до 76 (в группе № 8) практически монотонно возрастают показатели рождаемости с 13,9 до 21,9 и прироста населения на 1 тыс. жителей — с 5,4 до 15,3. Влияние демографических показателей на качество жизни для этой совокупности стран сомнений не вызывает. По этому критерию 40 стран, входящих в четыре последние группы, можно классифицировать как *развивающиеся* страны.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сомнения ряда известных ученых-экономистов по поводу возможности сохранения мировой капиталистической системы в будущем получают новое подтверждение с экологических позиций, необходимости защиты природной среды обитания от ее разрушения.

В послевоенном периоде в мире сложилась ситуация, при которой успешное развитие капитализма способствовало бурному росту населения в ряде развивающихся стран и в мире в целом. Возникла угроза избыточности антропогенной нагрузки на природную среду на локальном, а в последнее время — и на глобальном уровнях (потепление климата). Развивающиеся, и особенно *слаборазвитые, страны расплачиваются за демографический взрыв ростом собственной бедности*.

Родовым признаком капиталистической системы является максимизация экономического роста как следствие конкуренции предпринимателей за прибыль. Но возможности роста мировой экономики ограничены пространственными, климатическими, энергетическими, биологическими и другими ресурсами жизнеобеспечения. В этих условиях капиталистическая система вынуждена приостановить бурный рост, тем самым потеряв свой родовой признак — высокий динамизм.

Развитые страны, находясь в противофазе с развивающимися, уже реализуют «новую нормальность» — умеренный рост численности населения, переходящий в стадию растущей депопуляции. Демографическая политика развитых стран в основном направлена на ликвидацию депопуляции за счет поддержки рождаемости. Там, где это не удается, национальные экономики прибегают к трансграничной миграции.

Самопроизвольный и добровольный переход населения некоторых развивающихся стран в режим умеренной рождаемости по типу развитых стран предполагает рост Индекса человеческого развития их населения. Дополнительным бонусом для населения в результате его перехода к умеренной рождаемости является рост его материального благосостояния и качества жизни.

Эволюция капитализма в новую посткапиталистическую формацию неизбежна. Контуры будущей формации пока неочевидны, так как находятся за пределами возможности научного прогнозирования — в сфере футурологии. Можно только предполагать, что при благоприятном сценарии человеческое сообщество будет развиваться в направлении умеренного прироста населения, увеличения доли среднего класса, защиты природной среды обитания от избыточной антропогенной нагрузки, по пути достижений в гуманитарной сфере. Конкуренция выйдет за материальную сферу в область интеллектуального творчества, как это уже можно наблюдать в научном сообществе.

Капитализм с его ориентацией на максимальный рост антропогенной нагрузки на среду обитания, видимо, будет отвергнут, но не обществом, а природой под воздействием исчерпания емкости окружающей среды.

Для регулирования роста мировой экономики, сбалансированного с состоянием среды обитания, предложена система показателей, в основе которой положены характеристики природной среды обитания, душевой национальный доход и показатель совокупного национального богатства, включающего запасы природных ресурсов и накопления человеческого капитала. Управляющими параметрами в этой системе, наряду с природоохранными технологиями, выступают рождаемость и прирост населения. Умеренный рост населения и антропогенной нагрузки на природную среду позволяет сохранить устойчивое благосостояние человеческого сообщества на длительную перспективу, повышать его ИЧР и ИКЖ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

Гэлбрейт Дж. (2004). Новое индустриальное общество. В кн.: «Мировая экономическая мысль. Сквозь призму веков». Т. 4. «Век глобальной трансформации». Отв. ред. Ю.Я. Ольсевич. М.: Мысль. С. 373–385. [**Galbraith J.K.** (2004).The new industrial state. In: *World economic ideas. Through the Prism of Ages. Lectures of Nobel laureates*. Vol. 4. “A century of global transformation”. Yu.Ya. Olsevich (resp. ed.). Moscow: Mysl’, 373–378 (in Russian). Originally published in 1967 by Houghton Mifflin.]

Никифоров О. (2023). Три провала мировой климатической стратегии. Темпы зеленой трансформации экономики недостаточны для достижения температурных целей Парижского соглашения // *Независимое военное обозрение*. *НГ-энергия*. 11.12.2023 (online). Режим доступа: https://nvo.ng.ru/ng_energiya/2023-12-11/9_8899_strategy.html?ysclid=lyh0d9bkgs661795054 [**Nikiforov O.** (2023). Three failures of the global climate strategy. The pace of green transformation of the economy is not sufficient to achieve the Paris Agreement temperature targets. *Nezavisimoye Voyennoye Obozreniye. NG-energy*. Available at: https://nvo.ng.ru/ng_energiya/2023-12-11/9_8899_strategy.html?ysclid=lyh0d9bkgs661795054 (in Russian).]

Николаев Б. (2023). В Дубае намечаются новые ориентиры ООН. Деградация глобализма отражается на отношении стран к окружающей среде // *Независимая*. *НГ-энергия*. 11.12.2023. № 10 (183). С 9–10. Режим доступа: https://www.ng.ru/ng_energiya/2023-12-11/9_8899_un.html [**Nikolaev B.** (2023). Dubai dreams of new UN guidelines. The degradation of globalism affects the attitude of countries towards the environment.

Nezavisimaya Gazeta. NG-energy (online). Available at: https://www.ng.ru/ng_energiya/2023-12-11/9_8899_un.html (in Russian).]

Самуэльсон П. (2004). Принципы максимума в экономическом анализе. В кн.: «Мировая экономическая мысль. Сквозь призму веков». Т. 5. Кн. 1. «Всемирное признание. Лекции нобелевских лауреатов». Г.Г. Фетисов (отв. ред.). С. 87–105. [**Samuelson P.A.** (2004). Maximum principles in analytical economics. In: *World economic ideas. Through the Prism of Ages*. Vol. 5 (1). "Worldwide recognition. Lectures of Nobel laureates". G.G. Fetisov (resp. ed.). Moscow: Mysl', 87–105 (in Russian). Originally published in 1970 by Synthese.]

Сорос Дж. (2004). Кризис мирового капитализма. Открытое общество в опасности. В кн.: «Мировая экономическая мысль. Сквозь призму веков». Т. 4. «Век глобальной трансформации». Ю.Я. Ольсевич (отв. ред.). М.: Мысль. С. 900–919. [**Soros G.** (2004). The crisis of global capitalism: Open society endangered. In: *World economic ideas. Through the Prism of Ages*. Vol. 4. A century of global transformation. Yu.Ya. Olsevich (resp. ed.). Moscow: Mysl', 900–919 (in Russian). Originally published in 1999.]

Тоффлер Э. (2004). Третья волна. В кн.: «Мировая экономическая мысль. Сквозь призму веков». Т. 4. «Век глобальных трансформаций». Ю.Я. Ольсевич (отв. ред.). М.: Мысль. С. 441–452. [**Toffler A.** (2004). The third wave. In: *World economic ideas. Through the Prism of Ages*. Vol. 4. A century of global transformation. Yu.Ya. Olsevich (resp. ed.). Moscow: Mysl', 441–452 (in Russian)]

Фальцман В.К. (1999). О методах измерения экономического роста // *Экономика и математические методы*. Т. 35. Вып. 3. С. 5–15. [**Fal'tsman V.K.** (1999). On methods of measuring economic growth. *Economics and Mathematical Methods*, 35, 3, 5–15 (in Russian)].

Фальцман В.К. (2023). Вопросы балансирования экономического роста с состоянием среды обитания // *Экономика и математические методы*. Т. 59. № 2. С. 143–152. [**Fal'tsman V.K.** (2023). Issues of balancing economic growth and the state of the environment. *Economics and Mathematical Methods*, 59, 2, 143–152 (in Russian)].

Шумпетер Й. (2004). Капитализм, социализм и демократия. В кн.: «Мировая экономическая мысль. Сквозь призму веков». Т. 4. «Век глобальной трансформации». М.: Мысль. С. 50–64. [**Schumpeter J.** (2004). Capitalism, socialism and democracy. In: *World economic ideas. Through the Prism of Ages*. Vol. 4. A century of global transformation. Yu.Ya. Olsevich (resp. ed.). Moscow: Mysl', 50–64 (in Russian)].

Ecological transformation of capitalism

© 2024 V.K. Fal'tsman

V.K. Fal'tsman,
Russian Academy of National Economy and Public Administration (RANEPA), Moscow, Russia; e-mail: m975032@gmail.com

Received 17.01.2024

Abstract. The UN Conference COP 28 (2023) showed the failure of the global strategy contained in the goals of the Paris Climate Agreement. This encourages us to return to the problem of additional measures to protect natural habitats through a transition to moderate rates of economic growth, population growth and anthropogenic pressure on the environment. The article analyzes the ecological limits of growth of the world capitalist system, its economy and the global population. In order to preserve the natural habitat, capitalism inevitably faces transformation into a new post-capitalist formation capable of providing a moderate anthropogenic load on the environment accompanied by an increase in welfare and the preservation of the natural habitat for future generations. In dangerous proximity to the ecological limits of growth, it is necessary to abandon the prevailing goals of maximizing the scale of global economy and population, to reorient the population of the developing countries towards moderate fertility due to an increase in human development and quality-of-life indices, especially in the countries with low levels of above-mentioned indices accompanied by high population growth rates. A three-dimensional system of measuring economic growth is proposed. The conditions for economic growth balanced with the state of the environment are formulated.

Keywords: limits to growth, population, ecological transformation of capitalism, post-capitalism, human development index, quality-of-life index, China's demographic policy.

JEL Classification: O44.

UDC: 330.35.01.

For reference: **Fal'tsman V.K.** (2024). Ecological transformation of capitalism. *Economics and Mathematical Methods*, 60, 3, 20–29. DOI: 10.31857/S0424738824030021 (in Russian).

МИРОВАЯ ЭКОНОМИКА

Модель «векового» цикла накопления финансового капитала

© 2024 г. Ю.Л. Плущевская

Ю.Л. Плущевская,
Центр институционально-эволюционной экономики и прикладных проблем воспроизводства Института экономики РАН, Москва; e-mail: pul@inecon.ru

Поступила в редакцию 04.01.2024

Работа выполнена в рамках Государственного задания по теме «Институциональные основания и воспроизводственные факторы экономической политики России, способствующие переходу к экономике развития».

Автор выражает благодарность за конструктивное обсуждение В.И. Маевскому, С.Г. Кирдиной-Чэндлер, участникам V Октябрьской международной научной конференции по проблемам теоретической экономики на тему «Экономическая теория и эмпирические исследования: эволюция взаимоотношений», а также анонимному рецензенту за ценные замечания, позволившие существенно доработать статью. Все ошибки и неточности принадлежат автору.

Аннотация. Масштабные кризисы, с которыми сталкивается мировая экономика с конца прошлого столетия, вряд ли можно считать случайными. Согласно теории системных циклов накопления Д. Арриги в них проявляется завершающая фаза очередного «долгого века» — эпохи глобального доминирования американского капитала. Данная теория обладает высоким аналитическим и прогнозным потенциалом, но не встречает широкого признания. Этому, в частности, препятствует ее недостаточная формализация. Цель настоящего исследования — представить базовую математическую модель «векового» цикла накопления капитала и верифицировать ее. Особенность предлагаемого подхода заключается в моделировании скорости прироста капитала. Она измеряется процентными ставками или доходностями; их номинальные величины представляют собой темпы возрастания финансового капитала как всеобщей формы капитальной стоимости. Адекватным инструментом моделирования выступает дифференциальное логистическое уравнение. Объектом анализа стали британский и американский системные циклы, предметом — динамика доходностей в Великобритании в XVIII–XIX вв. и в США в XX в. — начале XXI в. Полученные результаты выявили определяющую роль финансового капитала как экономической основы системного цикла и подтвердили гипотезу о том, что его накопление происходит по S-образной траектории. Кроме того, с привлечением статистики торгового баланса уточнено содержание двух фаз цикла — как периодов внутренней и внешней экспансии капитала.

Ключевые слова: системный цикл, накопление капитала, Д. Арриги, мир-системный анализ, модель цикла.

Классификация JEL: B59, E19, E39.

УДК: 330.32.

Для цитирования: **Плущевская Ю.Л.** (2024). Модель «векового» цикла накопления финансового капитала // *Экономика и математические методы*. Т. 60. № 3, с. 30–42. DOI: 10.31857/S0424738824030033

ВВЕДЕНИЕ

Череда серьезных кризисов, сотрясающих глобальную экономику с конца XX в., требует глубокого научного объяснения. Встают вопросы об их характере, факторах, перспективах. Ядро экономической теории рассматривает циклы, включая спады и подъемы, как последствия случайных воздействий (шоков), временно нарушающих течение хозяйственной жизни и ненадолго отклоняющих экономическую динамику от траектории долгосрочного равновесия. За турбулентность и рецессии последних лет ответственность возлагается на просчеты крупных игроков на мировых финансовых рынках, пандемию коронавируса, геополитические трения. Углубление кризиса в 2020-е годы трактуется как результат несчастливого стечения целой совокупности непредвиденных внешних обстоятельств и обозначается как «поликризис»[1]. Предполагается, что с течением времени влияние шоков будет исчерпано, а развитие

[1] Термин был предложен в 1970-е годы историком А. Тузом (https://www.weforum.org/agenda/2023/03/polycrisis-adam-tooze-historian-explains/). См., например, World Economic Forum «The Global Risks Report». 18th ed. (https://www.weforum.org/reports/global-risks-report-2023/digest).

экономики вернется в обычное русло. Однако даже краткосрочные прогнозы, которые строятся в рамках ортодоксальной парадигмы, не сбываются, что свидетельствует о непонимании природы явлений.

Принципиально иную трактовку происходящих процессов предлагают гетеродоксальные направления экономической мысли. Так, марксисты указывают на имманентную цикличность развития капиталистической экономики, в основе которой лежат внутренние антагонистические противоречия. Историческая эволюция капитала сопровождается усилением его глобальной экспансии, постоянной реорганизацией мирового экономического и политического пространства и масштабными системными кризисами (Бузгалин, Колганов, 2015; Harvey, 2001).

Особую остроту приобретают центр-периферийные дисбалансы, на которых делает акцент латиноамериканский структурализм (Бобровников, 2004; Лав, 2015а, 2015б; Missio, Jayme, Oreiro, 2015). Механизмы нелинейности и цикличности как «родовой» черты хозяйственного развития исследуются в школе эволюционной экономики (Нельсон, Уинтер, 2002). Неошумпетерианцы, исследователи волн Кондратьева помещают в фокус анализа длинные волны развития производительных сил и технико-экономические циклы (Акаев, 2022; Перес, 2013; Hirooka, 2006; Matsuyama, 1999). Указанные теории роднит фундаментальное представление о капиталистической экономике как о сложной самоорганизующейся глобальной системе.

Важное место среди течений общественных наук занимает мир-системная парадигма, становление и развитие которой связано прежде всего с трудами Ф. Броделя, И. Валлерстайна, Д. Арриги. В изучении внутренних движущих сил циклической эволюции глобального капитализма в ее конкретно-исторических формах она во многом пересекается с вышеуказанными гетеродоксальными экономическими теориями. Так, кризисные явления последних десятилетий расцениваются ее представителями как проявления очередного закономерного кризиса глобального капиталистического хозяйства (Wallerstein, 2011). Согласно концепции Д. Арриги они отражают конечную стадию «долгого века» накопления капитала в США, уходящем лидере мир-экономики. Одновременно зарождается новый центр, вероятно, в Китае (Арриги, 2006, 2009). Ранее в истории уже наблюдались схожие процессы, когда завершались циклы гегемонии других геоэкономических систем: Д. Арриги выделяет эпохи генуэзского, голландского, британского доминирования[2].

Хотя мир-системная парадигма построена на строгих методологических принципах и скрупулезном изучении обширного исторического материала, она не находит широкого признания. На наш взгляд, этому препятствует недостаточная, по современным меркам, доказательность, помимо общего неприятия гетеродоксальных идей ортодоксальными экономистами. Для нее (как, впрочем, и для ряда направлений экономической мысли) характерен преимущественно вербальный характер построений, а выбор примеров и подкрепляющей статистики определяется вкусами авторов. В этом аспекте примером может служить экономическая ортодоксия, стандарты которой требуют от научных исследований формализации, близкой к естественно-научной. Для преодоления указанного недостатка мир-системной теории необходимы разработка моделей и их верификация на статистических данных.

Самобытность мир-системного анализа порождает запрос на собственный математический аппарат, отличный от оптимизационных моделей ортодоксии. В гетеродоксии, прежде всего в неошумпетерианстве и эволюционной экономике, накоплен арсенал математических методов, отличительной чертой которых является обращение к аппарату естественных наук. Д. Арриги обращается к логистической кривой для графической иллюстрации своих представлений о характере накопления капитала в стране-центре мир-экономики. Логистическое уравнение, сформулированное в 1838 г. П. Ферхюльстом для описания процессов «роста с насыщением» в биологии, нашло широкое применение в физике, химии, экологии, технике (Мирзаджанзаде, Хасанов, Бахтизин, 2004; Трубецков, 2018). В 1934 г. его заново «открыл» Н.Д. Кондратьев, указав на возможное использование в экономической науке для описания величин, «которые в процессе динамики кумулируются, накапливаются...» и к которым он отнес, в частности, «национальный капитал» (Кондратьев, 2002, с. 503). Впоследствии экономисты при помощи кривой Ферхюльста моделировали полувековую динамику макроэкономических переменных, жизненные циклы технологий, диффузию технологических инноваций (Акаев, 2008; Дементьев, 2021; Hirooka, 2006).

[2] Емкое представление теории Д. Арриги в многообразии и единстве пластов его исторического, социального, экономического, политического анализа см. в (Балацкий, 2018).

Д. Арриги оперирует также понятием «хаос», пусть и не в строго математическом смысле. С ним он ассоциирует завершение одного системного цикла и переход к следующему. В развитие его идей, в работе (Galanis, Koutny, Weber, 2022) долгосрочная траектория относительного уровня капитала описывается при помощи логистического отображения, позволяющего эндогенно получать переходы от устойчивого роста к турбулентности и хаосу.

Тем не менее представления Д. Арриги о форме траектории накопления капитала и указанный подход к их формализации носят абстрактный теоретический характер. Оценка адекватности модели требует ее верификации на статистике, которая, на наш взгляд, в случае уравнений для объемов (или уровней) капитала вряд ли возможна. В настоящей статье предложено моделировать скорость прироста капитала, измерителями которой являются показатели доходности. Модельным инструментом стало дифференциальное логистическое уравнение. Верификация модели проведена на данных по двум лидерам мир-экономики — Великобритании (в XVIII–XIX вв.) и США (в XX в. — начале XXI в.). Кроме того, показано, что характерным признаком, позволяющим разделить различные фазы цикла накопления, выступает динамика торгового баланса.

Дальнейшее изложение имеет следующую структуру. В разд. 1 сформулирована задача исследования, обоснован выбор переменной и инструментария моделирования, приведено описание статистических показателей, использованных в расчетах. Разд. 2 содержит анализ результатов построения и верификации модели, а также выводы об особенностях экспансии финансового капитала в цикле накопления. В заключительном разделе обозначены нерешенные проблемы, требующие дальнейших исследований.

1. МЕТОДОЛОГИЯ И ДАННЫЕ

1.1. Модель накопления объема капитала

Согласно Д. Арриги эволюция капиталистической мир-экономики предстает в виде последовательности длительных (более чем столетних) циклов накопления капитала, каждый из которых локализуется в определенном государстве-гегемоне. Ускорение и затухание экономической динамики в отдельном цикле заданы фундаментальными законами, в соответствии с которыми «пределом для капиталистического развития служит сам капитал» (Арриги, 2006, с. 289).

Каждый цикл накопления состоит из двух фаз — материальной и финансовой экспансии. В первой из них «денежный капитал “приводит в движение” растущую массу товаров, включая товаризованную рабочую силу и природные ресурсы» (там же, с. 44). Но «всякий рост торговли и производства содержит тенденцию к снижению нормы прибыли и, следовательно, к подрыву своей главной основы» (там же, с. 290), возрастание капитала тормозится. Происходит переход от фазы материальной экспансии к финансовой, когда «накопление осуществляется посредством финансовых сделок» (там же, с. 44), предлагающих более выгодное размещение капитала. На смену фаз указывает «сигнальный кризис»; финансовая экспансия и в целом системный цикл завершается «терминальным кризисом».

Д. Арриги предполагал, что «материальная экспансия мира-экономики может быть описана при помощи одной или нескольких S-образных траекторий (так называемых логистических кривых)» (там же, с. 293). Переход к финансовой экспансии предстает «главным проявлением и фактором углубления противоречий между самовозрастанием капитала и материальной экспансией мира-экономики. Это противоречие может быть описано как бифуркация в логистической кривой роста торговли» (с. 297). Материальная экспансия рассматривается как эпоха «непрерывных изменений, в течение которых капиталистическая мировая экономика растет в одном направлении» (с. 48), а финансовая — как период «прерывистого развития, в течение которых <...> капиталистическая мировая экономика вследствие радикальной реструктуризации и реорганизации “переходит” на другое направление» (с. 48).

Для наглядности изложения Д. Арриги приводит рисунок S-образной «идеально-типической траектории меркантильных экспансий», переходящей в бифуркацию, знаменующую наступление фазы финансовой экспансии (Арриги, 2006, с. 294). Используя содержащиеся в нем обозначения

и пояснения в тексте, легко восстановить формулу логистического уравнения для M_t — «денежной массы, инвестируемой в торговлю»[3], которую сам автор не дает (с. 297):

$$M_t = KM_0 \, e^{Rxt} / \left\{K + M_0 \left(e^{Rxt} - 1\right)\right\}, \quad (1)$$

где K — предельное значение M_t; Rx — скорость роста; M_0 — начальное значение капитала, инвестированного в производство и торговлю; t — время.

Пока капитал M_t значительно меньше K, его объемы растут почти экспоненциально, затем рост тормозится, наступает «сигнальный» кризис перехода к финансовой экспансии. Полный системный цикл завершается терминальным кризисом. Его проявлениями выступают «хаос» и «системный хаос», которые «относятся к ситуации общего и явно невосполнимого отсутствия организации» (Арриги, 2006, с. 72). Последовательность системных циклов накопления, в которых неразрывно переплетены эволюция капитала и политической гегемонии, можно представить в виде цепочки «гегемония — экспансия — системный хаос — новая гегемония» (Arrighi, Silver, 1999, с. 34).

Д. Арриги тем не менее не ставил перед собой задачи формализовать свои взгляды. Математическая модель эволюции капитала, опирающаяся на теорию системных циклов накопления, предложена в (Galanis, Koutny, Weber, 2022). Она представляет собой логистическое отображение, которое позволяет получить переход от устойчивого к хаотическому поведению моделируемой переменной через последовательность бифуркаций удвоения периода. Как указывают авторы, выбор инструмента моделирования основан, помимо идей Д. Арриги, также и на концепции «пространственно-временно́го закрепления» Д. Харви. Согласно последней возрастание капитала происходит неравномерно: наталкиваясь на очередные границы экспансии, мировой гегемон преодолевает их за счет переформатирования геоэкономического пространства (размещения производств, транспортных и логистических цепочек) и временных рамок накопления капитала (при помощи финансовых инструментов). Новые пространственно-временные структуры преходящи и требуют периодических обновлений. Нетрудно заметить, что во взглядах Д. Арриги и Д. Харви много общего; ученые были знакомы с трудами друг друга, а также лично (Arrighi, Harvey, 2009; Arrighi, 2004).

Модель (Galanis, Koutny, Weber, 2022) описывает траекторию относительного уровня накопления капитала $x_t = M_t / K$ $(0 < x_t < 1)$:

$$x_{t+1} = r x_t \left(1 - x_t\right). \quad (2)$$

Авторы выдвигают гипотезу, что управляющий параметр r $((0 < x \le 4)$ увеличивается по мере роста относительного накопления. Она основана на положениях Д. Арриги и Д. Харви о том, что в ходе экспансии капиталу все труднее преодолевать растущие «географические и организационные барьеры » (Galanis, Koutny, Weber, 2022, с. 9). Теоретические симуляции показывают, что при небольших величинах управляющего параметра ($r < 2$) накопление капитала идет устойчиво по S-образной кривой. При $r = 3{,}3$ наступает фаза «системной турбулентности», а при $r = 4$ — «хаос».

1.2. Модель скорости возрастания капитала

Вышеописанная модель представляет собой важный шаг в направлении формализации теории системных циклов накопления. Однако для того чтобы сделать вывод об ее адекватности, необходима проверка расчетных траекторий на соответствие статистике. А она, на наш взгляд, вряд ли возможна. Во-первых, модель сформулирована для абстрактной категории «капитал». В целом, выбор статистических показателей, которые могут корректно представлять теоретические абстракции, является нетривиальной научно-практической задачей. А сущность «капитала» особенно сложна; его моделирование требует четкой конкретизации исходя из целей исследования. Во-вторых, статистические показатели, которые могли бы стать кандидатами в модельные переменные, не слишком надежны. Так, экономические субъекты прилагают целенаправленные усилия для сокрытия размеров прибыли — «превращенной формы» приращения капитальной стоимости. Учет осложнен глобальным масштабом потоков стоимости. Большие искажения вносятся неэквивалентным обменом в отношениях между глобальными «Севером» и «Югом», курсовыми перекосами, сетевой организацией неоколониальных центр-периферийных отношений, внутрифирменным ценообразованием в транснациональных корпорациях (Бузгалин, Колганов, 2015; Смит, 2022).

С учетом изложенного и ввиду того что при разработке модели следует изначально предусмотреть возможность верификации, мы обратились к скорости прироста капитала. Ее измерителями

[3] Д. Арриги зачастую опускает слово «производство», подразумевая, что торговля идет произведенными товарами.

являются процентные ставки и доходности различных способов размещения средств[4]. В качестве объекта моделирования выступили номинальные доходности. Они характеризуют прирост капитала в его денежной форме, которая обладает универсальным содержанием. Именно такой формой начинается и завершается кругооборот как «промышленного» капитала (в широком понимании, которого придерживался К. Маркс, т.е. капитала, задействованного в производстве товаров и услуг), так и фиктивного (извлекающего прибыль из операций с разнообразными титулами собственности, производными ценными бумагами и другими финансовыми инструментами). В экономике современного империализма это — «финансовый капитал, опирающийся на взаимопроникновение промышленных и банковских монополистических группировок, <который> использует формы фиктивного капитала и финансовый рынок как инструменты своего господства» (Колганов, 2019, с. 73). В силу того что финансовый капитал является всеобщим представлением капитала, правомерно выдвинуть гипотезу о том, что именно его возрастание составляет основу «векового» цикла накопления и что его эволюция в цикле принимает форму кривой «роста с затуханием».

Важным свойством показателей доходностей, вытекающим из всеобщности формы финансового капитала и обеспечивающим корректность их применения в анализе транснационального движения капитала, выступает привязка к инструментам размещения средств, а не к странам. Другая черта — номинальные ставки наблюдаются непосредственно, чем исключается необходимость дополнительных пересчетов и связанный с этим субъективизм; их также можно считать достоверными ввиду отсутствия у экономических агентов мотивов к искажениям соответствующей информации.

Безусловно, характеристики определенных инструментов вложений (такие как ликвидность, срочность, системные и индивидуальные риски и др.) влияют на доходности. Особенно широк диапазон их уровней в эпоху финансиализации, для которой характерны взрывное увеличение объема операций на финансовых рынках и их отрыв от потребностей той части экономики, в которой создается стоимость. Различия в объемах и динамике могут быть настолько существенны, что исследователи пишут даже о трансформации фиктивного капитала в качественно иную форму — «виртуальный капитал» (Колганов, 2019). Тем не менее пузыри на рынках, где господствует такой капитал, лопаются, напоминая, что основой возрастания капитала является производство стоимости в форме товаров и услуг. Хотя волатильность процентных ставок в последние полвека резко возросла, с точки зрения анализа длительной динамики остается справедливым утверждение, что показатели ставок процента и доходностей в различных сегментах экономики в целом изменяются сонаправленно (рис. 1). Подобную общность обеспечивает механизм перелива капитала,

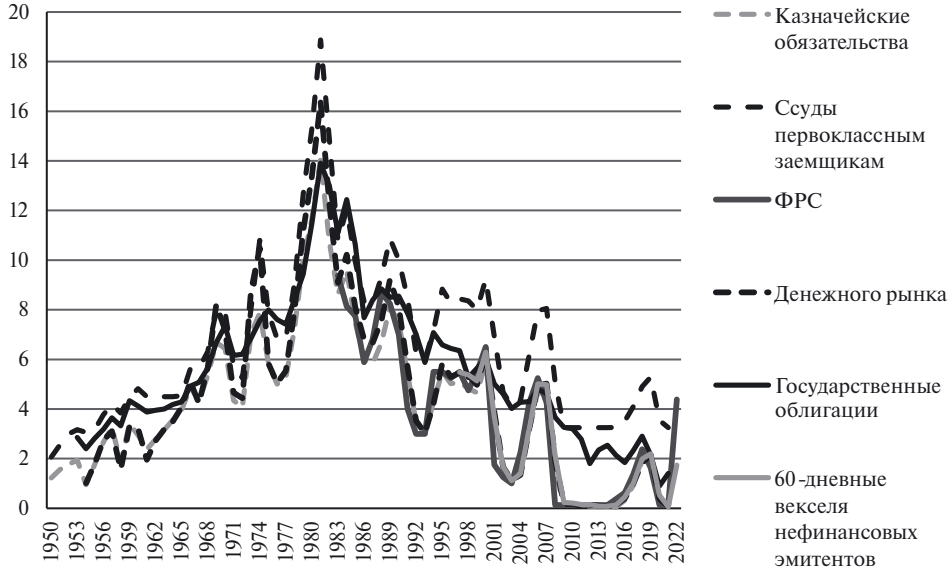

Рис. 1. Номинальные ставки процента по инструментам в долл. США, % годовых

Источники: Federal Reserve Economic Data, International Financial Statistics.

[4] Далее для компактности изложения будем употреблять категории «ставка процента» и «доходность» как синонимы: обе категории отражают отношение дохода к вложенному капиталу.

опирающийся на универсальность денежной формы. В силу того что целью исследования является моделирование динамики капитала, а не различий в уровнях прибыльности отдельных направлений его вложений, мы остановимся здесь на одном из показателей доходности.

Если верна гипотеза о том, что накопление объема финансового капитала, который мы обозначим как M_t^F, номинальная доходность $s_t = \left(dM_t^F / dt\right) / M_t^F$ описывается дифференциальным логистическим уравнением. Следовательно, если дифференциальное логистическое уравнение даст удовлетворительное описание траектории фактических номинальных доходностей, то мы получим основание не отвергнуть гипотезу об S-образном возрастании финансового капитала. Кроме того, сопоставление траекторий доходностей с периодизацией системных циклов накопления позволит проверить предположение об их соответствии.

Воспользуемся версией дифференциального логистического уравнения, предложенной С.П. Капицей для описания динамики численности населения нашей планеты и нашедшей применение для моделирования эволюции других природных макросистем. Его отличие от «классического» представления заключается в добавлении «особого времени» τ, которое позволяет избежать проблемы взрывного роста в «особой точке» дифференциального логистического уравнения (когда знаменатель обращается в ноль). В указанной формулировке уравнение динамики номинальной доходности s_t имеет вид

$$s_t = s_{max}\tau^2 / \left[\left(T_{max} - t\right)^2 + \tau^2\right], \quad (3)$$

где s_{max} — максимальное значение номинальной процентной ставки в точке T_{max}; t — время; τ — особое время (добавка С.П. Капицы).

Верификация теоретической модели проводилась на данных о доходностях в экономиках Великобритании в XVIII в. по начало XX в. и США в XX в. — начале XXI в. (так Д. Арриги датирует соответственно британский и американский системные циклы). Выбор этих стран обусловлен двумя обстоятельствами. Первое, содержательное: макроэкономическая динамика в центрах мирэкономики формируется преимущественно собственными движущими силами и мало подвержена экзогенным влияниям. Можно ожидать, что в них закономерности развития будут проявляться наиболее отчетливо[5]. Второе, техническое, — высокое качество и доступность длинных статистических рядов.

Показателями, с которыми сопоставляются теоретические кривые, определены доходности государственных обязательств. Основной аргумент — ретроспективная длина временных рядов. Другим достоинством данных индикаторов является низкая волатильность, обусловленная высокой надежностью. В расчетах использованы данные о доходности британской консоли (Английского консолидированного аннуитета), основного инструмента финансирования государственного долга Британии в XVIII–XIX вв. и государственных облигаций США в XX в. — начале XXI в.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

2.1. Номинальная доходность как характеристика «векового» цикла накопления финансового капитала

На рис. 2 и 3 представлены фактические и теоретические траектории доходностей государственных ценных бумаг в Великобритании и США в периоды, относящиеся к британскому и американскому системным циклам накопления соответственно. На рис. 2 и 3 видно, что «вековой» тренд наблюдаемых доходностей имеет колоколообразную форму, типичную для приращений переменных, уровни которых

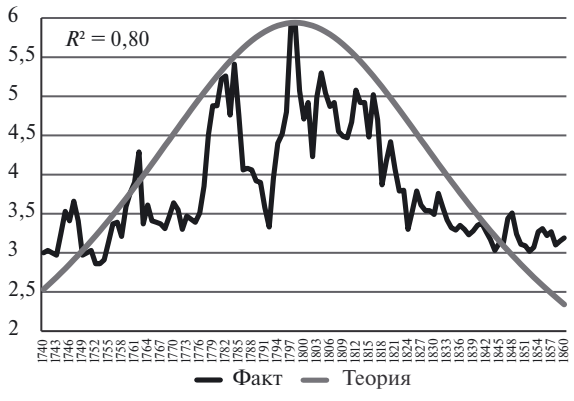

Рис. 2. Фактическая и теоретическая траектории номинальной процентной ставки по долговым обязательствам правительства Великобритании (консолям) в 1740–1860 гг., % годовых

Источники: Homer, Sylla, 2005, расчеты автора.

[5] А.В. Бобровников на примере латиноамериканских стран показывает, что циклы в периферийных экономиках индуцировались странами-гегемонами (Бобровников, 2004).

описываются логистическим уравнением. Оговоримся, что здесь мы не исследуем характеристики и причины кратковременных колебаний. Во-первых, цель исследования заключается в моделировании тренда. Во-вторых, блестящий анализ исторических контекстов представлен в ряде трудов, включая цитируемые в настоящей статье. Важно подчеркнуть, что в них конкретные события рассматриваются как объективные проявления внутренних противоречий развития капиталистических геоэкономических систем, а не как эффекты внезапных экзогенных шоков.

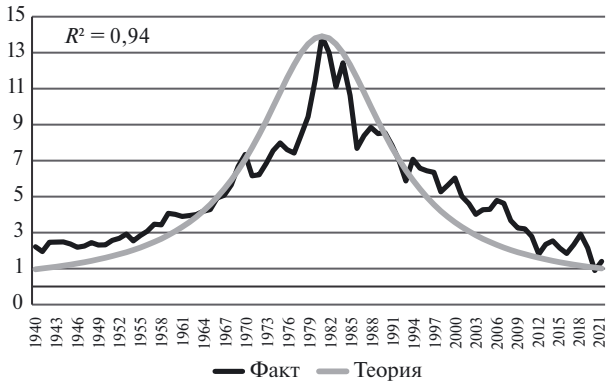

Рис. 3. Фактическая и теоретическая траектории номинальной процентной ставки по долговым обязательствам правительства США в 1940–2020 гг., % годовых

Источники: International Financial Statistics, расчеты автора.

Построение теоретической кривой требует значений максимума доходности s_{max}. Оно было напрямую взято из статистики, вместе с точкой T_{max}. Значение параметра τ, задающее крутизну восходящей и нисходящей дуг «колокола», определялось эмпирически исходя из критерия наилучшей аппроксимации. Максимум коэффициента выборочной парной корреляции ($R2$) между расчетной и фактическими кривыми доходности в случае Великобритании составил 0,80, США — 0,94. Таким образом, теоретические кривые удовлетворительно аппроксимируют наблюдаемую динамику процентных ставок. Это позволяет заключить, что интегральный показатель — объем финансового капитала — действительно возрастает по S-образной траектории.

Имея в распоряжении показатели годовой доходности и переведя их в формат индексов, можно, перемножив цепные показатели, оценить накопленное значение уровня финансового капитала по отношению к некоторому выбранному году (начальной точке «столетнего» цикла), которое напрямую статистикой не наблюдается. Соответствующие оценки для британского и американского циклов представлены на рис. 4 и 5. Они свидетельствуют о явном затухании накопления капитала в долларовых финансовых инструментах в начале XXI в. В британском цикле в конце XIX в. аналогичное замедление накопления капитала было гораздо менее выраженным, чему, видимо, способствовала эффективная эксплуатация Великобританией своих обширных колоний, продолжавшаяся до середины XX в. Тем не менее оба цикла завершаются снижением к околонулевым значениям номинальных доходностей по инструментам в валютах стран-гегемонов, что не оставляет сомнений в затухании роста их финансового капитала.

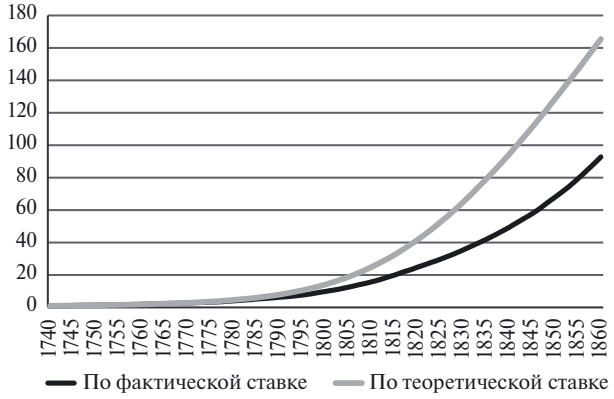

Рис. 4. Расчетные траектории накопления финансового капитала в британском цикле, в разах к 1739 г.

Источники: Homer, Sylla, 2005; расчеты автора.

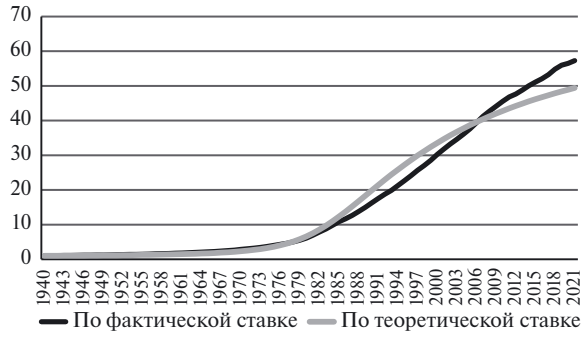

Рис. 5. Расчетные траектории накопления финансового капитала в американском цикле, в разах к 1939 г.

Источники: International Financial Statistics; расчеты автора.

Следующий важный вопрос заключается в том, в какой мере временные ряды процентных ставок соотносятся с датировками «долгих веков» британского и американского системных циклов. Д. Арриги помещает первый из них в диапазон второй половины XVIII в. — начала XX в., возникновение второго отнесено им к концу XIX в. Как показывают рис. 2–3, колоколообразная траектория «жизненного цикла» доходности капитала в Великобритании заключена в интервале с 1740-х годов по 1860-е годы, в США — с 1940-х годов по 2020-е годы. Таким образом, волны процентных ставок входят составной частью в системные циклы Д. Арриги, — а они являются более продолжительными. При этом британский и американский циклы перекрывают друг друга, тогда как волны процентных ставок в Великобритании и в США не пересекаются.

Указанные различия в периодизациях, на наш взгляд, вызваны следующим. Во-первых, системные циклы накопления — явление не только экономическое, но и социально-политическое, а любые экспертные датировки, касающиеся сложных общественных процессов, имеют условный характер. Д. Арриги выделял свои «долгие века» на основе комплексного анализа развития государств-центров накопления капитала и сам указывает на периодизацию как на «предварительную и приблизительную» (Арриги, 2006, с. 45).

Во-вторых, наложение завершения одного системного цикла и зарождения следующего недвусмысленно указывает на то, что этот период следует расценивать как переходный. Он является длительным, захватывая несколько десятилетий; ему присущ «системный хаос» — в терминологии Д. Арриги. Данные о доходностях не позволяют его моделировать; видимо, для этого требуется разработка специальной модели, что выходит за рамки настоящего исследования.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что траектории номинальных доходностей характеризуют «сердцевину» системных циклов накопления, не покрывая переходных периодов от доминирования одного глобального гегемона к другому. Они отражают экономическое содержание системных циклов, которое заключается в накоплении финансового капитала в действующем центре мир-экономики. В этом контексте затухание «вековой» волны доходности инструментов в долларах США является статистическим доказательством достижения американским финансовым капиталом предела роста и завершения его глобального экономического доминирования. Мировое хозяйство вступило в конце XX в. в эпоху образования нового центра накопления капитала.

Далее колоколообразная форма траекторий номинальных процентных ставок с их отчетливыми повышательной и понижательной дугами подтверждает гипотезу Д. Арриги о том, что системный цикл накопления состоит из двух качественно различных «эпох». Проверим на статистике его предположения об их содержании как о фазах материальной и финансовой экспансии.

2.2. Содержание двух фаз «векового» цикла

Фаза материальной экспансии в британском цикле, относящаяся ко второй половине XVIII в., проходила под флагом первой промышленной революции, и Великобритания была «знаменосцем». Институционально развитие страны поддерживалось жесткой протекционистской политикой; под запретом находилась даже эмиграция квалифицированных рабочих. Как указывает глубокий исследователь британской геоэкономической системы В.В. Соколов, практически до середины XIX в. страна, «опережая по конкурентоспособности другие страны, оставалась одним из наиболее протекционистских государств Европы» (Соколов, 2012, с. 53). Во многом благодаря этой политике экономика с «высокоразвитой промышленностью, работавшей на собственной сырьевой базе, <...> превратилась <также и ...> в глобальный центр переработки сырья, поступавшего из <...> разных частей света» (с. 54). В условиях бурного расширения внутреннего предложения объемы экспорта, как правило, превышали импорт, даже без учета реэкспорта (страна присвоила себе роль посредника в торговле многими товарами между Европой, с одной стороны, и Азией и Америкой — с другой).

Великобритания приступила к либерализации торгового законодательства в 1830–1840-е годы, когда ее глобальное экономическое лидерство стало бесспорным: «переход к свободной торговле произошел <...> в условиях уже достигнутой высокой конкурентоспособности» (с. 53). Одновременно фунт стерлингов становится мировыми деньгами, а их эмитент — крупнейшим глобальным заемщиком. Как указывает П.Х. Линдерт, «страна ключевой валюты действует как обыкновенный банк, который имеет всегда больше денежных обязательств, чем резервных активов» (цит. по (Соколов, 2012, с. 113)). Великобритания «заняла в мировой экономике место, которому не только не угрожало превышение импорта над экспортом, но которое прямо предполагало такое

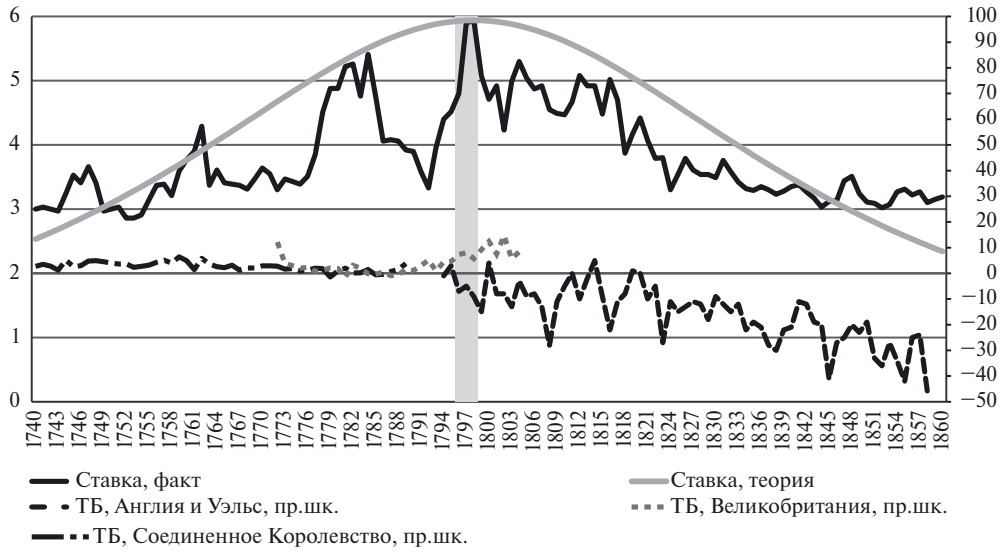

Рис. 6. Траектории процентной ставки (%) и сальдо торгового баланса (ТБ; млн ф. ст.) в британском цикле накопления капитала

Примечание. UK — в соответствующих исторических границах Соединенного Королевства Великобритании и Северной Ирландии; GB — в соответствующих исторических границах Великобритании. Вертикальным столбцом отмечен пик волны.

Источники: Homer, Sylla, 2005; Mitchell, 1988, 1992; расчеты автора.

превышение. Хронический торговый дефицит был закономерен в условиях, когда фунт стерлингов стал основной валютой международных расчетов <...> В отличие от эпохи металлического обращения <... он> свидетельствует уже не об оттоке богатства из страны, а наоборот — о наличии условий для его воспроизводства» (Соколов, 2012, с. 112). Объем чистого импорта показывает тенденцию устойчивого роста (рис. 6).

В США расцвет эпохи материальной экспансии капитала, согласно Д. Арриги, пришелся на 1950–1960-е годы. Опережающими темпами в сравнении с другими странами растут производительность труда и конкурентоспособность экономики, что сопровождается «концентрацией и централизацией производственных мощностей и платежеспособного спроса» (Арриги, 2006, с. 349, 352, 378). Как и ранее в Великобритании, эту фазу американского цикла накопления характеризует «изоляционистская политика» (Арриги, 2006, с. 352). И, как и в британском «долгом веке», в этот период экспорт превышает импорт.

Переход сальдо торгового баланса в отрицательную область намечается с 1970-х годов (рис. 7). Д. Арриги датирует начало эпохи финансовой экспансии в американском системном цикле поздними 1960-ми годами. К этому времени Бреттон-Вудскими соглашениями доллар США уже признан резервной валютой, а во второй половине 1970-х годов Ямайская валютная система отменила его привязку к золоту. Главным источником дальнейшего развития американской экономики, как и британской в середине XIX в., становится глобальная экспансия капитала, осуществляемая на основе института мировых кредитных денег. Ее отражением становится нарастание чистого импорта (в отношении к ВВП)[6].

Таким образом, анализ торговых операций в увязке с циклом накопления финансового капитала позволяет сформулировать следующую гипотезу. Главное содержание первой фазы «столетней» волны в центре мир-экономики составляет развитие национального капитала, происходящее на основе масштабного внедрения достижений научно-технического прогресса в производство. Значимую поддержку ему оказывает протекционистская политика государства. Для этого периода

[6] В случае с Великобританией ограничения в части статистики не позволили рассчитать отношение сальдо торгового баланса к ВВП.

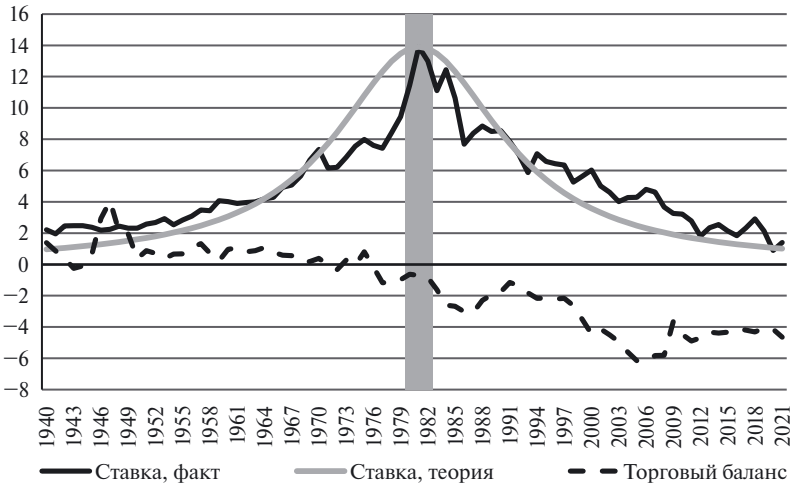

Рис. 7. Траектории процентной ставки (%) и сальдо торгового баланса (ТБ; % к ВВП) в американском цикле накопления капитала

Примечание. На рисунке столбцом выделен пик волны.

Источники: Homer, Sylla, 2005; International Financial Statistics; расчеты автора.

характерно превышение экспорта товаров и услуг над импортом, вызванное ускоренным ростом внутреннего предложения относительно спроса и поддерживаемое ограничениями ввоза.

По достижении мирового лидерства страна начинает переходить к глобальной экспансии и политике фритредерства. Возможности для вывоза капитала создаются способностью национальной валюты функционировать в качестве мировых кредитных денег (или, в XX в., «резервных»), которая базируется на экономической мощи, достигнутой в первой фазе цикла. Активная роль в формировании платежного баланса переходит к финансовым операциям; торговое сальдо становится зависимым от того, как складывается финансовый счет, а не наоборот. Импорт, обеспечиваемый мировыми кредитными деньгами, устойчиво и значительно превышает объемы экспорта.

С точки зрения экономических акторов в стране-гегемоне, трансграничное движение капитала предстает теперь преимущественно в форме финансовых потоков, тогда как дымящиеся трубы, ассоциирующиеся с развитием промышленного капитала, исчезают из окружающего пейзажа по мере вывода производств в периферийные экономики. Возникает иллюзия, что «деньги делают деньги». Видимо, именно это восприятие и фиксирует Д. Арриги, говоря об эпохе финансовой экспансии. На деле же, «с точки зрения марксистского подхода, прибыль по-прежнему создается только в производстве товаров и услуг, но присваивается теперь главным образом через манипулирования финансовыми инструментами» (Колганов, 2019, с. 73–74). Одновременно возникают новые институциональные формы неоколониальных взаимоотношений, включая сетевые, позволяющие метрополии повышать норму прибавочной стоимости.

С учетом полученных результатов представляется возможным уточнить содержание двух больших фаз «векового» цикла накопления капитала в стране-центре мир-экономики. Первую из них следует охарактеризовать как внутрисистемный рост капитала; содержание второй фазы составляет его глобальная экспансия при помощи механизма мировых кредитных денег.

При рассмотрении двух фаз «столетнего» цикла естественно возникает вопрос об их связи с полувековыми волнами Кондратьева (К-волнами). Изучение датировок К-волн, сделанных различными авторами и сведенными воедино в (Акаев, 2013), показало, что если две волны Кондратьева могут быть достаточно точно наложены на американский системный цикл, то в британском цикле такого совмещения не наблюдается: пара К-волн примерно на 40 лет запаздывает (или же не выявлен «полувековой» цикл, предшествующий первой К-волне)[7]. Данное обстоятельство нуждает-

[7] Нижняя, или исходная, поворотная точка первой К-волны датируется 1780–1790-ми годами, вторая — 1845–1850-ми годами. На 1930–1940-е годы приходится старт четвертой волны, а старт последующей — на 1980-е годы.

ся в специальном изучении. В целом установление связей между «долгими веками» накопления капитала и циклами другой продолжительности является важной задачей, требующей проведения углубленных исследований.

ВЫВОДЫ

Итак, основные результаты проведенного нами исследования заключаются в следующем. Во-первых, с привлечением статистики по Великобритании и США выявлено, что важной характеристикой «долгого века» (по Д. Арриги) накопления капитала в стране-центре мир-экономики являются доходности по инструментам, номинированным в валюте этой страны. Они измеряют скорость возрастания финансового капитала как всеобщей формы капитальной стоимости. Их траектория хорошо аппроксимирует дифференциальные логистические уравнения, что соответствует теоретическим представлениям об S-образной траектории возрастания интегральной величины — капитала, не наблюдаемого статистикой. В этом контексте динамика доходностей по долларовым инструментам свидетельствует о завершении в конце XX в. — начале XXI в. экономической гегемонии США.

Во-вторых, показано, что сальдо торгового баланса в стране-гегемоне является количественным показателем, выражающим качественные различия между двумя фазами накопления финансового капитала. В первой из них превышение экспорта над импортом складывается как результат возрастания капитала в национальной экономике, которую поддерживает протекционистская политика правительства. Для второй характерно отрицательное торговое сальдо, являющееся следствием глобальной экспансии капитала. Она становится возможной благодаря статусу мировых денег, который обретает национальная валюта страны-гегемона.

В целом сделанные в направлении формализации теории Д. Арриги шаги позволили подтвердить ее основные положения и уточнить содержание основных фаз накопления финансового капитала. Одновременно исследование высветило ряд вопросов, требующих дальнейших исследований. Так, динамика доходностей отражает накопление финансового капитала как экономической основы системных циклов накопления Д. Арриги, но не дает представления о переходных процессах в периоды смены гегемонов. Кроме того, необходимо установить связи между «вековыми» циклами и экономическими колебаниями другой продолжительности; исследовать вопрос о тенденции сокращения длительности системы циклов. Для этого, в свою очередь, потребуется выявить их главные воспроизводственные и институциональные характеристики, а также определить адекватный аппарат моделирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

Акаев А.А. (2008). Анализ решений общего уравнения макроэкономической динамики // *Экономика и математические методы*. Т. 44. № 3. С. 62–78. [**Akaev A.A.** (2008). Analysis of solutions of general equations of microeconomic dynamics. *Economics and Mathematical Methods,* 44, 3, 62–78 (in Russian).]

Акаев А.А. (2013). Большие циклы конъюнктуры и инновационно-циклическая теория экономического развития Шумпетера–Кондратьева // *Экономическая наука современной России*. № 2 (61). С. 7–29. [**Akaev A.A.** (2013). Long waves and Schumpeter-Kondratiev's innovation-cycles theory of economic development. *Economics of Contemporary Russia*, 2 (61), 7–29 (in Russian).]

Акаев А.А. (2022). Эпохальные открытия Николая Кондратьева и их место в современной экономической науке // *AlterEconomics*. Т. 19. № 1. С. 11–39. DOI: 10.31063/AlterEconomics/2022.19-1.2 [**Akaev A.A.** (2022). Nikolai Kondratiev's epoch-making discoveries and their impact on contemporary economic science. *AlterEconomics*, 19 (1), 11–39. DOI: 10.31063/AlterEconomics/2022.19-1.2 (in Russian).]

Арриги Д. (2006). *Долгий двадцатый век. Деньги, власть и истоки нашего времени*. М.: Территория будущего. [**Arrighi G.** (2006). *The long twentieth century. Money, power, and the origins of our times*. Moscow: Territoriya Buduschego (in Russian).]

Арриги Д. (2009). *Адам Смит в Пекине: что получил в наследство XXI век*. М.: Институт общественного проектирования. [**Arrighi G.** (2009). *Adam Smith in Beijing: Lineages of the twenty-first century.* Moscow: Institut obshhestvennogo projektirovanija (in Russian).]

Балацкий Е.В. (2018). Концепция циклов накопления капитала Дж. Арриги и ее приложения // *Terra Economicus*. Т. 16. № 1. С. 37–55. DOI: 10.23683/2073-6606-2018-16-1-37-55 [**Balatsky E.V.** (2018). The

Arrighi's concept of capital accumulation cycles and its applications. *Terra Economicus,* 16, 1, 37–55. DOI: 10.23683/2073-6606-2018-16-1-37-55 (in Russian).]

Бобровников А.В. (2004). *Макроциклы в экономике стран Латинской Америки.* М.: Ин-т Латинской Америки. 500 с. [**Bobrovnikov A.V.** (2004). *Los macrociclos en la economia de los-paises latinoamericanos.* Moscow: Instituto de Latinoamerica. 500 p. (in Russian).]

Бузгалин А., Колганов А. (2015). *Глобальный капитал.* В 2-х т. М.: ЛЕНАНД. [**Buzgalin A., Kolganov A.** (2015). *Global capital*. In 2 vols. Moscow: LENAND (in Russian).]

Дементьев В.Е. (2021). Модель интерференции длинных волн экономического развития // *Компьютерные исследования и моделирование*. Т. 13. № 3. С. 649–663. DOI: 10.20537/2076-7633-2021-13-3-649-663 [**Dementiev V.E.** (2021). The model of interference of long waves of economic development. *Computer Research and Modeling*, 13 (3), 649–663. DOI: 10.20537/2076-7633-2021-13-3-649-663 (in Russian).]

Колганов А.И. (2019). Эволюция денег как момент эволюции финансового капитала // *Вопросы экономики*. № 8. С. 67–84. DOI: 10.32609/0042-8736-2019-8-67-84 [**Kolganov A.I.** (2019). The evolution of money as a point of the evolution of financial capital. *Voprosy Ekonomiki*, 8, 67–84. DOI: 10.32609/0042-8736-2019-8-67-84 (in Russian).]

Кондратьев Н.Д. (2002). Модель экономической динамики капиталистического хозяйства. В сб.: «*Кондратьев Н.Д. Большие циклы конъюнктуры и теория предвидения. Избранные труды*». М.: Экономика. С. 503–506. [**Kondrat'ev N.D.** (2002). Model of capitalist economy dynamics. In: *Kondrat'ev N.D. Major cycles of the conjuncture and theory of forecasting: Selected works.* Moscow: Ekonomika, 503–506 (in Russian).]

Лав Дж.Л. (2015а). Рауль Пребиш и латиноамериканский структурализм. Предисловие к русскому изданию. В сб.: «*Истоки. Качественные сдвиги в экономической реальности и экономической науке*». В.С. Автономов (ред.). М.: ВШЭ. С. 228–230. [**Love J.L.** (2015a). Raúl Prebisch and Latin-American structuralism: Foreword to the Russian translation. In: *Origins. Qualitative changes in economic reality and economic science.* V.S. Avtonomov (ed.). Moscow: HSE, 228–230 (in Russian).]

Лав Дж.Л. (2015б). Подъем и упадок экономического структурализма в Латинской Америке: новые аспекты. В сб.: «*Истоки. Качественные сдвиги в экономической реальности и экономической науке*». В.С. Автономов (ред.). М.: ВШЭ. С. 252–271. [**Love J.L.** (2015b). The rise and decline of economic structuralism: New dimensions. In: *Origins. Qualitative changes in economic reality and economic science.* V.S. Avtonomov (ed.). Moscow: HSE, 252–271 (in Russian).]

Мирзаджанзаде А.Х., Хасанов М.М., Бахтизин Р.Н. (2004). *Моделирование процессов нефтегазодобычи: нелинейность, неравновесность, неопределенность*. Москва, Ижевск: Институт компьютерных исследований. [**Mirzadzhanzade A. Kh., Khasanov M.M., Bakhtizin R.N.** (2004). *Modelling oil and gas production: Nonlinearity, disequilibrium, uncertainty*. Moscow, Izhevsk: Institute of Computer Science (in Russian).]

Нельсон Р.Р., Уинтер С. Дж. (2002). *Эволюционная теория экономических изменений.* М.: Дело. [**Nelson R.R., Winter S.G.** (2002). *An evolutionary theory of economic change*. Moscow: Delo (in Russian).]

Перес К. (2013). *Технологические революции и финансовый капитал: динамика пузырей и периодов процветания*. М.: Дело. [**Perez C.** (2013). *Technological revolutions and financial capital: The dynamics of bubbles and golden ages.* Moscow: Delo (in Russian).]

Смит Д. (2022). *Империализм в XXI веке: Глобализация производства, сверхэксплуатация и финальный кризис капитализма.* М.: Горизонталь. [**Smith J.** (2022*). Imperialism in the twenty-first century: The globalization of production, super-exploitation, and the crisis of capitalism*. Moscow: Horizontal Publishers (in Russian).]

Соколов В. (2012). *Британская империя как геоэкономическая система*. М.: Экономика. [**Sokolov V.** (2012). *The British Empire as a geo-economic system*. Moscow: Ekonomika (in Russian).]

Трубецков Д.И. (2018). *Введение в синергетику: хаос и структуры*. М.: Либроком. [**Trubetskov D.I.** (2018). *Introduction to synergetics: Chaos and structures*. Moscow: Librokom (in Russian).]

Arrighi G. (2004). Spatial and other "fixes" of historical capitalism. *Journal of World-Systems Research*, X, 2, 527–539. Available at: http://jwsr.ucr.edu

Arrighi G., Harvey D. (2009). The winding paths of capital. *New Left Review*, 56, 4, 61–94. Available at: https://newleftreview.org/issues/ii56/articles/giovanni-arrighi-the-winding-paths-of-capital

Arrighi G., Silver B.J. (1999). *Chaos and governance in the modern world system*. Minneapolis: University of Minnesota Press.

Galanis G., Koutny C., Weber I. (2022). *Systemic cycles of accumulation and chaos in the world capitalist system: A missing link*. University of Massachusetts Amherst. Economics Department Working Paper Series, 321. DOI: 10.7275/h4hg-e505

Harvey D. (2001). Globalization and the "Spatial Fix. *Geographische Revue*, 2, 23–30.

Hirooka M. (2006). Complexity in discrete innovation systems. *Emergence: Complexity and Organization (Electronic Journal)*. DOI: 10.emerg/10.17357.d8cf2da38bebf8d00ec24a23ebdb3758

Homer S., Sylla R. (2005). *A History of Interest Rates*. New Jersey: Wiley.

Matsuyama K. (1999). Growing through cycles. *Econometrica*, 67, 2, 335–347.

Missio F., Jayme F.G., Oreiro J.L. (2015). The structuralist tradition in economics: Methodological and macroeconomics aspects. *Brazilian Journal of Political Economy*, 2 (139), 247–266. DOI: 10.1590/0101-31572015v35n02a03

Mitchell B.R. (1988). *British historical statistics*. Cambridge University Press.

Mitchell B.R. (1992). *International historical statistics: Europe 1750–1988.* New York: Stockton Press.

Wallerstein I. (2011). Structural crisis in the world-system. Where do we go from here. *Monthly Review*, March 01. Available at: https://monthlyreview.org/2011/03/01/structural-crisis-in-the-world-system/

Model of "secular" cycle of financial capital accumulation

© 2024 Y.L. Plushchevskaya

Y.L. Plushchevskaya,
Institute of Economics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia; e-mail: pul@inecon.ru

Received 04.01.2024

The research is performed under the State Assignment Topic "*Institutional foundations and reproduction factors of Russia's economic policy for the transition to the economy of development"*.

The author expresses her gratitude to V.I. Maevsky, S.G. Kirdina-Chandler, participants of the 5th October International Theoretical Conference «Economic theory and empirics: evolving relations» for fruitful discussions, and to an anonymous reviewer for valuable comments and suggestions. All errors are those of the author.

Abstract. Crises hitting the world economy since the end of the previous century need a deeper explanation than effects of numerous sudden shocks. According to G. Arrighi's theory, they manifest the final phase of North-American cycle of capital accumulation. Although analytically promising, the theory doesn't meet broad recognition. A reason could be its weak formalization. This article addresses this problem by developing a mathematical model of capital growth rates. They are measured by nominal yield and interest rates which represent increments of capital in its general, financial form. If capital level follows a logistic path then its growth rate should be described by logistic differential equation. The model is brought to data on government bonds yields in Great Britain in XVIII–XIX centuries and USA — in XX century up to now. The study provides evidence for the pivotal role of financial-capital accumulation in systemic cycles and its S-shaped form. Besides, it reveals importance of trade balance in specifying cycle phases of domestic and global capital expansion.

Keywords: systemic cycle, capital accumulation, G. Arrighi, world-systems analysis, model of cycle.

JEL Classification: B59, E19, E39.

UDC: 330.32.

For reference: **Plushchevskaya Y.L.** (2024). Model of "secular" cycle of financial capital accumulation. *Economics and Mathematical Methods*, 60, 3, 20–29. DOI: 10.31857/S0424738824030033 (in Russian).

ЭКОНОМИКА И МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ, 2024, том 60, № 3, с. 43–53

НАРОДНОХОЗЯЙСТВЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ

Динамический межотраслевой баланс как инструмент анализа структурной политики

© 2024 г. Е.Л. Торопцев, М.М. Кандохова, Н.Г. Гудиева

Е.Л. Торопцев
Северо-Кавказский федеральный университет, Ставрополь; e-mail: eltoroptsev@yandex.ru

М.М. Кандохова,
Кабардино-Балкарский государственный университет, Нальчик; e-mail: mrkand@mail.ru

Н.Г. Гудиева,
Северо-Кавказский центр математических исследований, Ставрополь; e-mail: gudieva82@bk.ru

Поступила в редакцию 29.11.2023

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (№ 24-28-00056) (https://rscf.ru/project/24-28-00056/).

Аннотация. Настоящая работа расширяет круг инструментов анализа и разработки структурной политики за счет применения динамического межотраслевого баланса, записанного в виде системы обыкновенных дифференциальных уравнений. Это стало возможным после публикации нами ранее вариантов оцифровки и калибровки такой структурной модели и перевода ее из набора чисто теоретических конструкций во множество вычислимых и практически полезных моделей. Формально оцифровка модели возможна при введении в научный оборот и расчете матрицы собственных (внутриотраслевых) и взаимных (межотраслевых) инерционностей, элементы которой имеют размерность времени. Сама вводимая в рассмотрение матрица располагается в модели на месте матрицы приростных фондоемкостей. Последняя отличается всеми научными обоснованиями, однако нам не известно ни одного статистического института в мире, который разрабатывает эту матрицу и публикует для экономики какой-либо страны или региона мира. Матрица приростных фондоемкостей в мировой статистике тотально отсутствует. Вторым фактором, обеспечивающим практическую ценность модели, является использование для ее калибровки матрицы коэффициентов финансовых потоков. Выполненные и представленные расчеты позволяют заключить, что на интервале публикации Росстатом базовых таблиц «затраты–выпуск» модель обеспечивает уверенное прогнозирование валового производства в текущих и сопоставимых ценах. В предлагаемом виде модель претендует на использование в качестве одного из инструментов анализа структурных изменений в отечественной экономике, для сопоставлений экономической динамики России с тенденциями в других развитых и развивающихся экономиках. Оцифровка модели для регионов позволила бы выполнять аналогичную работу на мезоуровне.

Ключевые слова: динамический межотраслевой баланс, оцифровка модели, оптимизация динамических свойств, калибровка модели, матрица межотраслевых инерционностей, структурная политика.

Классификация JEL: B41, C02, C61, C68.

УДК: 330.366.

Для цитирования: **Торопцев Е.Л., Кандохова М.М., Гудиева Н.Г.** (2024). Динамический межотраслевой баланс как инструмент анализа структурной политики // *Экономика и математические методы*. Т. 60. № 3. С. 43–53. DOI: 10.31857/S0424738824030049

ВВЕДЕНИЕ. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ.

Предлагаемая вниманию читателя статья располагается в цикле исследований авторов (Торопцев, Мараховский, 2022а, 2022б; Торопцев, Кандохова, Гудиева, 2023). Работа основана на понимании того, что экономическая динамика, как и вообще любая динамика, часто и естественно *формализуется дифференциальными уравнениями* и их *разностными аналогами*. При этом для анализа структурных свойств экономики как системы, разработки инструментов формирования структурной политики *динамический межотраслевой баланс* (МОБ) представляется весьма привлекательным. Отсутствующие в мировой экономической науке практики оцифровки динамического МОБ

в указанном виде впервые представлены нами, в том числе на страницах указанных выше изданий. Данная работа предлагает оцифровку модели на основе базовых таблиц «затраты–выпуск» (ТЗВ) с последующим анализом структурных динамических свойств в разрезе 98 видов экономической деятельности (ВЭД).

Возвращение внимания к структурной политике со стороны государства отмечается примерно с 2010 г. (НИУ ВШЭ, 2018). Такой подход адекватен проблеме исследования экономической динамики (Lin, 2011). Он же анализирует взаимосвязи структурных изменений с экономическим ростом (Silva, Teixeira, Aurora, 2008). При этом *Новая структурная экономика* рассматривает *структурные изменения* в качестве одного из *источников экономического роста* (Гусев и др., 2018). Бытует и противоположная оценка, но ясно одно: между двумя этими категориями естественным образом имеет место положительная корреляционная связь (UNIDO, 2016). В данном изложении для нас важен статистический факт того, что со второй половины XX в. все длительные периоды экономического роста в мире (Ксенофонтов, Ползиков, 2018), которым ставили в соответствие термин «экономическое чудо», происходили на фоне значительных структурных изменений (McMillan, Rodrik, Sepulveda, 2017; Diao, McMillan, Rodrik, 2017).

На сегодняшний день единой теории структурных трансформаций не существует, а у имеющихся теоретические построения носят в основном объясняющий характер (Field, Kruger, 2008). Доступные для анализа и прогнозирования задачи решаются на основе применения методов экономической статистики, эконометрики, финансовой математики, ценовых оценок, расчетов по канонам теории индексов (Узякова Е., Узяков Р., 2018). Набор вариантов анализа, предлагаемый указанными академическими дисциплинами, хорошо справлялся с математико-статистическим описанием экономики XX и начала XXI в., т.е. с описанием индустриальной экономики массового производства ресурсных товаров и товаров для конечного потребления, транспорта, традиционных услуг и торговли и т.п. Такой набор хорошо работает и теперь по этим же координатам. Выводы, сделанные усилиями пяти научных институтов НИУ ВШЭ, свидетельствуют о том, что экономическая реальность последнего времени характеризуется в том числе и производством высокотехнологических товаров и услуг, когда экономическая динамика плохо поддается измерению указанными традиционными методами. Знакомство с таким выводом порождает две идеи:

1) о необходимости внесения изменений в действующий ОКВЭД-2 для детализации представления в нем результатов вхождения высоких технологий в экономическую жизнь;

2) о востребованности неценовых оценок экономической динамики, возможно, более адекватных при измерении параметров новой экономики.

И если реализация первого пункта — прерогатива Росстата, то разработке второго пункта посвящена данная статья. При этом первым шагом выполнения этого пункта является оцифровка известной с середины прошлого века модели, позволяющей оценивать (измерять) технологические структурные сдвиги в терминах степеней экономического роста и межотраслевых инерционностей.

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОЦИФРОВКА МОДЕЛИ

Для моделирования и расчетов введем в рассмотрение следующие математико-статистические объекты: *MTC* — матрица (потоки) полных затрат (matrix of total costs), вычисляется из симметричной ТЗВ; *TIC* — матрица коэффициентов полных затрат — представляет собой элемент базовых ТЗВ (total input coefficients) либо вычисляется из данных симметричной ТЗВ; $X(t)$ — вектор-функция валовых выпусков (итого использование — столбец 111 симметричной ТЗВ), аргумент t часто можно просто опустить; $Y(t)$ — вектор-функция совокупного конечного спроса (столбец 110, в статической модели вектор Y); *MIC* — матрица промежуточного потребления (matrix of intermediate consumption, столбцы 1–98 симметричной ТЗВ); *ICV* — вектор промежуточного потребления (столбец 099 intermediate consumption vector); *A* — матрица коэффициентов прямых затрат; *B* — матрица межотраслевых инерционностей, имеет размерность времени (ранее на ее месте в модели располагалась матрица приростных фондоемкостей); *IV* — вектор инвестиций в основной и оборотный капитал (столбец 108 investment vector); *IM* — матрица формирования инвестиций (investment matrix); *VC* — вектор непроизводственного потребления (из столбца 111 вычитаются столбцы 99 и 108 либо из столбца 110 вычитается столбец 108) (в динамической модели это $VC(t)$); *MC* — матрица формирования непроизводственного потребления; *C* — матрица коэффициентов непроизводственного потребления; *FFC* — матрица коэффициентов финансовых потоков

(отсутствует в ТЗВ); E — единичная матрица; G (или G_1) — матрица состояния модели/системы, приведенной к нормальной форме Коши.

Моделирование будем выполнять на основе структурной (по происхождению динамической МОБ) системы дифференциальных уравнений, к которой мы неоднократно обращались (Торопцев, Мараховский, 2022а, 2022б; Торопцев, Кандохова, Гудиева, 2023). Основная динамическая модель имеет вид:

$$X(t) = B\frac{dX(t)}{dt} + AX(t) + VC(t), \quad X(0) = X_0. \tag{1}$$

Автор модели (1) В.В. Леонтьев опубликовал ее в 1952 г., указав и на то, что матрица B размерностью (100 × 100) для американской экономики сгенерирована его сотрудником К. Иверсоном (Леонтьев, 1990). Однако никаких следов этой или других симметричных матриц B какой-либо экономики мира нам не удалось обнаружить, несмотря на активные поиски с 1998 г. Никогда и нигде методика оцифровки (1) не была опубликована, хотя динамические модели с матрицей B использовались разными исследователями (см., например, (Ефимов, Мовшович, 1973)). Но при этом оставался вопрос о том, где авторы взяли матрицу B.

Однако уже в работе (Пархименко, 2023) автор рассматривает B как матрицу приростных фондоемкостей и дает экспериментальную оценку этой матрицы с размерностью 7×19 для экономики Республики Беларусь. Это означает, что капитальные блага производят 7 отраслей, а в ТЗВ для отражения этого в балансе содержится 19 видов экономической деятельности (ВЭД). Разные авторы, в том числе и (Пархименко, 2023), ссылаются на решение проблемы синтеза матрицы B в (Леонтьев, Ченери, Кларк, 1958) еще в начале 1950-х годов. Да, в (Леонтьев, Ченери, Кларк, 1958) представлены методические основы расчета коэффициентов капитального оборудования для телефонных станций США, и эти коэффициенты вычислены. В Приложении (Леонтьев, Ченери, Кларк, 1958) приведена несимметричная таблица капитальных коэффициентов для экономики США. Симметричной B не было и нет нигде. А если бы она и была, то подобными разработками нельзя будет воспользоваться для оцифровки (1), так как в (1) не может быть матрицы с безразмерными коэффициентами, элементы B должны иметь размерность времени. В противном случае простая (буквально «школьная») проверка модели (1) по размерности терпит неудачу.

Приступая к оцифровке модели (1), отметим, что данная модель после публикации перекочевала в разряд чисто теоретических конструкций (Суворов, Трещина, Белецкий, 2017) по причине невозможности представить оцифровку. В наших работах, в том числе и в данной статье, (1) однозначно извлекается из указанного семейства, достойно размещаясь во множестве вычислимых, практически полезных и востребованных моделей.

Основное уравнение статического МОБ Леонтьева с использованием введенных обозначений имеет вид

$$X = (E - A)^{-1} Y = TIC\, Y, \tag{2}$$

где матрица TIC может быть как вычислена из данных симметричной ТЗВ на основе (2), так и взята в готовом виде из набора базовых ТЗВ. Мы делали и то и другое, но по возможности вычисляли матрицу TIC, так как прочие данные берутся именно из симметричной ТЗВ. Справедливости ради укажем, что относительная ошибка расчета TIC (из-за того что содержит сайт Росстата) доходит для некоторых элементов максимум до 8%, если матрица A предварительно вычислена следующим образом:

$$A = MIC\,\mathrm{diag}(X^{-1}), \tag{3}$$

где $\mathrm{diag}(X^{-1})$ — диагональная матрица с элементами $\{1/x_i\}$, $i = 1, \ldots, n$ на диагонали. Будем считать точность вычисления TIC в нашем рассмотрении приемлемой.

Чтобы от TIC перейти к MTC, т.е. к финансовым потокам, надо TIC справа умножить на диагональную матрицу, которая в качестве элементов диагонали содержит «Конечное использование» (столбец № 110 в ТЗВ Росстата) по ВЭД (столбец 110) симметричной ТЗВ:

$$MTC = TIC\,\mathrm{diag}(Y). \tag{4}$$

Дальше вектор Y из (4) в расчетах не участвует, а используется вектор VC, который равен Y минус столбец 108 («Итого накопление»). Это «Итого накопление» в модели (1) представлено акселератором — первое слагаемое правой части. Ясно, что суммирование элементов строк MTC дает вектор валового производства X в миллионах рублей — тот же, что содержат симметричные ТЗВ.

Известно также, что полные затраты (валовое производство) представляют собой сумму промежуточных (прямых производственных) и инвестиционных затрат, а также той части товаров и услуг, которая передается для непроизводственного потребления. Такие суммы справедливы как для векторов, так и для соответствующих им матриц. Так, для векторов (индекс t опустим здесь и далее)

$$X = ICV + IV + VC, \tag{5}$$

а для соответствующих этим векторам матриц:

$$MTC = MIC + IM + MC, \tag{6}$$

где сумма элементов строки с номером i каждой матрицы равна элементу соответствующего вектора с тем же номером. И если все векторы определены, то матриц IM и MC статистика не предоставляет. Мы знаем только то что они формируются на основе пропорций, задаваемых векторами IV и VC соответственно. Возникающий произвольный выбор недостающих матриц дает две возможности: 1) считать, что обе формируются на основе пропорций, задаваемых порождающими их векторами, т.е. $IM = \mathrm{diag}\left(IV / X\right) MTC$ и $MC = \mathrm{diag}\left(VC / X\right) MTC$; 2) одна матрица рассчитывается как в п. 1, а вторая вычисляется как остаток из формулы (6), т.е. соответственно $MC = MTC - MIC - IM$, или $IM = MTC - MIC - MC$. Выбрать правильный вариант оцифровки можно на основе комплексного критерия — точности отображения экономической динамики, экономического содержания, экономического смысла численно получаемых величин при непременном выполнении равенства (6). Обсуждение этого вопроса перенесем в следующий раздел статьи, где анализируются расчеты.

В модели (1) переходим от дифференциальных уравнений к разностным путем замены производной отношением конечных разностей $dX / dt \approx \Delta X / \Delta t$ при $\Delta t = 1$ году. Это дает возможность записать выражение для расчета матрицы межотраслевых инерционностей (собственных $\left\{b_{ii}\right\}$ и взаимных $\{b_{ij}\}$) формирования основного и оборотного капитала

$$B = IM\ \mathrm{diag}\left(\Delta t / \Delta X\right) \tag{7}$$

с очевидным выводом о том, что ее элементы имеют размерность времени, выраженную в годах.

Заметим, что статистика дает положительные, нулевые и отрицательные значения для годового накопления суммы основного и оборотного капитала отраслей. Отрицательные формально приведут к появлению отрицательных инерционностей, которым бесполезно искать аналоги в физике. В экономике отрицательные межотраслевые инерционности фиксируют отрицательную динамику суммы основного и оборотного капитала (Широв, 2018) со всеми вытекающими последствиями. Это некоторые постоянные времени, характеризующие качество структурных переходных процессов. В принципе можно обойтись и без подобной экзотики, если в качестве IV взять вектор валового накопления основного капитала (без оборотного, столбец 105 симметричной ТЗВ), а прочие компоненты накопления отнести к конечному спросу. Однако это снизит точность отображения структурной динамики, что проверено расчетами. Подтверждается банальное утверждение: оборотный капитал тоже важен для экономического успеха отраслей (компаний); его надо учитывать в строке (где он и представлен) «Итого накопление». С учетом сказанного и участием формул (3)–(7) модель (1) переписывается следующим образом:

$$\begin{aligned} X = MIC\ \mathrm{diag}\left(1 / X\right) X + IM\ \mathrm{diag}\left(\Delta t / \Delta X\right) \Delta X / \Delta t + MC\ \mathrm{diag}\left(1 / X\right) X = \\ = A\,X + B\,\Delta X / \Delta t + C\,X, \quad \Delta t = 1 \end{aligned} \tag{8}$$

с легко распознаваемым соответствием задействованных матриц.

В заключение общих рассуждений формируется нормальная форма Коши:

$$\frac{dX}{dt} \approx \frac{\Delta X}{\Delta t} = G\,X\left(t\right),\ G = B^{-1}\left(E - A - C\right),\ X\left(0\right) = X_0. \tag{9}$$

Запись модели по не по строкам, а по столбцам симметричной ТЗВ, как в статике записывают ценовую модель МОБ, позволит получить в качестве B матрицу инерционностей формирования добавленных стоимостей в экономике. Разные матрицы — разные инерционности.

Теперь сделаем еще два существенных замечания.

Матрица B является вырожденной, потому что вектор IV за 2011 и 2016 г. имеет нулевые элементы, вслед за чем матрица IM приобретает нулевые строки. Преодоление вырожденности основано на использовании хорошо зарекомендовавшего себя *сингулярного разложения* (SVD) со встроенным аппаратом регуляризации задачи, что позволяет получить эффективную псевдообратную матрицу $B^{\#}$ для подстановки в (9) вместо B^{-1} (Форсайт, Малькольм, Моулер, 1980).

Второе замечание относится к развалу решения, получаемому в соответствии с (9), и к полной утрате его смысла. Именно поэтому экономисты не смогли практически использовать динамический МОБ в виде (1) или (8), (9). Выход находится на пути калибровки рассматриваемой модели авторским приемом введения в нее матрицы *FFC*, которую ранее мы называли базовой (Торопцев, Мараховский, 2022а, 2022б). Из ее определения следует, что

$$FFC = MTC\ \mathrm{diag}\left(X^{-1}\right). \tag{10}$$

При очевидном экономическом смысле *FFC* (мы имеем для анализа формулы (4) и (10)) ее математические свойства уникальны для нашего исследования. Дело в том, что $FFC\ X = X$, т.е. вектор выпуска X является собственным вектором матрицы *FFC*, которому соответствует собственное значение $\lambda = 1$. Это означает, что в (1) и в (8) вектор X, стоящий слева от знака «равно», можно слева умножить на матрицу *FFC*, что формально (математически) дела не меняет. Известно, что умножение матрицы на ее вещественный собственный вектор растягивает ($|\lambda| > 1$) или сжимает ($|\lambda| < 1$) его. Если собственное число $\lambda = 1$, то умножение матрицы на соответствующий собственный вектор не изменяет этого вектора. При этом данная операция калибрует модель, делая результаты расчетов адекватно интерпретируемыми в отношении исследуемой экономики. При этом *FFC* появляется на месте E в (9). Все теоретически верно и проверено расчетами.

Наконец, обратим внимание на то что вместо дифференциальных уравнений (1) можно записать систему из дифференциальных и алгебраических уравнений. В нашем случае (ТЗВ за 2011 и 2016 г.) из 98 уравнений дифференциальными являются 78, алгебраических уравнений 20. Для формализации записи модели следует предварительно опустить алгебраическую часть модели вниз, поменяв строки симметричной ТЗВ местами соответствующим образом. При этом для сохранения симметрии таблицы синхронно со строками меняются местами и столбцы. Динамический МОБ запишем в виде:

$$B\ pX + F\ X = 0, \tag{11}$$

где $p = \Delta / \Delta t$ — разностный оператор, аналог непрерывного оператора дифференцирования по времени d / dt; $F = A + C - FFC = -IM\ \mathrm{diag}\left(X^{-1}\right)$, где *FFC* занимает место единичной E. Теперь, в соответствии с авторской методикой (см. (Торопцев, Таточенко, 2011)) положим, что мы имеем дело с системой, содержащей в общем случае m фондообразующих и n нефондообразующих отраслей. Тогда модель должна включать m дифференциальных и n алгебраических уравнений. Их число может меняться во времени. В этом случае выпуск X представляется двумя подвекторами $X = (X_1\ \ X_2)^{\mathrm{T}}$, $X_1 \in R^m$, $X_2 \in R^n$, а в матрицах B и F выделяются блоки:

$$B = \begin{pmatrix} B_1 & B_2 \\ 0 & 0 \end{pmatrix};\ F = \begin{pmatrix} F_1 & F_2 \\ F_3 & F_4 \end{pmatrix},$$

где блоки $B_1, B_2, F_1, F_2, F_3, F_4$ имеют размерности (m, m), (m, n), (m, m), (m, n), (n, m), (n, n).

Далее модель (11) запишем в виде двух подсистем:

$$B_1 pX_1 + B_2 pX_2 + F_1 X_1 + F_2 X_2 = 0, \tag{12}$$

$$F_3 X_1 + F_4 X_2 = 0. \tag{13}$$

Теоретически неинтегрируемые переменные X_2 можно исключить и получить форму Коши для m дифференциальных уравнений путем выполнения очевидных преобразований. Для этого из формулы (13) выразим X_2 через X_1, считая блок F_4 неособенной матрицей $X_2 = -F_4^{-1} F_3 X_1$, и исключим X_2 из уравнения (12): $\left(B_1 - B_2 F_4^{-1} F_3\right) pX_1 = -\left(F_1 - F_2 F_4^{-1} F_3\right) X_1$.

Теперь форма Коши приобретает вид:

$$pX_1 = G_1 X_1,\ X_1(0) = X_{10},\ G_1 = -\left(B_1 - B_2 F_4^{-1} F_3\right)^{-1} \left(F_1 - F_2 F_4^{-1} F_3\right) X_1. \tag{14}$$

Такова формальная сторона получения формы Коши. Реальность — гораздо проще. О том, как реально получается форма Коши, рассказано в следующем разделе.

В заключении раздела сделаем еще одно, поясняющее, замечание об инерционностях. В форме (11) удобно рассмотреть сначала одно однородное уравнение с коэффициентами вместо матриц, все соответствия легко устанавливаются и не требуют пояснений:

$$b\ px + f\ x = 0,\ f = -im / x. \tag{15}$$

Характеристическое уравнение для (15) $b\lambda + f = 0$, $\lambda = -f / b$ позволяет записать решение $x(t) = x_0\, \mathrm{e}^{-f\, b^{-1} t}$. Если положить $t = b$, то $x(b) = x_0\, \mathrm{e}^{-f} = x_0\, \mathrm{e}^{im/x}$. Значение $\mathrm{e}^{im/x}$ по величине близко к 1,

т.е. за время $t = b$ инерционность единственной отрасли не позволяет статистически значимо изменить выпуска. Аналогично для модели (11) матрица B определяет такой момент времени, в который получается решение $X\left(t_B\right) = \mathrm{e}^{IM\ \mathrm{diag}\left(X^{-1}\right)} X_0$. При этом матричная экспонента близка к единичной матрице, т.е. $X\left(t_B\right) \approx X_0$. Следовательно, на начальном участке переходного процесса выпуск не может измениться скачком, или просто статистически значимо из-за наличия инерционностей в экономике.

РАСЧЕТЫ. ОБСУЖДЕНИЯ. ВЫВОДЫ

Расчеты проводились с использованием моделей, представляющих собой: а) систему обыкновенных дифференциальных уравнений (СДУ) (1), (9); б) алгебро-дифференциальную систему (АДС) (11)–(14). На момент написания данной статьи доступны для использования базовые ТЗВ за 2011 и 2016 г. Отметим, что для теоретико-методологической части работы возраст данных значения не имеет. Если массивы *MIC* в любом расчете безальтернативно заданы в симметричной ТЗВ, а *MTC* вычисляется по формуле (4), то *IM* и *MC* статистика не разрабатывает. Для однозначной оцифровки достаточно было бы иметь любую из них, тогда вторая вычислялась бы из (6) вычитанием из *MTC* двух известных матриц. Совместное вычисление *IM* и *MC* здесь приводить не будем — оно нарушает равенство (6), а в случае получения АДС приводит к развалу решения. Также к неминуемому развалу решения приводит игнорирование калибрующей модель матрицы *FFC*.

И еще одно замечание состоит в том, что разностную аппроксимацию производной выпуска по времени в базовом расчете мы учитывали весьма приближенно: для всех наших моделей первоначально полагая $\Delta t = 1$, а $\Delta X = \left(X_{2016} - X_{2011}\right) / 5$, т.е. одинаковое значение для любого года пятилетнего периода.

Начальную оценку вариантов расчетов проведем на основе данных табл. 1, в которой представлены первые 10 (в порядке убывания по величине) собственных значений матриц состояния G для СДУ или G_1 — для АДС. Этого достаточно для предварительного анализа. Название столбцов как *IM* означает расчет этой матрицы на основе пропорций, задаваемых вектором *IV*; соответственно, столбцы *MC* содержат вариант оцифровки с расчетом *MC* в соответствии с пропорциями, задаваемыми вектором *VC*.

Не все вещественные собственные значения матриц состояния экономики образца 2011 и 2016 г. положительны, что означает предстоящее сокращение производства в соответствующих ВЭД.

Уменьшение степеней роста отраслей на интервале 2011–2016 гг. (см. табл. 1) чрезмерно и требует корректировок производных и начальных значений, что даст более точную G для каждого года рассматриваемого интервала. С такими корректировками экономическая динамика уверенно прогнозируется со средней ошибкой менее 5%. Так получаются номинальные значения выпусков. Учет дефляторов даст их сопоставимые, или реальные, значения. Но даже с указанными корректировками/калибровками структурная готовность к росту в 2016 г. снизилась по сравнению с 2011 г. При этом результаты

Таблица 1. Собственные значения матрицы G (G_1 для АДС)

Система дифференциальных уравнений				Алгебро-дифференциальная система			
2011 г.		2016 г.		2011 г.		2016 г.	
IM	MC	IM	MC	IM	MC	IM	MC
1	2	3	4	5	6	7	8
0,643	0,644	0,153	0,153	0,644	0,642	0,153	0,287+i0,177
0,333	0,37	0,13	0,13	0,333	0,333+i7,525e−03	0,125	0,287+i0,177
0,252	0,333	0,125	0,125	0,298	0,333−i7,525e−03	0,12	0,193
0,245	0,298	0,12	0,12	0,245	0,245	0,11	0,19+i1,831e−05
0,241	0,247	0,111	0,11	0,241	0,24	0,109	0,19−i1,831e−05
0, 231	0,245	0,11	0,109	0,231	0,229	0,107	0,187
0, 218	0,241	0,109	0,107	0,221	0,222	0,105	0,184
0, 207	0,231	0,107	0,107	0,221	0,218	0,105	0,182
0, 201	0,221	0,105	0,105	0,218	0,21+i0,14e−01	0,104	0,182
0, 196	0,22	0,105	0,104	0,201	0,21−i0,14e−01	0,1	0,179

в столбцах 6 и 8 подлежат выбраковке. Так как для этих вариантов не выполняется равенства нулю нижних строк матрицы *IM* при формировании АДС, мы наблюдаем бифуркационные явления образования комплексно-сопряженных пар корней из двух вещественных. Остальные варианты оцифровки, в том числе и не представленные в табл. 1, дают близкие результаты оценки структурных свойств экономики.

Вопрос о целесообразности формирования АДС вместо использования СДУ решается самим исследователем (можно формировать, а можно и нет) — это не изменяет качества моделирования и оценок эффективности структурной политики, формирующей параметры динамического МОБ. При этом модель в виде АДС *более чувствительна к варианту оцифровки модели*, что можно установить как на основе анализа данных табл. 1, так и вычислением чувствительностей собственных значений матрицы состояния к вариации любых параметров модели (Торопцев, Кандохова, Гудиева, 2023). Для обеспечения адекватности анализа и страховки от неверных выводов было бы естественно основываться на близких результатах расчетов, полученных при разных вариантах оцифровки. Такие результаты содержат столбцы 1–5 и 7 табл. 1.

Во всех случаях модели в виде СДУ мы получали матрицы состояния с большим диагональным доминированием, когда внедиагональные элементы, судя по их величинам, можно отнести к погрешностям (к шумовым эффектам) такого моделирования. Никакие варианты оцифровки СДУ качественно картины не меняют — важно, чтобы выполнялось равенство (6). Представление о диагональном доминировании дает табл. 2, где приведен фрагмент (левый верхний угол размером 5·5) матрицы G для одного из вариантов расчетов. При этом матрицы G_1 для АДС строго диагональны, относительные отклонения их диагональных элементов от таковых же в G не превышают 4,7%. А на диагонали диагональной матрицы, как известно, стоят ее собственные значения.

Подтвердить вычислительный эксперимент можно следующим образом. Считая, что численно $\Delta X / \Delta t = \Delta X$ при $\Delta t = 1$ год формулу (11) представим в виде

$$B\Delta X + F\,X = B\Delta X + \left(A + C - FFC\right)X\,. \tag{16}$$

Отсюда следует, что $F = A + C - FFC = \left(MIC + MC - MTC\right)\mathrm{diag}\left(X^{-1}\right) = -IM\,\mathrm{diag}\left(X^{-1}\right)$, т.е.

$$B\Delta X = -F\,X = IM\,\mathrm{diag}\left(X^{-1}\right)X\,. \tag{17}$$

Тогда из (17) с учетом (7) и нашими допущениями немедленно следует, что

$$IM\,\mathrm{diag}\left(\Delta X^{-1}\right)\Delta X = IM\,\mathrm{diag}\left(X^{-1}\right)X, \tag{18}$$

откуда окончательно имеем нормальную форму Коши

$$\frac{dX}{dt} \approx \frac{\Delta X}{\Delta t} = \Delta X = \mathrm{diag}\left(\Delta X / X\right)X = G\,X, \quad X\left(0\right) = X_0. \tag{19}$$

Формула (19) поясняет возникновение степей роста (или спада). Если не корректировать ΔX и X_0, то при X_{2011} мы будем иметь заведомо бóльшие степени роста, чем для X_{2016}, а интегрирование модели приведет к завышенным оценкам валового производства в 2016 г. Хотя на интервале 2011–2016 гг. оно намного завышено не будет. Формирование АДС в соответствии с формулами (12)–(14) сохраняет справедливость (18) и (19), но преподносит особенности, связанные с перенумерацией переменных в X и перестановкой строк в иных формирующих модель массивах. В результате такой подготовки данных вектор *IV* имеет внизу 20 нулевых элементов, что при вычислении на его основе матрицы *IM* порождает 20 нулевых строк из числа последних. Соответственно, в этом случае мы будем иметь нулевыми матрицы F_3 и F_4 в (13), а вычисление матрицы состояния упростится до выражения $G_1 = -B_1^{-1}F_1$. Расчет по последней формуле полностью совпадает с тем, что получается по (19).

Таблица 2. Фрагмент матрицы G СДУ, 2016 г.

№ строки / столбца	1	2	3	4	5
1	1,12E−01	−1,62E−05	−2,02E−04	−1,76E−05	−1,51E−06
2	−1,71E−05	1,08E−01	2,89E−07	−1,23E−05	−6,89E−07
3	−1,84E−04	2,50E−07	1,25E−01	7,00E−07	−1,75E−07
4	−4,19E−05	−2,77E−05	1,83E−06	4,78E−02	−4,81E−06
5	−2,40E−06	−1,06E−06	−3,55E−07	−3,21E−06	7,21E−02

Установленная диагональность G позволяет несколько изменить задачу и процесс оцифровки модели. Так, если валовое производство в отраслях меняется год от года по экспоненциальному закону, этот факт позволяет сгенерировать диагональную матрицу G с диагональными элементами для интервала (t, q) в годах:

$$\lambda_i = \ln\left(x_{i,t} / x_{i,q}\right) / \left(t - q\right), \quad i = 1, \ldots, n \tag{20}$$

либо построить G в соответствии с (19).

На диагонали диагональной матрицы располагаются ее собственные значения, а задача прогнозирования валового производства по динамическому МОБ упрощается до вычисления матричной экспоненты

$$X\left(t\right) = \mathrm{e}^{Gt} X_0, \tag{21}$$

когда e^{Gt} — тоже диагональная матрица. Если перед оцифровкой по формуле (19) или (20) определить диагональную G, то прогнозирование выпуска возможно сразу на основе (21), а вот анализ и синтез собственных (т.е. внутренних, структурных) динамических свойств (СДС) экономики предполагает вычисление матрицы межотраслевых инерционностей

$$B = \left(FFC - A - C\right)G^{-1}, \tag{22}$$

а также определение остальных обсуждаемых в данной статье массивов. Отметим, что расчеты по формулам (7) и (22) в разных вариантах оцифровки (1) совпадают полностью, без отклонений. Таким образом, формула (22) устанавливает взаимно однозначные соответствия между технологическими степенями роста валового производства и всей совокупностью параметров модели. Это дает основания ставить и решать многочисленные задачи одно- или многокритериальной оптимизации. Например, можно установить при каких инерционностях будет достигнут требуемый прирост ΔX, как при этом будут изменяться остальные параметры модели и т.д. Если же в каких-либо выпусках надо будет отобразить околотрендовые колебания, это делается путем включения в спектр G комплексно-сопряженных пар $\lambda_{j,j+1} = \alpha_j \pm i\omega_j$, $i = \sqrt{-1}$. В матрице G на диагонали появляются жордановы клетки второго порядка вида

$$g_j = \begin{pmatrix} \alpha_j & -\omega_j \\ \omega_j & \alpha_j \end{pmatrix}. \tag{23}$$

Запись (23) позволяет при вычислениях избежать работы с комплексной арифметикой.

Если же делается прогноз, но нет возможности получить диагональных элементов G по (20) или клеток вида (23), опираясь на уже известную статистику (2011–2016 гг. — в нашем случае), то необходимы обоснованные предположения о будущих скоростях изменения выпусков. Можно попытаться построить G по данным только что завершившегося периода (например, года). Обладание матрицей состояния позволит интегрировать переходный процесс вычислением матричной экспоненты, например на 1–2 года вперед, а затем принять новые приросты выпуска и изменить начальные условия. Можно обратить внимание на ранее изложенные методы анализа структурных переходных процессов в (Торопцев, Мараховский, Дужински, 2020). Результат прогноза валового производства 2016 г. по данным базовых ТЗВ за 2011 г. представлен на рисунке.

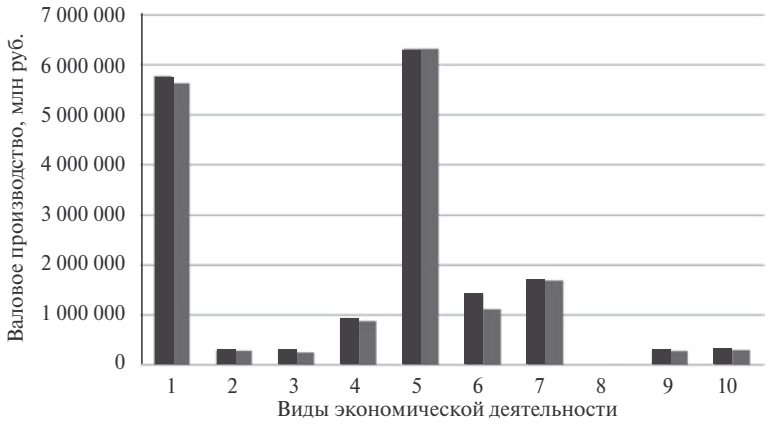

Рисунок. Валовое производство в разрезе ВЭД в 2016 г.

Как и в табл. 1, показаны 10 ВЭД для качественной (визуальной) оценки успеха прогнозирования. Набор представленных ВЭД случаен, например, под № 8 разместились данные, которые не отображаются в масштабе диаграммы. Это ВЭД «Руды урановые и ториевые», где выпуск 2016 г. составил 4424 млн руб., а прогноз — 4230 млн руб. (относительная ошибка — 4,4%, максимальная же относительная ошибка прогноза составила 8%). Рисунок и таблицы позволяют заметить, что динамический МОБ в виде дифференциальных уравнений, как минимум на «хорошо», позволяет прогнозировать динамику валового производства. Предусмотренные в алгоритме вышеуказанные уточнения данных на рассматриваемом интервале приведут к оценкам, представленным на рисунке. В зависимости от содержательной постановки задачи прогнозировать выпуск можно в текущих и сопоставимых ценах. При этом отрицательные степени роста свидетельствуют о снижении выпуска. Так, ВЭД «Руды железные» имел в 2011 г. степень роста $\lambda = -0,051$, что привело к 2016 г. к снижению объема производства с 368 624 до 274 663 млн руб.

Динамический МОБ и вычислимые показатели СДС экономики как системы (Торопцев, Мараховский, Дужински, 2019) предназначены для разработки и анализа эффективности структурной политики. Они, как минимум, дают формализованный инструментарий для исследования технологий, применяемых в экономике, влияния инвестиций в основном и оборотном капиталах на экономический рост. Еще раз подчеркнем: модель (1) и авторская теория СДС предназначены для оценивания и управления только технологическими структурными сдвигами (Ивантер, 2018). Рассмотренные модели и показатели СДС в терминах *наблюдаемости, возбуждаемости, управляемости, чувствительности* к параметрам модели позволяют, во-первых, однозначно измерить результаты структурных реформ в экономике, а во-вторых, оцифрованный динамический МОБ дает возможность рассматривать варианты структурной политики, различные сценарии развития страны. Успех моделирования и прогнозирования прямо связан с качеством аппроксимации производной в модели (1). Аналитически и экспериментально подтвержденная диагональность матрицы состояния G_1 для АДС (12), (13) и диагональное доминирование в G для СДУ позволяют использовать формулы (20), (23) для построения G или G_1 с последующим вычислением инерционностей B. Это не требует аппроксимации производной, сразу делая доступным анализ СДС.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Базовые ТЗВ Росстата предоставляют достаточно информации для помещения динамической модели МОБ в семейство оцифрованных, вычислимых, т.е. практически востребованных моделей. Это открывает широкий простор для развития количественных методов разработки и оценки результатов структурных реформ в рамках методологии «затраты–выпуск» в терминах межотраслевых инерционностей и перечисленных показателей СДС, т.е. с эффективным использованием всех преимуществ анализа и синтеза структурной динамики экономики, предоставляемых аппаратом дифференциальных уравнений. И если в данной статье матрица B содержит инерционности образования накоплений в экономике, то при включении под знак производной всего конечного спроса, а не только его инвестиционной составляющей, будет получена другая матрица B — она будет представлять внутри- и межотраслевые инерционности динамики конечного спроса. Если же записать уравнения по столбцам симметричной ТЗВ, как это делают для ценовой модели МОБ, то B даст для анализа инерционностей формирования добавленной стоимости в разрезе ВЭД. Модель в виде СДУ/АДС может использоваться сама по себе или включаться в сложные информационно-вычислительные системы, разрабатываемые ЦЭМИ РАН, ИНП РАН, ИЭОПП СО РАН и другими структурами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

Гусев М.С., Широв А.А., Ползиков Д.А., Янтовский А.А. (2018). Глобальные тенденции изменения структуры производства и доходов в мире и России // *Проблемы прогнозирования*. № 6 (171). С. 28–50. [**Gusev M.S., Shirov A.A., Polzikov D.A., Yantovsky A.A.** (2018). Global trends in the structure of production and income in the world and Russia. *Studies on Russian Economic Development*, 6 (171), 28–50 (in Russian).]

Ефимов М.Н., Мовшович С.М. (1973). Анализ сбалансированного роста в динамической модели народного хозяйства // *Экономика и математические методы*. Т. IX. Вып. 1. С. 32–43. [**Efimov M.N., Movshovich S.M.** (1973). Analysis of balanced growth in a dynamic model of the national economy. *Economics and Mathematical Methods*, IX, 1, 32–43 (in Russian).]

Ивантер В.В. (2018). Роль межотраслевого баланса в макроэкономическом анализе и прогнозировании // *Проблемы прогнозирования*. № 6 (171). С. 3–6. [**Ivanter V.V.** (2018). The role of inter-sectoral balance in macroeconomic analysis and forecasting. *Studies on Russian Economic Development*, 6 (171), 3–6 (in Russian).]

Ксенофонтов М.Ю., Ползиков Д.А. (2018). Ретроспективные структурные сдвиги в Российской экономике // *Проблемы прогнозирования*. № 6 (171). С. 62–81. [**Ksenofontov M.Y., Polzikov D.A.** (2018). Retrospective structural shifts in the Russian economy. *Studies on Russian Economic Development*, 6 (171), 62–81 (in Russian).]

Леонтьев В., Ченери Х.В., Кларк П.Г. (1958). Исследование структуры американской экономики: теоретический и эмпирический анализ по схеме затраты–выпуск. М.: Госстатиздат. 640 с. [**Leontief W., Chenery H.V., Clark P.G.** (1958). *Studies in the structure of the American economy: Theoretical and empirical explorations in input-output analysis*. Moscow: Gosstatizdat (in Russian).]

Леонтьев В.В. (1990). *Экономические эссе. Теории, исследования, факты и политика.* М.: Политическая литература. 415 с. [**Leontief W.** (1990). *Economic essays. Theories, research, facts and policy*. Moscow: Politicheskaja literatura. 415 p. (in Russian).]

НИУ ВШЭ (2018). *Структурные изменения в российской экономике и структурная политика. Аналитический доклад.* Под научным руководством Е.Г. Ясина. [HSE University (2018). *Structural changes in the Russian economy and structural policy. Analytical report*. E.G. Yasin (sci. ed.) (in Russian).]

Пархименко В.А. (2023). Опыт экспериментальной оценки матрицы коэффициентов импортных капитальных затрат в динамической модели Леонтьева для белорусской экономики в 2016–2020 годах // *Проблемы прогнозирования*. № 4 (199). С. 168–180. DOI: 10.47711/0868-6351-199-168-180 [**Parkhimenko V.A.** (2023). Experience of experimental estimation of the import capital expenditure coefficient matrix in the Leontief dynamic model for the Belarusian economy in 2016–2020. *Studies on Russian Economic Development*, 4 (199), 168–180. DOI: 10.47711/0868-6351-199-168-180 (in Russian).]

Суворов Н.В., Трещина С.В., Белецкий Ю.В. (2017). Балансовые и факторные модели как инструмент анализа и прогнозирования структуры экономики. В сб.: «*Научные труды: Институт народнохозяйственного прогнозирования РАН*». Т. 15. С. 50–75. М.: МАКС Пресс. [**Suvorov N.V., Treschina S.V., Beletsky Y.V.** (2017). Balance and factor models as a tool for analyzing and forecasting the structure of the economy. *Scientific works: Institute of national economic forecasting of the Russian Academy of Sciences*, 15, 50–75. Moscow: MAKS Press (in Russian).]

Торопцев Е.Л., Кандохова М.М., Гудиева Н.Г. (2023). Оптимизация структурной динамики экономики в рамках методологии «затраты–выпуск» // *Экономика и математические методы*. Т. 59. № 2. С. 26–38. DOI: 10.31857/S042473880025859-3 [**Toroptsev E.L., Kandokhova M.M., Gudieva N.G.** (2023). Optimization of structural dynamics of the economy within the framework of "input–output" methodology. *Economics and Mathematical Methods*, 59, 2, 26–38 (in Russian).]

Торопцев Е.Л., Мараховский А.С. (2022а). Анализ макроструктурной динамики в рамках методологии «затраты–выпуск» // *Журнал Новой экономической ассоциации*. № 1 (53). С. 12–30. DOI: 10.31737/2221-2264-2022-53-1-1 [**Toroptsev E.L., Marakhovsky A.S.** (2022a). Analysis of macrostructural dynamics within the framework of the «input–output» methodology. *Journal of the New Economic Association*, 1 (53), 12–30 (in Russian).]

Торопцев Е.Л., Мараховский А.С. (2022б). Структурные инерционности экономических систем // *Экономика и математические методы*. Т. 58. № 1. С. 38–47. DOI: 10.31857/S042473880016564-9 [**Toroptsev E.L., Marakhovsky A.S.** (2022b). Structural inertia of economic systems. *Economics and Mathematical Methods*, 58, 1, 38–47 (in Russian).]

Торопцев Е.Л., Мараховский А.С., Дужински Р.Р. (2019). Теоретические основы разработки комплекса равновесных и межотраслевых моделей // *Экономический анализ: теория и практика*. Т. 18. № 3. С. 427–446. DOI: 10.24891/ea.18.3.427 [**Toroptsev E.L., Marakhovsky A.S., Duszynski R.R.** (2019). Theoretical framework for a set of equilibrium and input–output models development. *Economic Analysis: Theory and Practice*, 18, 3, 427–446. DOI: 10.24891/ea.18.3.427 (in Russian).]

Торопцев Е.Л., Мараховский А.С., Дужински Р.Р. (2020). Межотраслевое моделирование переходных процессов // *Экономический анализ: теория и практика*. Т. 19. № 3. С. 564–585. DOI: 10.24891/ea.19.3.564 [**Toroptsev E.L., Marakhovsky A.S., Duszynski R.R.** (2020). Intersectoral modeling of transient processes. *Economic Analysis: Theory and Practice*, 19, 3, 564–585. DOI: 10.24891/ea.19.3.564 (in Russian).]

Торопцев Е.Л., Таточенко Т.В. (2011). Теоретические основы управления модернизацией и экономическим ростом // *Региональная экономика: теория и практика*. № 2 (185). С. 2–11. eLIBRARY ID: 15541818 [**Toroptsev E.L., Tatochenko T.V.** (2011). Theoretical foundations for managing modernization and economic growth. *Regional Economics: Theory and Practice*, 2 (185), 2–11. eLIBRARY ID: 15541818 (in Russian).]

Узякова Е.С., Узяков Р.М. (2018). Анализ влияния научно-технического развития на экономический рост с использованием инструментария межотраслевого баланса // *Проблемы прогнозирования*. № 6 (171). С. 82–92. [**Uzyakova E.S., Uzyakov R.M.** (2018). Analysis of the impact of scientific and technological development on economic growth using the tools of input-output balance. *Studies on Russian Economic Development*, 6 (171), 82–92 (in Russian).]

Форсайт Дж., Малькольм М., Моулер К. (1980). Машинные методы математических вычислений. М.: Мир. 276 с. [**Forsyth J., Malcolm M., Mowler K.** (1980). *Machine methods of mathematical computation*. Moscow: Mir. 276 p. (in Russian).]

Широв А.А. (2018). Использование таблиц «затраты–выпуск» для обоснования решений в области экономической политики // *Проблемы прогнозирования*. № 6 (171). С. 12–25. [Using input–output tables to justify economic policy decisions. *Studies on Russian Economic Development*, 6 (171), 12–25 (in Russian).]

Diao X., McMillan M., Rodrik D. (2017). The recent growth boom in developing economies: A structural change perspective. *National Bureau of Economic Research,* w23132.

Field W., Kruger C. (2008). The effect of an art psychotherapy intervention on levels of depression and health locus of control orientations experienced by black women living with HIV. *South African Journal of Psychology*, 38, 467–478.

Lin J.Y. (2011). New structural economics: A framework for rethinking development 1. *The World Bank Research Observer*, 26 (2), 193–221.

McMillan M., Rodrik D., Sepulveda C. (2017). Structural change, fundamentals and growth: A framework and case studies. *National Bureau of Economic Research*, w23378.

Silva E.G., Teixeira, Aurora A.C. (2008). Surveying structural change: Seminal contributions and a bibliometric account. *Structural Change and Economic Dynamics*, 19, 273–300.

UNIDO (2016). *United Nations Industrial Development Organization, Industrial Development Report. The role of technology and innovation in inclusive and sustainable industrial development*. Vienna: UNIDO.

Dynamic input–output balance as a tool for structural policy analysis

© 2024 E.L. Toroptsev, M.M. Kandokhova, N.G. Gudieva

E.L. Toroptsev,
Digital Business Technologies and Accounting Systems, North Caucasus Federal University, Stavropol, Russia; e-mail: eltoroptsev@yandex.ru

M.M. Kandokhova,
Center for Sustainable Development, Kabardino-Balkar State University, Nalchik, Russia; e-mail: mrkand@mail.ru

N.G. Gudieva,
Scientific and educational mathematical center "North-Caucasus Center for Mathematical Research", Stavropol, Russia; e-mail: gudieva82@bk.ru

Received: 29.11.2023

The research was carried out at the expense of a grant from the Russian Science Foundation (No. 24-28-00056), https://rscf.ru/project/24-28-00056/

Abstract. This article extends the array of tools available for the analysis and advancement of structural policies using dynamic inter-sectoral balance, expressed in the form of a system of ordinary differential equations. This development became achievable following the publication of the authors' methods for digitizing and calibrating such a structural model, thereby transforming it from a set of "purely theoretical constructs" into a set of computational and pragmatically valuable models. Formally, the digitization process for the model involves the introduction and computation of the eigen (intra-industry) and mutual (inter-industry) inertia matrices, the elements of which are time-dependent. These matrices substitute the conventional incremental capital intensity matrix within the model. It is worth noting that, unlike other scientific summaries, the matrix of incremental capital intensity is nowhere to be found in global statistics. No statistical institute worldwide develops or publishes it for any economy. The second factor that enhances the practical utility of the model lies in the utilization of the matrix of financial flow coefficients for its calibration. The computations conducted and presented here lead to the conclusion that the model is proficient in providing robust forecasts of gross output in current and comparable prices within the timeframe covered by Rosstat's basic "input–output" tables. In its current format, the model holds potential as a valuable tool for scrutinizing structural changes within the domestic economy and for comparing Russia's economic trends with those of other developed and developing nations. Digitizing it for use at the regional level would enable similar analyses on a mesolevel scale.

Keywords: dynamic input-output balance, digitization, optimization, calibration, matrix of intersectorals inertialities.

JEL Classification: B41, C02, C61, C68.

UDC: 330.366.

For reference: **Toroptsev E.L., Kandokhova M.M., Gudieva N.G.** (2024). Dynamic input–output balance as a tool for structural policy analysis. *Economics and Mathematical Methods*, 60, 3, 43–53. DOI: 10.31857/S0424738824030049 (in Russian).

ЭКОНОМИКА И МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ, 2024, том 60, № 3, с. 54–69

РЕГИОНАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ

Моделирование качества жизни Санкт-Петербурга и регионов Северо-Запада

© 2024 г. В.В. Окрепилов, Н.Л. Гагулина

В.В. Окрепилов,
академик РАН, Институт проблем региональной экономики Российской академии наук, Санкт-Петербург; e-mail: okrepilov@test-spb.ru

Н.Л. Гагулина,
Институт проблем региональной экономики Российской академии наук, Санкт-Петербург; e-mail: Nata_C@bk.ru

Поступила в редакцию 30.05.2024

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-28-10090, https://rscf.ru/project/23-28-10090/ и гранта Санкт-Петербургского научного фонда при поддержке правительства Санкт-Петербурга, в Институте проблем региональной экономики Российской академии наук.

Аннотация. Статья посвящена применению методологии экономики качества для получения научно обоснованных оценок качества жизни в регионах Северо-Западного федерального округа. Направлена на развитие исследований, связанных с поиском возможных направлений воздействия на социально-экономическую систему, способствующих повышению качества жизни населения в условиях цифровизации (по данным Санкт-Петербурга и регионов Северо-Западного федерального округа). В ходе исследования выполнено моделирование качества жизни для регионов Северо-Западного федерального округа. Проведена базовая и комплексная оценка качества жизни, которая позволила проследить более чем десятилетнюю динамику показателя, провести группировку регионов, выявить и обосновать их общие и обличительные особенности в контексте проведенного исследования. Анализ отдельных характеристик качества жизни регионов СЗФО показал, что можно измерить вклад, который вносят медико-демографические условия, социально-экономическое благополучие, комфортность и безопасность среды жизнедеятельности в показатель качества жизни. По результатам исследования сделан вывод о значимости оценки вклада данных составляющих для определения вектора проведения политики регионального развития. В интересах раскрытия перспективных возможностей получения алгоритмических решений в области стандартизации управления качеством жизни региона предложен новый формат многоуровневой системы управления качеством. Применение цифровизированного формата принятия управленческих решений в многоуровневой системе управления качеством многократно повысит их эффективность за счет расширения возможностей анализа сложных данных без четких взаимосвязей, в том числе для прогнозирования и оптимизации процессов, протекающих на локальном, региональном, национальном уровнях.

Ключевые слова: качество жизни, экономика качества, стандарты, стандартизация, управление качеством, управленческие решения, стратегия, развитие.

Классификация JEL: R11, R15, O11.

УДК: 332.055.2.

Для цитирования: **Окрепилов В.В., Гагулина Н.Л.** (2024). Моделирование качества жизни Санкт-Петербурга и регионов Северо-Запада // *Экономика и математические методы*. Т. 60. № 3. С. 54–69. DOI: 10.31857/S0424738824030052

ВВЕДЕНИЕ

Природа проблем качества жизни находит отражение в трудах социологов, экономистов, регионалистов, медиков и исследователей из других отраслей научного знания — в связи с изменением содержания и требований к качеству жизни в зависимости от условий, в которых оно формируется. Все чаще значимым фактором перемен, влияющих на качество жизни, являются новшества, нововведения, инновации, которые воспринимаются как улучшение жизни людей и повышение ее качества.

Радикальные сдвиги в современной жизни спровоцировал колоссальный рывок, который сделало человечество в применении ресурсов, базирующихся на одной из базовых субстанций — *информации*. Ярким проявлением изменения места и роли информации в процессе экономического взаимодействия стала цифровизация — процесс создания и распространения новых оптимальных для данного этапа развития технологических решений, предполагающих применение цифровых — информационных и телекоммуникационных — технологий.

В связи с цифровизацией каждую минуту в интернет-пространстве публикуется 150 млн электронных писем, появляется более 20 млн сообщений в мессенджерах, совершается более 3 млн просмотров видео на YouTube; 2,5 млн составляет число поисковых запросов в Google, а платежи на платформе Амазон превышают 200 тыс. долл.[1] Меняется архитектура мировой экономики, цифровые высокотехнологичные компании все чаще занимают все лидирующие строчки рейтингов по показателю биржевой капитализации бизнеса. Цифровые технологии существенно меняют повседневную жизнь, способствуя формированию новых условий жизнедеятельности, приведению их в соответствие с новыми моделями поведения людей, которые возникают в связи с переходом экономики в иное состояние и определяются представлениями о ценностях, существующими в сознании людей.

Преимущества, обеспеченные цифровизацией и достижениями экономики знаний, которые потенциально способствуют повышению качества жизни, прогрессивны и очень заметны (Горбашко, 2023; Салимова, 2023). В первую очередь это — сетевые эффекты, доминирование закона возрастающей отдачи взамен закона убывающей отдачи, короткие инновационные и жизненные циклы продукции и услуг; кастомизация, появление и развитие новых финансовых инструментов, развитие и распространение института интеллектуальной собственности и т.д. Наряду с преимуществами образуется ряд проблем социальной и экологической направленности, решение которых возможно лишь на системном уровне.

В социальной сфере это — возможные проблемы диспропорции на рынке труда и безработица как результат структурных изменений в экономике, появление тенденции дегуманизации общественной жизни и коммуникаций, трансформация привычных социальных институтов, риск цифровой сегрегации населения и т.д. (Кузнецов, 2020; Хачатурян, 2021). За рубежом часто рассматривают обратную сторону появления деформаций рынка труда и их последствия: падение доходов населения, задействованного ранее в профессиях, которые оказались не востребованы в новых условиях (McInnis, Michelmore, Pilkauskas, 2024). Все чаще в разных странах затрагивают проблемы пожилых людей, подходы государства к решению таких проблем (Matsudaira, 2014; Xu et al., 2022). Кроме этого, к экономически неблагоприятным проявлениям цифровизации относится и тенденция нарастания внутренних затрат на цифровизацию, которая потенциально способна превысить выгоды, а также рост ущерба от киберугроз и уязвимости данных.

Экологическая сфера, на первый взгляд, должна только выигрывать от распространения цифровизации, но и в этой сфере есть серьезные проблемы. Работа, связанная с хранением и обработкой данных, поддержанием постоянной доступности онлайн-сервисов, требует непрерывного роста энергопотребления (Татаринов, 2023). Ускорение оборота технических средств цифровизации, нарушение требований их утилизации, все чаще становится источником экологических проблем: загрязнения воды и почв опасными отходами. Производство высокотехнологичных цифровых устройств, добыча и переработка ресурсов, необходимых для его обеспечения, сопряжена не только с ростом потребности в редкоземельных металлах, но и с проблемами их утилизации и переработки.

В настоящее время идет масштабный научный поиск решения обозначенных проблем, однако, несмотря на многочисленные исследования, обновление среды жизнедеятельности человека происходит быстрее, чем удается получить приемлемое решение. Непрерывно возрастают и требования к *качеству управления*. Прежде всего это связано с такими особенностями инновационного развития экономики, как:

– лавинообразное нарастание объемов информации, как общей, так и связанной с конкретной проблемой, которую необходимо решить;

– существенное сокращение времени на принятие определенного управленческого решения.

Следствием данных особенностей является рост неопределенности среды, в которой происходит взаимодействие и возрастание «цены ошибки», обусловленное увеличением риска принятия неправильного управленческого решения, ростом ущерба от его негативных последствий.

[1] **Котов П.** (2022). Подсчитаны объемы различных данных, публикуемых и потребляемых в интернете каждую минуту // *ЗДНьюс*. Эл. периодическое издание (https://3dnews.ru/1074614/).

Большим методологическим потенциалом для исследования проблем качества жизни, сопряженных с цифровизацией социально-экономического развития, обладает *экономика качества*.

Методология экономики качества позволяет максимально расширить сферу исследований качества жизни, не ограничиваясь только фундаментальными или только прикладными исследованиями (Окрепилов, Гагулина, 2023б). С точки зрения усиления преимуществ, обусловленных цифровизацией современного социально-экономического развития, это играет решающую роль. В современных условиях получение надежной научно обоснованной оценки необходимо для принятия управленческих решений на любом уровне экономики. Считаем, что применение методологии экономики качества наилучшим образом подойдет для решения обозначенных задач и позволит продвинуть моделирование качества жизни на новый уровень. Рассматривая это как основную цель данного исследования, авторы сконцентрировались на уровне регионов Российской Федерации и выбрали для анализа Санкт-Петербург и Северо-Западный федеральный округ.

В исследовании выделено решение следующих основных задач: структурирование методического описания оценки качества жизни на концептуальной основе экономики качества; сбор и систематизация данных, моделирование и оценка качества жизни в регионах России; разработка рекомендаций для создания системы принятия научно обоснованных управленческих решений.

МЕТОДОЛОГИЯ

Элементы экономики качества — метрология, стандартизация, управление качеством — содержат инновационное начало, выступая ускорителями научно-технологического прогресса, и обеспечивают целенаправленное приложение усилий в системе управления посредством внесения информации практически во все сферы деятельности. Выступая важнейшим институциональным фактором экономического роста, экономика качества регламентирует оптимизацию инновационных процессов и устанавливает единые правила взаимодействия в поле действия стандартов в масштабах всей социо-эколого-экономической системы. Экономика качества обеспечивает работу институционального механизма, который снижает общий уровень неопределенности и риска, а значит, сокращает общий уровень затрат и, следовательно, повышает конкурентоспособность на системном уровне.

Триада элементов экономики качества работает как слаженный механизм, все больше ускоряя инновационное развитие. Основываясь на объединенных достижениях науки, техники и практического опыта, стандартизация определяет основу настоящего и будущего развития, поэтому осуществляется неразрывно от прогресса и одновременно с этим поддерживает прогресс (Окрепилов, Гагулина, 2023а; Гагулина, 2023). Как процесс установления и применения правил в целях упорядочения деятельности в определенной области на пользу и при участии всех заинтересованных сторон и, в частности, для достижения всеобщей оптимальной экономии с соблюдением функциональных условий и требований техники безопасности, стандартизация вобрала и технические требования, и требования безопасности, и экономические требования. Метрология обеспечивает возможности количественной оценки (измерения) всех параметров процесса с необходимой точностью. В стандартах реализуется часть задачи, направленной на достижение требуемого качества, связанная с обоснованным установлением основных параметров технологического процесса и допусков на эти параметры. Другая часть указанной задачи — выбор средств измерения, позволяющих контролировать установленные параметры в оптимальном режиме и с необходимой точностью, — решается метрологией. Оптимальная согласованность эффективного применения стандартизации и метрологии достигается в процессе управления качеством.

Качество является стержнем, соединяющим элементы экономики качества: метрологию, стандартизацию, управление качеством — в единое научное направление. Методология экономики качества представляет собой взаимосвязанную совокупность используемых в исследовании методологических подходов метрологии, стандартизации и управления качеством, которые раскрываются в принципах, формах и методах исследования, а также основных теоретических положениях, в которых на основе данных принципов устанавливаются основные категории и фиксируются свойства определенного вида, отношения и зависимости в объекте исследования.

Среди известных принципов экономики качества: системность, планомерность (плановость), комплексность, единство измерений и сопоставимость, перспективность, оптимальность, гибкость, динамичность, эффективность, принципы всеобщего управления качеством и теории управления и т.д.

Таблица 1. Принципы, составившие основу исследования

Принцип	Содержание
Системности	Качество имеет ценность во всех аспектах человеческой жизни, а качество жизни интегрирует всю систему ценностей (Окрепилов, Гагулина, 2019)
Иерархии	В системе иерархии свойств качества в экономике самый высокий уровень занимает качество жизни, а на самом низком уровне находятся простые свойства
Измеримости и сопоставимости	Отдельные свойства качества жизни могут быть измерены, в результате измерения определяются абсолютные или относительные значения показателей, которые могут быть сопоставлены в пространстве и во времени
Планомерности	Деятельность по улучшению качества жизни и его элементов нуждается в системе непрерывного прогнозирования и планирования и рассматривается как способ реализации, ориентированный на достижение намеченных результатов субъектами экономического взаимодействия по выбранным направлениям
Перспективности	Выпуск опережающей научной документации по стандартизации, в которой устанавливаются повышенные по отношению к достигнутому уровню требования, оптимальные в будущем

Источник: разработка авторов.

Выделим основные принципы экономики качества, которые имеют определяющее значение для моделирования качества жизни (табл. 1).

Методология экономики качества послужила основой для формирования «Методики оценки качества жизни», разработанной в Институте проблем региональной экономики (далее — Методика) (Проблемы преобразования ..., 2023). Центральным элементом Методики является моделирование оценки качества жизни, ориентированное на многоуровневую систему управления качеством (далее — МСУК). Информационное сопровождение моделирования качества жизни обеспечивается Базой данных «Качество жизни»[2] с зарегистрированным правом интеллектуальной собственности. Отличительная особенность данной методики состоит во внедрении элементов экономики качества в процесс моделирования качества жизни на каждом его этапе. Методика направлена на то, чтобы иметь возможность выделить направления воздействия на социально-экономическую систему и, применяя современные методы управления, добиваться более высоких результатов социально-экономического развития, повышать качество жизни.

В общем случае под показателем качества жизни понимается количественная характеристика аспектов человеческой жизни, составляющих ее качество, рассматриваемая применительно к определенным условиям, в которых она протекает. Каждый из аспектов жизни, выделенных в ходе исследования, также имеет свою количественную характеристику (показатель), которая может быть определена и описана. Для математической интерпретации показателя качества жизни применим корреляционно-регрессионный анализ. Вид функции определяется, в том числе, исходя из поставленных целей исследования.

В соответствии с изложенными положениями алгоритм количественной оценки качества жизни в общем виде имеет определенную последовательность действий (рис. 1).

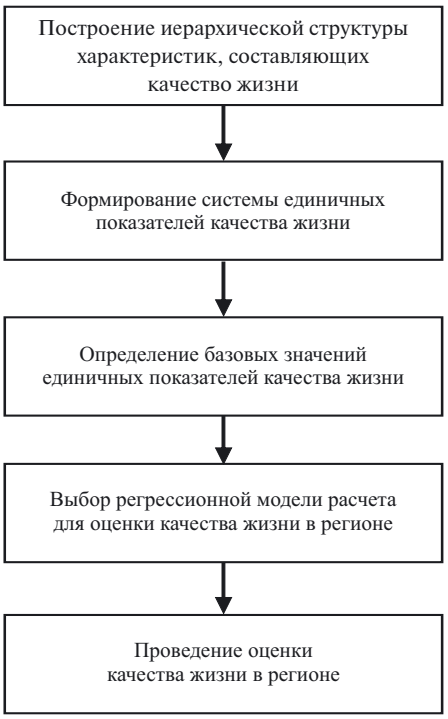

Рис. 1. Алгоритм структуры количественной оценки качества жизни

Источник: разработка авторов.

[2] База данных для построения модели качества жизни (2021). Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2021622426. Российская Федерация. В.В. Окрепилов, А.Д. Шматко, Н.Л. Гагулина; заявитель и правообладатель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт проблем региональной экономики Российской академии наук». № 20221622426; заявка № 2021622344 от 28.10.2021; опубл. 09.11.2021. 1 с.

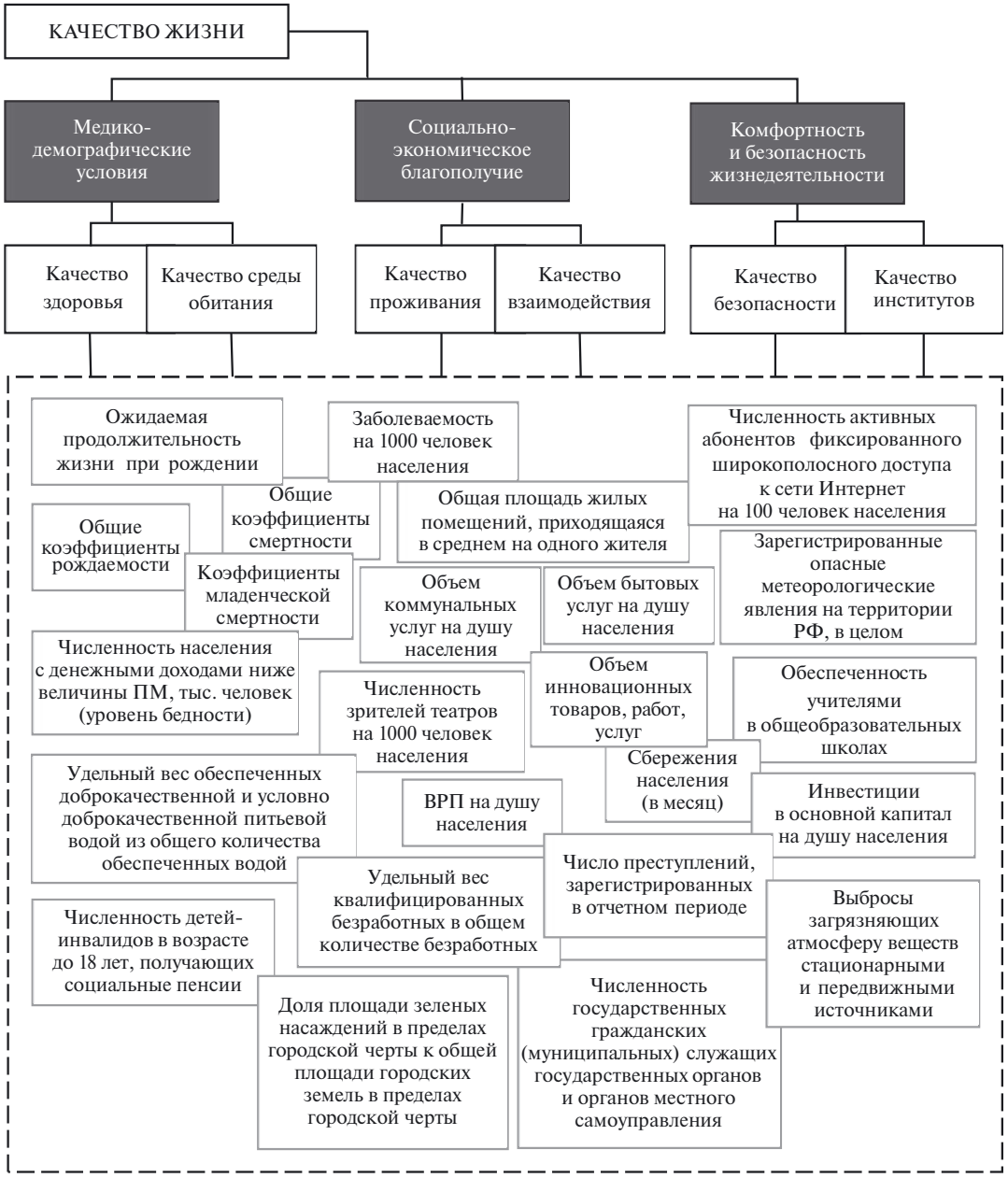

Рис. 2. Иерархия характеристик качества жизни

Источник: разработка авторов.

Структура характеристик, составляющих качество жизни, отражает медико-демографические условия региона, социально-экономическое благополучие населения, а также комфортность и безопасность среды жизнедеятельности (рис. 2). Накоплен значительный опыт исследований перечисленных характеристик как в нашей стране, так и за рубежом (Беляева, 2016; Давыдов, 2007; Егоршин, Зайцев, 2002; Зворыкина, Иванов, Ильина, 2022; Замалетдинова, 2008; Кэмпбел, 1980; Леви, 1979; Щепин, Коротких, 2009). Раскрытие каждой из указанных групп связано с оценкой их качества.

Для характеристики медико-демографических условий необходимо учитывать качество здоровья и качество среды обитания. Социально-экономическое благополучие населения связывает качество проживания, образованное сбалансированным сочетанием труда и отдыха, с качеством

взаимодействия, зависящим в первую очередь от уровня культуры и образованности, а также от системы связи и коммуникации. Комфортность и безопасность среды жизнедеятельности в регионе раскрывается через качество социально-экономической и экологической безопасности и поддерживается качеством институтов.

Система единичных показателей стала результатом нашей более чем двадцатилетней работы, направленной на исследование качества жизни (Окрепилов, 2024), и охватывает все указанные выше характеристики. Показатели качества жизни нашли применение в ходе формирования предложений авторов по «Стратегии экономического и социального развития Санкт-Петербурга до 2030 года», а затем — в принятой «Стратегии социально-экономического развития Санкт-Петербурга до 2035 года». Их описание включает как измеримые, так и расчетные показатели. Подробное описание, порядок и научные методы работы с показателями представлены нами ранее (Окрепилов, Гагулина, 2023в).

Под базовыми значениями единичных показателей в данном случае понимаются эталонные значения, достижение которых означает продвижение по пути улучшения качества жизни. Это могут быть достижимые показатели, принятые за ориентир при формировании стратегических документов регионального развития. Так, в стратегиях социально-экономического развития регионов Северо-Западного федерального округа (СЗФО) есть набор показателей, которые могли бы быть полезными (Коршунов, 2023). За базовые могут быть приняты показатели *стандартов* в определенной сфере жизнедеятельности — стандартов проживания, безопасности, качества окружающей природной среды и т.д., а также достигнутые более высокие значения тех же показателей качества в других регионах со схожими условиями жизнедеятельности.

Единичные показатели проходят все необходимые этапы анализа дескриптивной статистики, проверку однородности данных и приведение их к тому состоянию, которое наилучшим образом удовлетворяет целям проводимого исследования качества жизни. Затем проводится трансформация данных показателей. Как показал проведенный авторами численный эксперимент, наилучшим образом для этого подходит стандартизация. Преимущество данного метода состоит в возможности адекватно учесть масштаб различий между показателями — по разбросу их максимальных и минимальных значений. К тому же это повышает содержательный смысл показателей. Процедура стандартизации единичных показателей качества жизни описана нами ранее более подробно в процессе апробации Методики (Окрепилов, Гагулина, 2021).

Моделирование качества жизни зависит от цели и задач исследования и для его реализации может быть использована:

1) линейная модель базовой оценки качества жизни;

2) модель регрессии, нелинейной по объясняющим переменным, разработанная на основе метода полиномиальной аппроксимации.

Линейная модель базовой оценки качества жизни в основе содержит формулу

$$y = \sum_{i=1}^{n} x_i, \tag{1}$$

где y — показатель базовой оценки качества жизни; x_i — стандартизированные значения единичных показателей; $i = 1, ..., n$ — число показателей.

Показатель комплексной оценки качества жизни, заложенный в основу модели регрессии, нелинейной по объясняющим переменным, рассчитывается на основе формулы

$$y = \sum_{j=0}^{n} b_j x^{n-j}, \tag{2}$$

где y — показатель комплексной оценки качества жизни; x^{n-j} — переменная, соответствующая одной из характеристик показателя качества жизни; b_j — коэффициент полинома при $n \in \{0, 1, ...\}$ и $\{b_0,..., b_n\} \subset \mathbf{B}$.

Применение полученных значений показателя оценки качества жизни в целях регионального управления требует учета специфики конкретного субъекта Российской Федерации. Чтобы добиться выполнения этого условия, авторы ввели коэффициент густонаселенности. Порядок расчета данного коэффициента для федеральных округов в масштабе страны приведен нами в (Окрепилов, Гагулина, 2023в).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Моделирование качества жизни выполнено для регионов, составляющих Северо-Западный федеральный округ. Период исследования ограничен 2010–2022 гг., что обусловлено объемом исходных данных, доступных на момент проведения расчетов. Все исходные данные прошли необходимые этапы анализа дескриптивной статистики, проверку однородности и приведены к тому состоянию, которое наилучшим образом удовлетворяет целям, поставленным в данном исследовании.

В моделях использованы значения коэффициента густонаселенности, рассчитанные авторами для регионов Северо-Западного федерального округа (табл. 2).

Линейная модель послужила основой для проведения базовой оценки качества жизни. Результаты исследования показывают дифференциацию качества жизни в регионах, и это наиболее заметно, если все оценки свести в одной плоскости координат (рис. 3).

Санкт-Петербург имеет богатое культурно-историческое наследие, а современное состояние экономики города характеризуется высокими темпами инновационного развития, что находит отражение в национальных и мировых рейтингах качества жизни, где город занимает лидирующие места (Лебедев В., Лебедев К., 2019; Тарасова, Седипкова, Солдатенко, 2023). Полученные авторами оценки качества жизни хорошо отражают ведущее место, которое занимает Санкт-Петербург в региональной экономике Северо-Запада и в национальной экономике России. На графике

Таблица 2. Коэффициент густонаселенности регионов Северо-Западного федерального округа, 2010–2022 гг.

Регион	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Республика Карелия	0,047	0,047	0,046	0,046	0,046	0,045	0,045	0,045	0,044	0,044	0,044	0,043	0,038
Республика Коми	0,066	0,065	0,064	0,063	0,062	0,062	0,061	0,060	0,059	0,059	0,058	0,058	0,052
Архангельская область	0,090	0,089	0,088	0,086	0,085	0,085	0,084	0,083	0,082	0,081	0,081	0,080	0,073
Вологодская область	0,088	0,088	0,087	0,086	0,086	0,086	0,085	0,084	0,084	0,083	0,083	0,082	0,081
Калининградская область	0,069	0,069	0,070	0,070	0,070	0,070	0,071	0,071	0,072	0,072	0,073	0,074	0,074
Ленинградская область	0,126	0,127	0,128	0,128	0,128	0,128	0,129	0,130	0,132	0,134	0,136	0,138	0,146
Мурманская область	0,058	0,058	0,057	0,056	0,055	0,055	0,055	0,054	0,054	0,053	0,053	0,052	0,047
Новгородская область	0,046	0,046	0,046	0,045	0,045	0,044	0,044	0,043	0,043	0,043	0,042	0,042	0,042
Псковская область	0,049	0,049	0,048	0,048	0,047	0,047	0,046	0,046	0,045	0,045	0,044	0,044	0,042
г. Санкт-Петербург	0,360	0,363	0,367	0,372	0,375	0,377	0,380	0,384	0,385	0,386	0,386	0,387	0,404

Источник: рассчитано авторами.

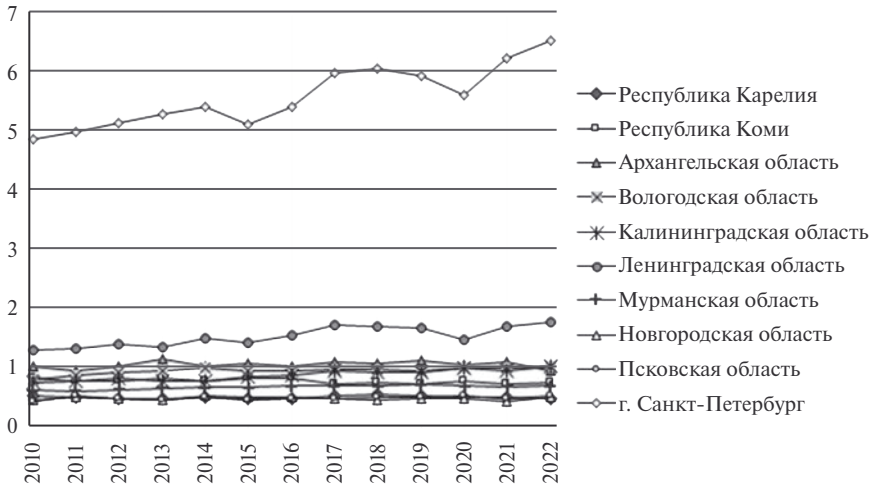

Рис. 3. Расчетные значения показателя качества жизни для регионов Северо-Западного федерального округа, 2010–2022 гг.

Источник: разработка авторов.

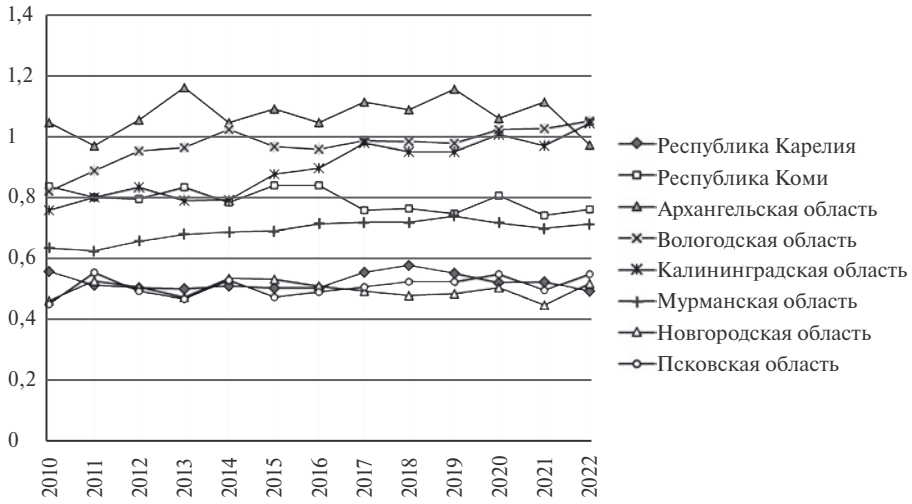

Рис. 4. Расчетные значения показателя качества жизни для регионов СЗФО (без Санкт-Петербурга и Ленинградской области), 2010–2022 гг.

Источник: разработка авторов.

Таблица 3. Группировка регионов СЗФО по показателю качества жизни, рассчитанному для периода 2010–2022 гг.

Группа регионов СЗФО	Диапазон изменения значений показателя
Республика Карелия, Новгородская область, Псковская область	0,446–0,575
Республика Коми, Калининградская область, Мурманская область	0,622–1,041
Архангельская область, Вологодская область	0,817–1,160

Источник: рассчитано авторами.

отчетливо прослеживается положительный тренд в повышении качества жизни Санкт-Петербурга, однако в рассматриваемом периоде имеют место два явно выраженных спада: в 2015 и в 2020 г.

В 2015 и 2020 г. мы наблюдаем отрицательное влияние на качество жизни горожан сильнейших внешних шоков. Так, в 2015 г. наблюдалось падение доли инвестиций в основной капитал в валовом региональном продукте (ВРП), связанное со снижением мировых цен на сырьевые товары в 2014–2016 гг. Почти столь же масштабное влияние на качество жизни оказали последствия пандемии в 2020 г. Несмотря на указанные обстоятельства, в остальные годы рассматриваемого периода в Санкт-Петербурге наблюдались положительные темпы прироста качества жизни, что обусловило положительный тренд в целом.

Ленинградская область занимает промежуточное положение между Санкт-Петербургом и остальными регионами СЗФО. Можно предположить, что большую роль в этом играет влияние агломерационных эффектов.

Санкт-Петербургская агломерация является одной из крупнейших агломераций России со среднегодовыми темпами прироста численности населения 0,4%. Как и Санкт-Петербург, Ленинградская область также испытала заметное влияние упомянутых выше внешних шоков 2015 и 2020 г. Положительная в целом тенденция качества жизни очень нестабильна, поскольку есть небольшое замедление темпов прироста этого показателя в 2013, 2018 и 2019 г.

Диапазон изменения показателей качества жизни регионов СЗФО без Санкт-Петербурга и Ленинградской области позволяет рассматривать их в разрезе небольших групп, каждая из которых имеет особенности с яркой региональной окраской (рис. 4, табл. 3). Самая маленькая амплитуда колебаний показателя наблюдается в Республике Карелия и регионах, входящих с ней в общую группу. Это свидетельствует о стабильном развитии процессов, влияющих на качество жизни в данных регионах.

В Калининградской области амплитуда колебаний показателя выше, как и во всех регионах второй группы, и в целом имеет место тенденция роста качества жизни. Начиная с 2016 г., противоположная тенденция прослеживается в Республике Коми. Как полагают эксперты, это может быть связано с оттоком населения из региона по причине неразвитой транспортной инфраструктуры, плохо обустроенной городской среды, малым числом высокотехнологичных перерабатывающих производств, диспропорциями в доходах нефтегазовых районов и остальных[3]. Помимо этого, все сказанное в значительной мере связано с суровым климатом Республики Коми: короткое и — в северных районах — холодное лето, многоснежная, продолжительная и морозная зима.

Наиболее высокие значения показателей качества жизни для рассматриваемых условий и периода исследования приходятся на третью группу, которую образуют Архангельская и Вологодская области. Наибольшее значение показателя качества жизни имело место в 2013 г. в Архангельской области. В числе событий, которые существенно повлияли здесь на качество жизни: замораживание тарифов на природный газ, снижение портовых сборов, федеральное финансирование строительства жилья в Мирном и дороги Архангельск–Северодвинск[4]. Регион также получил миллиард рублей из федерального бюджета по программе развития российских космодромов. На протяжении всего периода наблюдается колебание темпов прироста показателя, а в 2022 г. — самое большое падение за весь период, которое большинство экспертов связывает с проблемами экологии в регионе.

Высокие значения показателя качества жизни и в целом положительный тренд наблюдаются в Вологодской области. На территории области реализуется более 20 государственных программ в рамках разделов ««Формирование пространства для жизни», «Формирование пространства для развития» и «Формирование пространства эффективности». Выполнение мероприятий по данным программам позволяет, в том числе, строить, реконструировать, ремонтировать и открывать объекты здравоохранения, образования, спорта, культуры, дорожной и коммунальной инфраструктуры, закупать необходимое для работы оборудование, привлекать кадры в экономику и социальную сферу[5].

Сравнительный анализ ситуации в рассматриваемых регионах СЗФО на начало и на конец периода (рис. 5) показывает, что в большинстве из них показатель качества жизни вырос. В наиболее северных регионах округа: Республике Карелия, Республике Коми и в Архангельской области — максимальное значение показателя, превышающее начальное значение, наблюдается в середине периода.

Рис. 5. Сравнительные значения показателя качества жизни для регионов СЗФО (без Санкт-Петербурга и Ленинградской области)

Источник: рассчитано авторами.

Качество жизни в Санкт-Петербурге и Ленинградской области, по нашим расчетам, возросло в 2022 г. по сравнению с 2010 г. в среднем в 1,35 раза. На наш взгляд, одно из объяснений такого быстрого роста состоит в наращивании агломерационного потенциала ресурсов территорий–участниц интеграционного объединения, совместное взаимовыгодное использование которых способно обеспечить интеграционный эффект, выражающийся в дополнительных выгодах и преимуществах для поселений, входящих в агломерационное объединение.

Повышение качества жизни означает рост благосостояния населения, проживающего в регионе, и потому является стратегически оправданной целью регионального развития. Испытанным инструментом, который имеет большую практику применения в области решения региональных проблем экономики качества и качества жизни — в частности, является многоуровневая система управления качеством (далее — МСУК).

[3] Коми обогнала соседей в рейтинге по качеству жизни. БНК СМИ: «Информационное агентство “Север-Медиа”», 2024 (https://www.bnkomi.ru/data/news/168474/).

[4] Губернатор Архангельской области назвал главные достижения 2013 года // *АиФ Архангельск* (https://arh.aif.ru/money/1082390).

[5] Социально-экономическое положение Вологодской области в январе–мае 2022 года. Доклад. Вологда: Вологдастат. 2022. С. 69.

Таблица 4. Характеристики, составляющие качество жизни Санкт-Петербурга, 2010–2022 гг.

Переменная	Коэффициент полинома					
	b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5
Медико-демографические условия	0,70	−21,05	253,00	−1510,3	4481,6	−5287,1
Социально-экономическое благополучие населения	0,53	−1,12				
Комфортность и безопасность среды жизнедеятельности	0,38	−0,49				

Источник: рассчитано авторами.

Таблица 5. Характеристики, составляющие качество жизни Ленинградской области, 2010–2022 гг.

Переменная	Коэффициент полинома	
	b_0	b_1
Медико-демографические условия	0,43	−0,09
Социально-экономическое благополучие населения	0,25	0,15
Комфортность и безопасность среды жизнедеятельности	0,32	−0,06

Источник: рассчитано авторами.

Одна из задач, подход к решению которой выработан на основе применения МСУК, состоит в согласовании целей основных направлений регионального развития и интегральных характеристик качества жизни. Провести детализацию отдельных характеристик качества жизни позволяет аппроксимация функции показателя качества жизни.

Основу расчета составляет модель комплексной оценки качества жизни (см. (2)), в которой значения полинома в точке из заданной области определения ($b \in \mathbf{B}$) представляют собой соответствующие показатели качества жизни. Такой подход представляется авторам целесообразным в связи с необходимостью сжатия больших массивов числовых данных путем замены дискретного представления имеющихся функциональных зависимостей аналитическими выражениями с небольшим числом коэффициентов.

Опираясь на сформированную нами иерархию характеристик качества жизни, рассмотрим медико-демографические условия региона, социально-экономическое благополучие населения, а также комфортность и безопасность среды жизнедеятельности, составляющие качество жизни Санкт-Петербурга (табл. 4) и Ленинградской области (табл. 5).

Проведенные расчеты показывают, что вклад выделенных характеристик в показатель качества жизни населения Санкт-Петербурга примерно одинаков (рис. 6). На первом месте по вкладу находится социально-экономическое благополучие, и это — не случайно. Повышение качества жизни на протяжении многих лет является неизменным ориентиром для правительства и Губернатора города и обозначено в генеральной цели «Стратегии социально-экономического развития Санкт-Петербурга на период до 2035 года».

Рис. 6. Характеристики, составляющие показатель качества жизни Санкт-Петербурга

Источник: рассчитано авторами.

Рис. 7. Динамика показателя качества жизни населения Санкт-Петербурга

Источник: рассчитано авторами.

Рис. 8. Характеристики, составляющие показатель качества жизни населения Ленинградской области

Источник: рассчитано авторами.

В 2022 г. Санкт-Петербург занимал четвертое место в стране по численности населения — после Москвы, Московской области и Краснодарского края (Санкт-Петербург ..., 2023). С 2012 по 2019 г. город показывал положительную динамику прироста численности населения, и только к концу периода — в 2022 г. — общий прирост стал отрицательным, а численность уменьшилась на 7,8 тыс. человек. Общая площадь жилых помещений, приходящаяся на одного жителя, в 2022 г. достигла максимального значения и составила 27,3 м^2. По сравнению с 2010 г. по обороту розничной торговли город переместился с восьмого на четвертое место в России. Сохранился довольно высокий уровень инвестиций в основной капитал. В 2022 г. денежные доходы населения в абсолютном выражении возросли почти в два раза по сравнению с 2010 г. и составили 4269,7 млрд руб.

На протяжении всего рассматриваемого периода возрастала комфортность и безопасность среды жизнедеятельности (рис. 7). Здесь сказалось общее улучшение экологической обстановки в городе. Также по сравнению с 2010 г. сократился общий уровень преступности, повысилось качество институтов в регионе.

На изменение медико-демографических условий наиболее существенно повлияли последствия пандемии коронавируса, о чем свидетельствует минимум значений анализируемой характеристики в 2020 г. К концу периода ситуация улучшилась, но допандемический порог в 2022 г. не был преодолен, что прослеживается на рис. 6 и 7.

Картина, которую мы наблюдаем в Ленинградской области, отражает рост всех составляющих качества жизни в 2022 г. по сравнению с 2010 г. (рис. 8).

В Ленинградской области медико-демографические условия, в которых отражено качество здоровья населения и качество среды обитания, имеют приоритетное значение по сравнению с двумя другими характеристиками. Здесь сказывается целенаправленная работа губернатора и правительства Ленинградской области, которое в качестве жизни видит «новые школы, детские сады, спортивные площадки, благоустройство»[6].

Комфортность и безопасность среды жизнедеятельности в Ленинградской области вносят практически такой же вклад в формирование показателя качества жизни, как и медико-демографические условия. На территории области реализуются программы, нацеленные на ее комплексное развитие. Курс взят на появление удобных, красивых, обустроенных населенных пунктов во всех районах Ленинградской области. В перспективе это окажет свое положительное влияние на характеристики социально-экономического благополучия, будет способствовать повышению уровня развития инфраструктуры и улучшит качество проживания.

Расчеты, проведенные на примере Санкт-Петербурга и Ленинградской области, позволили выделить влияние на качество жизни отдельных составляющих, из которых оно складывается, оценить вклад каждой из них в выбранном периоде исследования. Полученные результаты являются значимыми при определении вектора приложения усилий в направлении, выбранном для проведения политики регионального развития.

Большую пользу здесь может оказать совместное применение методологии экономики качества и обширной группы методов математического моделирования. Используя данную комбинацию, мы совершаем большой шаг в получении точных научно обоснованных решений.

В век доминирования информационных ресурсов и цифровизации главная отличительная особенность технологии проведения научных исследований состоит в возможности получения алгоритмических решений с помощью методов математического моделирования. Это широкий спектр методов, результатом применения которых становится набор данных, о которых с большой вероятностью можно утверждать, что они отражают поведение прототипа в аналогичных случаях. Так, в промышленности новые технологии моделирования позволяют производителям внедрять цифровые копии в своих продуктах и процессах (Тушавин, Фролова, Чабаненко, 2023). Используя результаты моделирования, можно обосновать набор управленческих решений для прототипа. Это особенно важно для объектов исследования и ситуаций, когда проведение натурных экспериментов объективно затруднено. Изменение качества жизни людей, вызванное происходящими в экономике и окружающей среде процессами, составляет обширное поле для обоснования и принятия алгоритмических решений в области стандартизации управления качеством жизни.

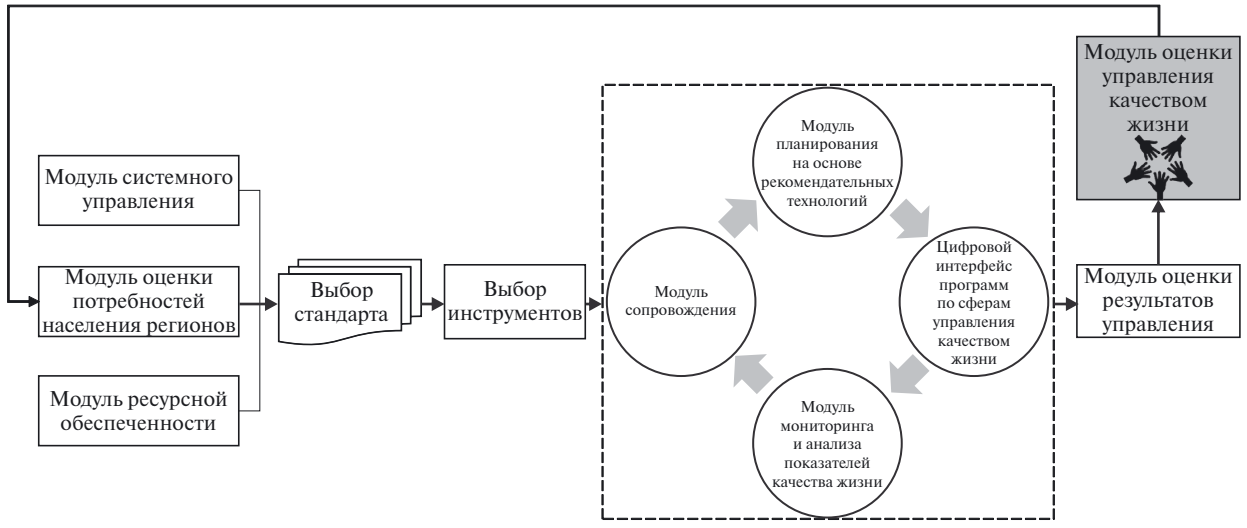

Рис. 9. Многоуровневая система управления качеством жизни населения региона в новом формате

Источник: разработка авторов.

[6] Ленобласть теперь шестая в России по качеству жизни // *47 новостей из Ленинградской области,* 2024.12.02. (https://47news.ru/articles/245474/).

Основываясь на нашем опыте участия в разработке научных решений сложных экономических и социальных задач с помощью суперкомпьютеров (Макаров, Окрепилов, Бахтизин, 2023), можно *предложить рекомендации*, которые будут способствовать созданию системы принятия научно обоснованных управленческих решений, направленных на повышение качества жизни населения региона (рис. 9).

Новый формат представления многоуровневой системы управления качеством предусматривает применение ультрасовременных систем поддержки принятия решений (далее — СППР), использующих нейросети и машинное обучение, большие данные и сквозную аналитику, озера и хранилища данных, интернет вещей, облачные вычисления, цифровые двойники и другие технологии модель-ориентированных СППР.

В данном случае под СППР мы понимаем разработанное и встроенное в многоуровневую систему управления качеством программное обеспечение, которое используется для принятия решений в ситуациях со множеством переменных. Ключевая задача, на решение которой нацелены СППР, — анализ данных в сложных условиях и подготовка рекомендаций с помощью искусственного интеллекта. На наш взгляд, создание нового формата МСУК и его дальнейшее целенаправленное применение приблизит российскую экономику в целом и экономику регионов к тому состоянию, на которое она сегодня нацелена.

По мнению академика А.Г. Аганбегяна (Аганбегян, 2023), чтобы добиться улучшения качества жизни населения, сегодня необходимо перевести нашу социально-экономическую систему в такое положение, чтобы в ней было два двигателя роста — рыночный и стратегический пятилетний план. Добиться таких результатов можно с применением нового, цифровизированного формата принятия управленческих решений, который многократно повысит их эффективность за счет расширения возможностей анализа сложных данных без четких взаимосвязей, в том числе для прогнозирования, оптимизации процессов и т.д.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение методологии экономики качества и разработанной нами методики оценки качества жизни доказало необходимость продолжения и развития дальнейших исследований, связанных с поиском возможных направлений воздействия на социально-экономическую систему, способствующих повышению качества жизни населения.

Эконометрические расчеты, проведенные нами на примере регионов Северо-Западного федерального округа, позволили составить общую картину об изменении качества жизни на территории макрорегиона, выделить и объяснить характерные региональные особенности.

Экономика всех регионов СЗФО отреагировала на кризисные явления 2015 г. и пандемический шок 2019 г., что отразилось на качестве жизни населения и подтверждено полученными результатами.

Моделирование показателя качества жизни на временном интервале 2010–2022 гг. позволяет в СЗФО выделить пять групп регионов на основе их дифференциации по диапазонам изменения значений показателя в порядке их убывания:

1 — Санкт-Петербург;

2 — Ленинградская область;

3 — Архангельская область и Вологодская область;

4 — Республика Коми, Мурманская область, Калининградская область;

5 — Республика Карелия, Псковская область, Новгородская область.

На наш взгляд, более тщательного рассмотрения и анализа в перспективе заслуживает влияние агломерационных процессов, которое сказывается на качестве жизни населения Санкт-Петербурга и Ленинградской области.

Детальный анализ основных характеристик качества жизни Санкт-Петербурга и Ленинградской области, проведенный на основе модели комплексной оценки качества жизни, позволил доказать адекватность используемой методики поставленным задачам и выявить решающее влияние медико-географических условий на качество жизни в период пандемии. Социально-экономическое благополучие — как характеристика качества жизни — дало отклик, хотя и не такой сильный, на кризис 2015 г. Комфортность и безопасность жизнедеятельности на фоне усиления институтов и усилий, предпринимаемых

на уровне регионального и государственного управления, непрерывно подтягивает вверх качество жизни населения.

Рассматривая дальнейшие перспективы моделирования качества жизни, авторы предлагают прибегнуть к совместному применению методологии экономики качества и обширной группы методов математического моделирования для получения надежных научно обоснованных управленческих решений с применением разработанного и встроенного в многоуровневую систему управления качеством программного обеспечения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

Аганбегян А.Г. (2023). О значимости современного моделирования в решении назревших экономических и социальных задач // *Экономика Северо-Запада: проблемы и перспективы развития*. № 2 (73). С. 4–7. [**Aganbegyan A.G.** (2023). On the importance of modern modeling in solving urgent economic and social problems. *Economy of the North-West: Problems and Prospects of Development*, 2 (73), 4–7 (in Russian).]

Беляева Л.А. (2016). Качество жизни и социальный капитал в федеральных округах России. Методология и методика анализа, эмпирическая верификация. В сб.: «*Проблемы социокультурных исследований и проектирования модернизации в регионах и муниципальных образованиях России*». Материалы XII Всероссийской научно-практической конференции по программе «Проблемы социокультурной эволюции России и ее регионов». Самара–Тольятти, 26–29 сентября 2016 г. Российский гуманитарный научный фонд. Самара–Тольятти: Самарский университет. С. 17–25. EDN: ZTKNDJ. [**Belyaeva L.A.** (2016). Quality of life and social capital in Russian federal districts. Methodology and methods of analysis, empirical verification. In: N.I. Lapin, L.A. Belyaeva (eds.). *Problems of sociocultural research and modernization design in the regions and municipalities of Russia*. 12th Conference on problems of socio-cultural evolution of Russia and its regions. Samara-Tolyatti, September 26–29, 2016, 17–25. EDN: ZTKNDJ (in Russian).]

Гагулина Н.Л. (2023). Теоретические аспекты вклада стандартизации в процессы роста и развития // *Журнал правовых и экономических исследований*. № 3. С. 258–263. DOI: 10.26163/GIEF.2023.43.15.037. EDN: QWLXLF [**Gagulina N.L.** (2023). Theoretical aspects of standardisation impact on growth and development. *Journal of Legal and Economic Studies*, 3, 258–263. DOI: 10.26163/GIEF.2023.43.15.037 EDN: QWLXLF (in Russian).]

Горбашко Е.А. (2023). Цифровые технологии в развитии менеджмента качества // Современный менеджмент: проблемы и перспективы. В сб.: «*Сборник статей по итогам XVIII национальной научно-практической конференции с международным участием*». Санкт-Петербург, 28–29 сентября 2023 г. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный экономический университет. С. 8–12. EDN: AJNICS. [**Gorbashko E.A.** (2023). Digital technologies in quality management development. Modern management: Problems and prospects. In: *18th National Scientific and Practical conference with international engagement "Modern Management: problems and prospects*", 8–12. St. Petersburg State University of Economics. EDN: AJNICS (in Russian).]

Давыдов А.А. (2007). *Системная социология: введение в анализ динамики социума*. М.: URSS. 245 с. [**Davydov A.A.** (2007). *Systemic sociology: Introduction to the analysis of the dynamics of society*. Moscow: URSS. 245p. (in Russian).]

Егоршин А.П., Зайцев А.К. (2002). *Качество жизни населения региона*. Н. Новгород: НИМБ. 121 с. [**Egorshin A.P., Zaitsev A.K.** (2002). *Quality of life of region's population*. N. Novgorod: NIMB. 121 p. (in Russian).]

Замалетдинова Л.Р. (2008). Качество жизни: понятие, структура, значение теории в решении экологической проблемы // *Вестник Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского*. Серия: Социальные науки. № 2 (10)/11. [**Zamaletdinova L.R.** (2008). Quality of life: concept, structure, significance of theory in solving an environmental problem. *Vestnik of Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod*. № 2 (10)/11 (in Russian).]

Зворыкина Т.И., Иванов А.Д., Ильина И.Н. (2022). Использование региональных возможностей для повышения качества, безопасности и конкурентоспособности продукции и услуг // *Экономика и управление: проблемы, решения*. Т. 3. № 12 (132). С. 57–63. DOI: 10.36871/ek.up.p.r.2022.12.03.008 EDN: RFJSQL. [**Zvorykina T.I., Ivanov A.D., Ilyina I.N.** (2023). Using regional opportunities to improve the quality, safety and competitiveness of products and services. *Economics, and Management: Problems, Solutions*, 3, 12, 57–63. DOI: 10.36871/ek.up.p.r.2022.12.03.008 (in Russian).]

Коршунов И.В. (2023). Проблематика устойчивого развития в стратегиях регионов Северо-Западного федерального округа // *Экономика Северо-Запада: проблемы и перспективы развития*. № 1 (72). С. 8–17. DOI: 10.52897/2411-4588-2023-1-8-17 [**Korshunov I.V.** (2023). The problems of sustainable development in regional strategies of the Northwest Federal District. *Economy of the North-West: Problems and Prospects of Development*, 1 (72), 8–17. DOI: 10.52897/2411-4588-2023-1-8-17 (in Russian).]

Кузнецов Н.В. (2020). Всеобщая цифровизация и социальные риски // *Общество: политика, экономика, право*. № 10 (87). С. 42–47. DOI: 10.24158/pep.2020.10.6 EDN: FEJIIY. [**Kuznetsov N.V.** (2020). A general digitalization and social risks. *Society: Politics, Economics, Law*, 10 (87), 42–47. DOI: 10.24158/pep.2020.10.6 EDN: FEJIIY (in Russian).]

Кэмпбелл А. (1980). *Модели экспериментов в социальной психологии и прикладных исследованиях*. Пер. с англ. М.И. Бобнева (сост. и общ. ред.). М.: Прогресс. 392 с. [**Campbell D.T.** (1980). *Models of experiments in social psychology and*

applied researches. Transl. from English. M.I. Bobneva (gen. ed). Moscow: Progress. 392 p. (in Russian). Original published in 1971.]

Лебедев В.В., Лебедев К.В. (2019). О рейтинге субъектов Российской Федерации по качеству жизни // *ЭТАП: экономическая теория, анализ, практика*. № 6. С. 66–77. DOI: 10.24411/2071-6435-2019-10123 EDN: TVIDQC. [**Lebedev V.V., Lebedev K.V.** (2019). Russian regions' rating in terms of quality of life. *ETAP: Economic Theory, Analysis, and Practice*, 6, 66–77. DOI 10.24411/2071-6435-2019-10123 EDN: TVIDQC (in Russian).]

Леви П. (1979). *Народонаселение, окружающая среда и качество жизни [к Всемирной конференции ООН по народонаселению]*. Пер. с англ. М.А. Смирнова. М.: Экономика. 144 с. [**Levi L.** (1979). *Population, environment and quality of life*. Transl. from English by M.A. Smirnova. Moscow: Ekonomika. 144 pp. (in Russian). Original published in 1975.]

Макаров В.Л., Окрепилов В.В., Бахтизин А.Р. (2023). *Научные решения сложных экономических и социальных задач с помощью суперкомпьютеров*. М.: ЛЕНАНД. 416 с. ISBN: 978-5-9710-6284-4. [**Makarov V.L., Okrepilov V.V., Bakhtizin A.R.** (2023). *Scientific decisions of the complex economic and social problems using the supercomputers*. Moscow: LENAND. 416 p. ISBN: 978-5-9710-6284-4 (in Russian).]

Окрепилов В.В. (2024). *Развитие науки о качестве. Избранные труды*. СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС. 1256 с. [**Okrepilov V.V.** (2024). *Development of science on quality. Special works*. Saint Petersburg: Polytechnic University Press. 1256 p. (in Russian).]

Окрепилов В.В., Гагулина Н.Л. (2019). Развитие оценки качества жизни населения региона // *Журнал экономической теории*. Т. 16. № 3. С. 318–330. [**Okrepilov V.V., Gagulina N.L.** (2019). Development of estimating quality of life of regional population. *Russian Journal of Economic Theory*, 16 (3), 318–330 (in Russian).]

Окрепилов В.В., Гагулина Н.Л. (2021). О стратегическом обеспечении качества жизни в инновационной экономике Санкт-Петербурга // *Экономика и управление*. № 27 (11). С. 751–765. DOI: 10.35854/1998-1627-2021-11-890-899. [**Okrepilov V.V., Gagulina N.L.** (2021). On Ensuring the Quality of Life in the Innovative Economy of St. Petersburg from the Strategic Perspective. *Economics and Management*, 27 (11), 751–765. DOI: 10.35854/1998-1627-2021-11-751-765 (in Russian).]

Окрепилов В.В., Гагулина Н.Л. (2023а). О роли стандартизации в поиске новых подходов к решению проблем экономики знаний // *Экономика Северо-Запада: проблемы и перспективы развития*. № 1 (72). С. 40–46. DOI: 10.52897/2411-4588-2023-1-40-46 [**Okrepilov V.V., Gagulina N.L.** (2023a). On the role of standardization in the search for new approaches to solving the problems of the knowledge economy. *Economy of the North-West: Problems and Prospects of Development*, 1 (72), 40–46. DOI: 10.52897/2411-4588-2023-1-40-46 (in Russian).]

Окрепилов В.В., Гагулина Н.Л. (2023б). Развитие исследований качества жизни населения Северо-Запада на основе применения методологии экономики качества // *Экономика Северо-Запада: проблемы и перспективы развития*. № 2 (73). С. 81–89. DOI: 10.52897/2411-4588-2023-2-81-89 [**Okrepilov V.V., Gagulina N.L.** (2023b). Research development of the North-Western federal district population's quality of life based on the application of the quality economics methodology. *Economy of the North-West: Problems and Prospects of Development*, 2 (73), 81–89. DOI: 10.52897/2411-4588-2023-2-81-89 (in Russian).]

Окрепилов В.В., Гагулина Н.Л. (2023в). Моделирование и оценка качества жизни в макрорегионах России на основе методологии экономики качества // *Пространственная экономика*. Т. 19. № 4. С. 170–186. DOI: 10.14530/se.2023.4.170-186 [**Okrepilov V.V., Gagulina N.L.** (2023c). Modeling and assessment of the quality of life in macro-regions of Russia based on the methodology of quality economics. *Spatial Economics*, 19, 4, 132–156. DOI: 10.14530/se.2023.4.170-186 (in Russian).]

Проблемы преобразования и регулирования региональных социально-экономических систем (2009). *В сб. научн. трудов РАН*. Вып. 51. Под ред. С.В. Кузнецова. М.: ИПРЭ РАН, СПб.: Изд-во СПбГЭУ. С. 110–118. ISBN: 978-5-8088-0458-6 [**Kuznetsov S.V.** (ed.) (2009). Transformation and regulation of regional socio-economic systems. *Scientific papers of RAS*. Issue 51. Moscow: IRES RAS, Saint Petersburg: UNECON, (pp. 110–118). ISBN: 978-5-8088-0458-6 (in Russian).]

Салимова Т.А. (2023). Эволюция концепции Качества 4.0 // *Стандарты и качество*. № 8. С. 98–99. EDN: CJIBPY. [**Salimova T.A.** (2023). Quality 4.0: evolution. *Standards and Quality*, *8*, 98–99. EDN: CJIBPY (in Russian).]

Санкт-Петербург в 2022 году (2023). *Санкт-Петербург в 2022 году: статистический ежегодник*. Управление Федеральной службы государственной статистики по г. Санкт-Петербургу и Ленинградской области (Петростат). Ред. колл.: С.М. Горохова и др. Офиц. изд. Санкт-Петербург: Петростат. 246 с. [*Saint Petersburg bureau of statistics, 2022* (2023). Saint Petersburg: Petrostat. 246 p. (in Russian).]

Тарасова О.В., Седипкова С.В., Солдатенко Е.В. (2023). Результаты и эффективность работы государственного сектора в регионах Северо-Западного федерального округа // *Экономика Северо-Запада: проблемы и перспективы развития*. № 3 (74). С. 56–69. DOI: 10.52897/2411-4588-2023-3-56-69 [**Tarasova O.V., Sedipkova S.V., Soldatenko E.V.** (2023). Public sector performance and efficiency in the regions of the North-Western federal district. *Economy of the North-West: Problems and Prospects of Development*, 3 (74), 56–69. DOI: 10.52897/2411-4588-2023-3-56-69 (in Russian).]

Татаринов К.А. (2023). Экологические последствия цифровизации современного общества // *Геополитика и экогеодинамика регионов*. Т. 9 (19). Вып. 4. С. 25–36. [**Tatarinov K.A.** (2023). Environmental consequences of digitalization of modern society. *Geopolitics and Ecogeodynamics of Regions*, 9 (19), 4, 25–36 (in Russian).]

Тушавин В.А., Фролова Е.А., Чабаненко А.В. (2023). Квалиметрическая оценка качества цифровых двойников аддитивного производства // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. Т. 25. № 6 (116). С. 84–91. DOI: 10.37313/1990-5378-2023-25-6-84-91 EDN: JBNFAC. [**Tushavin V.A., Frolova E.A., Chabanenko A.V.** (2023). Qualimetric quality assessment of additive manufacturing digital twins. *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 25, 6 (116), 84–91. DOI: 10.37313/1990-5378-2023-25-6-84-91 EDN: JBNFAC (in Russian).]

Хачатурян А.А. (2021). Безработица и другие социальные угрозы цифровой экономики // *Проблемы прогнозирования*. № 3. С. 103–115. DOI: 10.47711/0868-6351-186-103-115 [**Khachaturyan A.A.** (2021). Unemployment and other social threats of the digital economy. *Studies on Russian Economic Development*, 32, 3, 297–304. DOI: 10.47711/0868-6351-186-103-115 (in Russian).]

Щепин О.П., Коротких Р.В. (2009). *Здоровье населения — основа развития здравоохранения*. М.: Национальный НИИ общественного здоровья РАМН. 375 с. [**Shchepin O.P., Korotkikh R.V.** (2009*). Population health is the basis for the healthcare development*. Moscow: National Research Institute of Population Health of the Russian Academy of Medical Sciences. 375 p. (in Russian).]

Matsudaira J.D. (2014). Government regulation and the quality of healthcare. *Journal of Human Resources*, 49 (1), 32–72. DOI: 10.3368/jhr.49.1.32

McInnis N., Michelmore K., Pilkauskas N. (2024). The intergenerational transmission of poverty and public assistance. *Journal of Human Resources*, 0422–12241R2. DOI: 10.3368/jhr.0422-12241R2

Xu X., Zhao Y., Zhou J., Xia S. (2022). Quality-of-life evaluation among the oldest-old in china under the "active aging framework". *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19, 4572. DOI: 10.3390/ijerph19084572

Quality of life modeling in St. Petersburg and the Northwest regions

© 2024 V.V. Okrepilov, N.L. Gagulina

V.V. Okrepilov,
Academician of the RAS, Institute for Regional Economic Studies Russian Academy of Sciences, St.-Petersburg, Russia; e-mail: okrepilov@test-spb.ru

N.L. Gagulina,
Institute for Regional Economic Studies Russian Academy of Sciences, St.-Petersburg, Russia; e-mail: Nata_C@bk.ru

Received 30.05.2024

The research was supported by a grant from the Russian Science Foundation No. 23-28-10090, https://rscf.ru/project/23-28-10090/ and a grant from the St. Petersburg Science Foundation with the support of the Government of St. Petersburg at the Institute of Regional Economics of the Russian Academy of Sciences.

Abstract. Subject: application of the quality economics methodology to obtain scientifically based assessments of the quality of life in the regions of the Northwestern Federal District. The purpose of the study: research development related to the search for possible areas of impact on the socio-economic system that contribute to improving the population's quality of life in the context of digitalization (according to the data from St. Petersburg and the regions of the Northwestern Federal District). In the course of the study, a quality of life model was created for the regions of the Northwestern Federal District. A basic and comprehensive assessment of the quality of life was carried out, so now we can trace the more than ten-year dynamics of the indicator, group the regions, identify and justify their common and accusatory features in the context of the study. An analysis of individual characteristics of the quality of life in the Northwestern Federal District regions has shown that it is possible to measure the contribution that medical and demographic conditions, socio-economic well-being, comfort and safety of the living environment make to the quality of life indicator. Based on the results of the study, it was concluded that it is important to assess the contribution of these components to determine the direction of regional development policy. In the interests of revealing promising opportunities for obtaining algorithmic solutions in the field of standardization of quality of life management in the region, a new format of a multi-level quality management system is proposed. The use of a digitalized format for managerial decision-making in a multi-level quality management system will greatly increase their effectiveness by expanding the capabilities of analyzing complex data without clear relationships, including for forecasting and optimizing processes occurring at the local, regional, and national levels.

Keywords: quality of life, quality economics, standards, standardization, quality management, management decisions, strategy, development.

JEL Classification: R11, R15, O11.

UDC: 332.055.2.

For reference: **Okrepilov V.V., Gagulina N.L.** (2024). Quality of life modeling in St. Petersburg and the Northwest regions. *Economics and Mathematical Methods*, 60, 3, 54–69. DOI: 10.31857/S0424738824030052 (in Russian).

ЭКОНОМИКА И МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ, 2024, том 60, № 3, с. 70–81

ОТРАСЛЕВЫЕ ПРОБЛЕМЫ

Экосистемная модель развития отрасли беспилотных авиационных систем

© 2024 г. А.В. Быстров, А.Г. Радайкин, Ф.А. Загуменнов, Ю.В. Бутенко

А.В. Быстров,
РЭУ им. Г.В. Плеханова, Москва; e-mail: bistrov-sun@mail.ru

А.Г. Радайкин,
РЭУ им. Г.В. Плеханова, Москва; e-mail: radaykin.ag@rea.ru

Ф.А. Загуменнов,
РЭУ им. Г.В. Плеханова, Москва; e-mail: sgw32@yandex.ru

Ю.В. Бутенко,
ГБУ «МосТрансПроект», Москва; e-mail: u.v.butenko@gmail.com

Поступила в редакцию 25.09.2023

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект 23-28-01419), https://rscf.ru/project/23-28-01419/

Аннотация. Статья посвящена анализу структурных преобразований российской промышленности в контексте внешних ограничений и необходимости обеспечения технологического суверенитета в высокотехнологичных отраслях. Научной гипотезой работы является предположение о важности межотраслевой координации субъектов промышленной политики в целях развития производства критически важной продукции. В качестве объекта исследования рассматривается цифровая промышленная экосистема отрасли беспилотных авиационных систем (БАС). Цель исследования является разработка основ структуры экосистемной модели развития отрасли БАС и обоснование целесообразности ее применения в интересах совершенствования высокотехнологичных отраслей промышленности Российской Федерации. В статье предлагаются авторские трактовки понятий «цифровая промышленная экосистема» и «межотраслевая экосистема», обосновываются принципы функционирования экосистемной модели и ее архитектура. Разработана экосистемная модель развития отрасли БАС, включая органы управления, техническую инфраструктуру, организационно-экономические инструменты, технологические кластеры и сеть участников. Основной отличительной особенностью предлагаемой модели от существующих является распределенность органов управления экосистемой, поддерживающих автономность управления на всех горизонтальных и иерархических уровнях ее организации. Экосистема рассматривается в качестве инструмента механизма стратегического развития высокотехнологичных отраслей, участвующих в создании БАС гражданского назначения, и обеспечивает межотраслевое взаимодействие участников в целях ускоренного развития промышленного производства и становления рынка БАС. Экосистемная модель управления обеспечит владение актуальными данными фактических и планируемых индикативных оценочных показателей состояния и развития отрасли в масштабе времени, близкому к реальному, на основе принципа цифровой прозрачности.

Ключевые слова: беспилотная авиационная система (БАС); БПЛА; промышленная экосистема; межотраслевое взаимодействие, цифровая платформа; отраслевой рынок; сквозные технологии; цифровая трансформация промышленности.

Классификация JEL: L52, L60, O32.

УДК: 338.012.

Для цитирования: **Быстров А.В., Радайкин А.Г., Загуменнов Ф.А., Бутенко Ю.В.** (2024). Экосистемная модель развития отрасли беспилотных авиационных систем // *Экономика и математические методы*. Т. 60. № 3. С. 70–81. DOI: 10.31857/S0424738824030078

ВВЕДЕНИЕ

Возникновение новых отраслей и технологических рынков неразрывно связано с цифровой трансформацией экономики и стремительным ускорением технологических процессов на фоне внедрения технологий искусственного интеллекта, Big Data, цифровых «двойников» и «фабрик», нейротехнологий и многих других. Симбиоз цифровых и промышленных технологий на стыке

отраслей позволяет создавать высокотехнологичные продукты, обладающие немыслимыми ранее функциями и характеристиками.

Актуальность данной работы обусловлена необходимостью поиска и обоснования новых организационно-экономических моделей функционирования и развития высокотехнологичного сектора промышленности Российской Федерации в условиях цифровизации экономики, структурных ограничений и необходимости расширения кооперационных связей в рамках межотраслевого взаимодействия.

Важность внедрения механизмов межотраслевой координации субъектов различных отраслей промышленности, в основе которых цифровые технологии, платформенные бизнес-модели и экосистемы, отмечается как российскими, так и зарубежными исследователями (Дементьев, Евсюков, Устюжанина, 2017; Komninos, 2022; Farhadi, 2019).

Цифровая трансформация промышленного комплекса предъявляет новые требования к инструментам и способам разработки и реализации стратегий высокотехнологичных отраслей, вследствие чего актуальным является переход к цифровому *стратегированию бионических промышленных систем* (Квинт, Бабкин, Шкарупета, 2022), под которыми понимается совокупность субъектов, осуществляющих замкнутый цикл производства на основе цифрового стратегирования и объединяющих новые технологии с возможностями человека для повышения эффективности совместного взаимодействия и ускорения инноваций.

Объектом исследования в настоящей статье является новая единица экономического анализа — *цифровая промышленная экосистема*. Такая экосистема представляет собой совокупность хозяйствующих субъектов реального сектора экономики в рамках одной отрасли или на стыке отраслей, осуществляющих деятельность, связанную с производством промышленной продукции, оказанием услуг в связи с ее использованием, а также ее потребителей, координирующих свою деятельность посредством цифровых платформ (Клейнер, 2018; Jacobides, Cennamo, Gawer, 2015).

На современном этапе экономико-технологического развития важнейшую роль играет развитие промышленного производства беспилотных авиационных систем (БАС), которое нуждается в обеспечении межотраслевой координации участников из разных отраслей.

Целью данной работы является исследование возможностей внедрения цифровых промышленных экосистем и разработка основополагающих принципов экосистемной модели развития новой отрасли — производство БАС в Российской Федерации. Достижение данной цели требует теоретического обоснования механизма межотраслевого взаимодействия участников экосистемы БАС и необходимости внедрения экосистемной модели.

СОВРЕМЕННАЯ МОДЕЛЬ РАЗВИТИЯ ОТРАСЛИ БАС

Отрасль БАС представляет собой совокупность научно-исследовательских и образовательных организаций, промышленных предприятий, малых инновационных компаний, осуществляющих разработку, производство беспилотных летательных аппаратов различного типа, а также компаний, предоставляющих услуги с использованием БАС в различных отраслях народного хозяйства (Радайкин, 2019). В данной статье рассматривается исключительно гражданский рынок БАС.

Объем мирового рынка гражданских БАС в 2021 г. составил 26,3 млрд долл. Прогнозируется, что рынок гражданских БАС вырастет до 41,3 млрд долл. к 2026 г. (рис. 1). Среднегодовой рост мирового рынка

Рис. 1. Динамика мирового рынка гражданских и военных БАС, млрд долл.

Источник: Stockholm International Peace Research Institute.

гражданских беспилотников превышает рост военных примерно на 500 млн долл. ежегодно. Согласно оценке (Фаттахов, Киреев, Клещ, 2022) российский рынок БАС в стоимостном выражении составляет 2% мирового.

Подтверждением стратегической важности отрасли БАС для развития промышленного комплекса России стали «Перечень поручений Президента РФ по вопросам развития беспилотных авиационных систем от 30 декабря 2022 г.» и «Стратегия развития беспилотной авиации Российской Федерации на период до 2030 г. и на перспективу до 2035 г.», утвержденная Распоряжением Правительства Российской Федерации от 21 июня 2023 г. № 1630-р. Согласно стратегии целевыми значениями ключевых показателей развития отрасли беспилотной авиации к 2030 г. являются: объем российского рынка БАС — более 1 млн единиц; доля отечественных БАС на российском рынке — 70%; число произведенных российских БАС — 157,6 тыс. единиц; численность специалистов в отрасли БАС — 1,1 млн человек.

Отечественная отрасль БАС отличается отсутствием либо недостаточным уровнем производства таких высокотехнологичных компонентов, как двигательные установки, аккумуляторные батареи, системы управления, элементы инфраструктуры связи, электронная компонентная база, полезные нагрузки. *Локализация данных компонентов БАС является одной из главных задач стратегии*, решать которую предлагается поэтапно, финансируя и оказывая поддержку разработчикам и производителям всех уровней.

Основа современной модели управления такими высокотехнологичными отраслями промышленности, как БАС, сформирована в *советский период*. Централизация органов управления государственными предприятиями и компаниями является неотъемлемым признаком системы управления промышленным комплексом Российской Федерации и во многом опирается на принципы плановой экономики.

Эксперимент передачи полномочий в управлении промышленным комплексом региональным органам исполнительной власти проводился в некоторых республиках в конце 1950-х годов (Гапсаламов, Васильев, Бочкарева, 2023), однако он оказался неудачным. Внедрение территориальной системы управления промышленностью негативно сказалось на состоянии кооперационных связей на союзном уровне.

В современных реалиях инструментом территориальной формы управления промышленностью можно назвать отраслевые и региональные *кластеры* и *особые экономические зоны*. Кластерная модель развития отраслей и региональных промышленных комплексов доказала свою эффективность в конце XX в. в США, Японии, Германии, Франции, Финляндии, Китае (Ксенофонтова, 2015), а с начала 2000-х годов такая модель активно внедряется в промышленной политике России (Череповская, Селезнева, 2021; Шаталова, Касаткина, Лившиц, 2022). В настоящее время в России действует 52 промышленных кластера в 42 регионах, в составе которых функционирует более 650 промышленных предприятий.

Кластерный подход развития отрасли БАС также используется и сегодня. Правительство Москвы совместно с Правительством Российской Федерации, Министерством промышленности и торговли в 2023 г. открыло кластер беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в Индустриальном парке «Руднево» особой экономической зоны «Технополис Москва». Этот проект является первым кластером, открытым в Российской Федерации в целях развития отрасли БАС, где также планируется создание *федерального центра* БАС. В Индустриальном парке планируется размещать производства и исследовательские центры, центры испытаний с полигоном, обеспеченные всей необходимой инфраструктурой. Компании–участники кластера сконцентрируются на разработке и создании новых моделей БПЛА, программного обеспечения, совершенствовании авионики и внедрении технологий искусственного интеллекта.

Современная организационная модель управления развитием новой отрасли БАС в Российской Федерации находится в стадии формирования, но формируется она в соответствии с традиционными подходами в управлении высокотехнологичным сектором промышленности. Текущую модель можно разделить на три уровня: национальный, федеральный и отраслевой (рис. 2).

Развитие высокотехнологичной отрасли и нового межотраслевого рынка БАС в существующей модели управления промышленным комплексом сдерживают следующие факторы: 1) запретительная нормативно-правовая база в сфере регулирования и эксплуатации БАС, поддержание регуляторных барьеров; 2) высокая степень централизации промышленного производства с сохранением

Рис. 2. Современная модель управления развитием отрасли БАС

Источник: составлено авторами.

главенствующей роли государства; 3) потребность в увеличении финансирования НИОКР в сфере БАС; 4) технологические барьеры: отсутствие отечественных электронных компонентов, двигательных установок, источников энергии, эффективных систем связи.

Стоит отметить, что в принятой «Стратегии развития беспилотной авиации Российской Федерации на период до 2030 г. и на перспективу до 2035 г.» обозначены меры устранения части перечисленных барьеров. Сам факт наличия данной Стратегии является важным звеном построения фактически новой отрасли в промышленности Российской Федерации.

Ключевыми недостатками действующей модели управления отраслью БАС являются: отсутствие межотраслевого взаимодействия предприятий смежных отраслей; отсутствие внутриотраслевого трансфера технологий и обмена управленческими практиками; отсутствие единой базы доступных технологий вследствие низкой степени кооперации научно-исследовательских, промышленных предприятий и конечных заказчиков; нехватка инженерных кадров и операторов БАС (Бабкин, Байков, 2019).

В рамках реализации промышленной политики в области БАС требуется регулярная актуализация стратегии на основе данных постоянного мониторинга отрасли. Современные цифровые инструменты и механизмы позволяют обеспечить непрерывный сбор и анализ максимально релевантных данных состояния промышленности как на федеральном уровне, так и на уровне отраслей, регионов и предприятий (Нечаева, 2021). Возникает задача разработки механизма межотраслевой координации государственных ведомств, предприятий и других организаций, участвующих в разработке, производстве, сертификации БАС и оказании услуг на их основе.

МЕЖОТРАСЛЕВЫЕ РЫНКИ И ЭКОСИСТЕМЫ

Внедрение цифровых бизнес-моделей в традиционных сферах экономики, в том числе в промышленном секторе, привело к трансформации организационно-экономических структур и возникновению межотраслевых рынков и цифровых экосистем, в основе которых лежит принцип сетевого взаимодействия экономических агентов (Holgersson et al., 2022; Ghio, Guerini, Lamastra-Rossi, 2019; Цёхла, Симченко, Филонов, 2020; Преображенский, Толстых, Шмелева, 2019). Исследования сетевых форм организации бизнеса — как эффективного инструмента стратегического развития — получили развитие в работах российских и зарубежных ученых (Vasin et al., 2018; Макаров, 2021; Farhadi, 2019; Дударева, 2023; Cobben et al., 2022).

Цифровые экосистемы представляют собой совокупность взаимосвязанных цифровых технологий и сервисов, реализованных на платформе, где участники взаимодействуют друг с другом, тем самым создавая ценность для бизнеса и потребителей (Lis A.M., Lis A., 2021; Mattes, Schallmo, 2023; Fernandes, Ferreira, 2022). Цифровые экосистемы могут объединять различные виды платформ по видам деятельности, включая электронную коммерцию, логистические услуги, социальные сети, программные решения, аппаратные предложения и цифровые развлечения. При этом

для участника экосистемы такое объединение происходит незаметно — на основе принципа бесшовности. Бизнес-структурам цифровые экосистемы могут предлагать набор цифровых продуктов и технологий, которые компании могут использовать для взаимодействия со своими клиентами, партнерами и другими заинтересованными сторонами.

Сегодня крупнейшие технологические корпорации создают собственные экосистемы. Мировыми промышленными лидерами, обладающими собственными промышленными экосистемами, являются компании из США: Apple, Boeing с экосистемой Digital Airline, General Electric с GE Open Innovation. Также можно выделить экосистемы Volkswagen Industrial Cloud и Siemens из Германии, а также французскую компанию Schneider Electric.

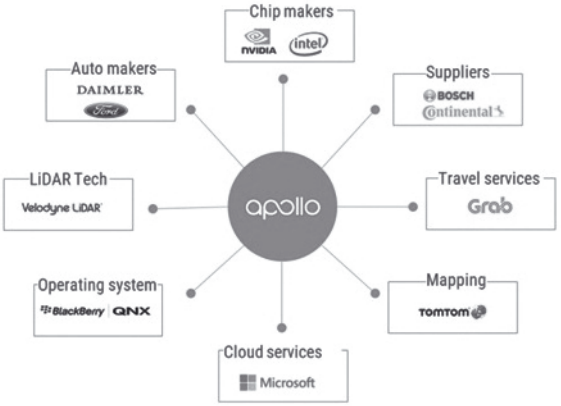

Рис. 3. Экосистема автономного вождения Apollo, Baidu

Источник: CBINSIGHTS.

Особенностью промышленных экосистем является отраслевая или продуктовая направленность, в рамках которой обеспечивается взаимовыгодное взаимодействие множества участников из различных отраслей экономики в целях создания новой промышленной продукции или сервисов на основе сквозных цифровых процессов производства (Шкарупета, Дударева, 2021).

Под промышленной экосистемой авторы понимают организационно-экономическую модель взаимодействия государственных ведомств, реализующих промышленную политику, и научно-исследовательских организаций, предприятий промышленности, малых инновационных предприятий, образовательных учреждений, а также институтов развития и регулирующих органов в едином цифровом контуре с целью обеспечения ускорения разработки и производства высокотехнологичной продукции (Быстров, Толстых, Радайкин, 2020).

Основой инфраструктуры промышленной экосистемы чаще всего является *цифровая платформа*, или совокупность платформ, которые интегрированы между собой и обеспечивают участникам экосистемы бесшовное предоставление цифровых сервисов, выступая инструментом снижения транзакционных издержек. Промышленные экосистемы обеспечивают взаимосвязь государственного, корпоративного и потребительского секторов экономики.

Одной из самых развитых на сегодняшний день является цифровая экосистема автономного вождения Apollo от компании Baidu, которая насчитывает более 100 партнеров по всему миру. Такая обширная экосистема дает компании огромное преимущество, так как она использует опыт, компетенции, ресурсы и бренд разных партнеров (рис. 3).

Цифровые экосистемы являются одними из самых сложных существующих бизнес-моделей. В настоящее время можно выделить пять крупнейших компаний, которые построили экосистемные бизнес-модели: Apple, Amazon, Google, Alibaba, Tencent. Контролеры таких экосистем, как Amazon, Alibaba, Google, Apple, Tesla, привлекают клиентов с помощью различных сервисов на разных платформах. Затем они могут использовать знания и данные для повышения продаж существующим клиентам и приобретения новых клиентов благодаря эффекту «привязки к поставщику».

Экосистема Apple включает оборудование (iPhone, iPad, Mac), программное обеспечение (iOS, macOS) и сервисы (App Store, iTunes, iCloud, Apple Music, Apple TV+, Apple Fitness+, Apple Arcade, Apple One, Apple Books, Apple Podcasts и др.). Аналогично Google предлагает экосистему, которая включает Android, Chrome, Google Search, Google Docs, Google Play Store, YouTube, Gmail, Google Maps, Google Drive и множество других сервисов. Экосистема Microsoft включает Windows, Office 365 и облачные сервисы Azure.

В России лидерами внедрения платформенных технологий и построения экосистем в реальном секторе являются компании топливно-энергетического сектора и машиностроения: ГК «Росатом», ПАО «Газпром», ПАО «Газпромнефть», ОАК, ОСК, АО «Вертолеты России». Компании реализуют проекты внедрения цифровых решений для своих предприятий в области промышленного

интернета, энергосбережения, технологий машинного зрения, управления производственными процессами и взаимоотношениями с клиентами.

Российские финансово-технологические и телеком-компании Сбер, Яндекс, Mail.ru Group и МТС также строят экосистемы таким образом, чтобы удовлетворить как можно больше потребностей клиента.

Актуальными технологическими направлениями для мировых экосистем являются беспилотные технологии, включая наземный транспорт и беспилотный летательный аппарат (БПЛА). Практически все экосистемы, в том числе и российские, запустили или приобрели стартапы в области беспилотных автомобилей и технологий «умного дома». Также крупные корпорации приобретают проекты, в основе которых технологии голосовых помощников, eCom, AI, VR&AR, Gaming, Blockchain, Education, Cloud, FinTech, Music/Video, eHealth, marketing, Io T.

Российским высокотехнологичным предприятиям из-за санкций сегодня практически закрыт доступ к импортным комплектующим и радиоэлектронной компонентной базе, производство сопоставимых аналогов в нашей стране при этом отсутствует. Также многие российские компании остались без критически важного программного обеспечения, предоставляемого зарубежными разработчиками и торговцами. Оперативный поиск альтернативных каналов поставок не способен решить эти проблемы в долгосрочном плане, при этом издержки при таком варианте обхода санкций растут в геометрической прогрессии.

Стратегически верным решением является кратное увеличение финансирования НИОКР в своей стране и создание собственных производств критически важной продукции. Для решения этих задач можно использовать механизм промышленных экосистем, которые соответствуют современным трендам цифровизации системы управления промышленностью, обладают гибкостью и адаптивностью организационных элементов (Thomas, Autio, 2020). Такая бизнес-модель имеет ряд преимуществ.

1. Снижение транзакционных издержек вследствие установления долгосрочных связей между участниками экосистемы и более эффективного взаимодействия использования ее сервисов.

2. Ускоренная апробация и пилотирование результатов НИОКР в экосистеме, повышение инновационной активности и исследовательского потенциала.

3. Упрощение экспансии на новые рынки.

4. Использование эффекта масштаба и усиление рыночной власти.

5. Повышение прозрачности бизнеса, повышение значимости репутации участника экосистемы.

Внедрение экосистемной модели управления высокотехнологичными отраслями в промышленности позволит преодолеть следующие изъяны существующей модели: 1) инертность государственных корпораций и вертикально-интегрированных промышленных групп, слабый отклик на инновации; 2) низкий уровень цифровизации производственных процессов, слабая информационная инфраструктура предприятий, отсутствие надежных систем информационной безопасности; 3) слабая научно-производственная кооперация; 4) недостаток квалифицированных кадров и отсутствие системы наставничества на производстве, высокая текучесть инженерных кадров; 5) низкий уровень межотраслевого взаимодействия экономических агентов как на горизонтальном уровне, так и в вертикально-интегрированных структурах.

В этих условиях очевидна необходимость создания и внедрения отраслевых экосистем — механизма стратегического развития высокотехнологичных отраслей, который организовывает взаимодействие промышленных предприятий, научно-исследовательских, образовательных организаций различных отраслей и различного ведомственного подчинения и координируется федеральными органами исполнительной власти во взаимодействии с институтами развития и участниками экосистемы (Быстров, Толстых, Радайкин, 2020).

Функциональное назначение межотраслевых экосистем заключается в организации сетевого взаимодействия акторов экосистемы в информационном пространстве по единым для всех стандартам и принципам (Костырев, 2019).

В производстве беспилотных авиационных систем участвуют предприятия радиоэлектронной, авиационной, химической и других отраслей промышленности. Научные организации разрабатывают новые облегченные материалы и сплавы, IT-компании — специализированное программное обеспечение, телекоммуникационные и аэрокосмические предприятия — новые стандарты связи и передачи данных. Кадровое обеспечение отрасли БАС требует подготовки сотен тысяч внешних пилотов и инженеров. В этой цепочке ключевым звеном являются конечные потребители высокотехнологичной продукции — государственные органы, компании и частные лица.

Таким образом, ввиду стратегической важности развития беспилотного авиастроения и производства сопутствующих компонентов на стыке отраслей и технологий, целесообразным видится создание и внедрение экосистемной модели развития для целей ускоренного развития производства беспилотных авиационных систем в Российской Федерации.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Крупномасштабное производство БАС гражданского назначения невозможно организовать без организации межотраслевой координации разработчиков и производителей из смежных отраслей, поскольку оно характеризуется высокой степенью кооперации и совокупностью горизонтальных и вертикальных связей, возникающих на каждом уровне системы управления отраслью БАС.

Модель управления стратегическим развитием высокотехнологичной отрасли БАС должна обеспечивать связанность национальных программ и отраслевых стратегий, а также предоставлять возможности, присущие современным системам поддержки принятия решений на основе технологий искусственного интеллекта: осуществлять мониторинг отраслевых и макроэкономических показателей, проводить предиктивную аналитику, осуществлять сценарное планирование развития отрасли на основе актуальных экономико-статистических данных.

Экосистема БАС также должна предоставлять своим участникам доступ к апробированным технологиям разработки и цифрового проектирования (digital factory), цифровых двойников (digital twin), организации производства (smart factory) и управления жизненным циклом продукции (product lifecycle management). Межотраслевой характер экосистемы определяют технологии БАС: компоненты робототехники и сенсорики, новые материалы, технологии беспроводной связи, нейротехнологии и искусственный интеллект, новые производственные технологии, промышленный интернет, технологии виртуальной и дополненной реальностей, системы распределенного реестра.

Трансформация модели управления отраслью БАС должна учитывать недостатки действующей модели, а также внешние факторы, такие как санкции недружественных стран, цифровизацию экономики, мобилизацию ВПК, ESG-повестку, которые влияют на промышленный комплекс в целом (рис. 4).

Экосистемную модель развития отрасли БАС от действующей модели отличают следующие особенности.

Рис. 4. Трансформация модели управления отраслью БАС

Источник: составлено авторами.

1. Распределенные органы управления экосистемой БАС. Управленческая архитектура выстраивается таким образом, что ключевые управленческие решения принимаются коллегиальным органом — советом экосистемы, в который входят представители всех категорий участников. На практике должна быть реализована система управления из коллегиальных органов управления (совет экосистемы БАС и наблюдательный совет) и органов операционного управления цифровой платформой экосистемы.

2. Экосистема БАС является экономическим субъектом, осуществляющим деятельность в цифровом пространстве. Участие в экосистеме БАС предоставляется после прохождения аккредитации всем заинтересованным участникам отрасли БАС и смежных отраслей.

3. Экосистема предназначена для стратегического развития высокотехнологичных отраслей промышленности, прямо или косвенно участвующих в создании БАС гражданского назначения, и должна обеспечивать межотраслевое взаимодействие участников в целях ускоренного развития промышленного производства и становления рынка БАС в Российской Федерации. Экосистема не выполняет функции исполнительного или регулирующего органа отрасли, но является полноценным субъектом промышленной политики.

4. Организационно-экономические инструменты экосистемы предоставляются всем участникам экосистемы как для решения отдельных операционных задач, так и для участия в комплексных научно-технологических проектах. Отдельные инструменты экосистемы могут предоставляться участникам на платной основе, обеспечивая содержание органов операционного управления экосистемой.

5. Экосистемная модель отрасли БАС позволяет проводить непрерывный мониторинг отрасли в режиме онлайн. Она позволяет получать актуальные данные по показателям развития отрасли, минимизируя или полностью исключая их искажение за счет принципа цифровой прозрачности, который позволит отслеживать всю цепочку создания добавленной стоимости высокотехнологичной продукции.

6. Экосистема может обеспечивать бесшовную интеграцию с государственными информационными системами, что позволит участникам экосистемы участвовать в разработке нормативно-правовых актов, отраслевых стандартов и других документов.

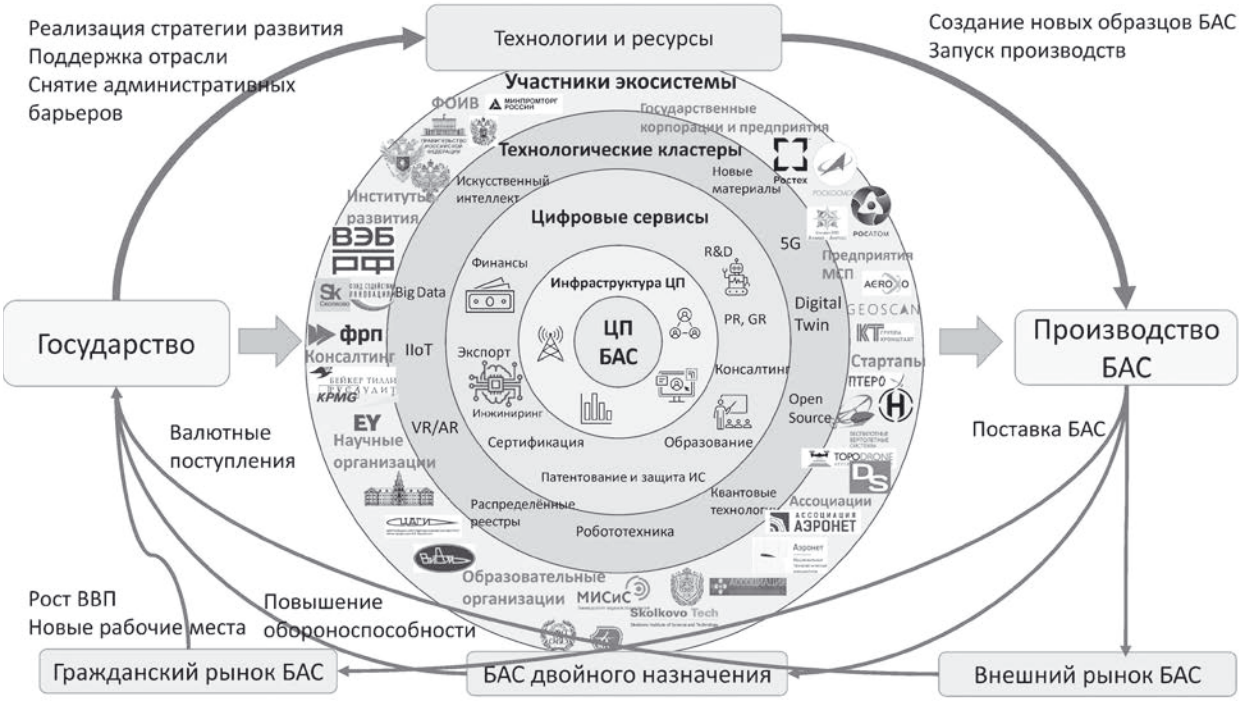

Рис. 5. Экосистемная модель развития отрасли БАС

Источник: составлено авторами.

Основополагающей предпосылкой внедрения экосистемной модели развития отрасли БАС является структурное отставание Российской Федерации в производстве конкурентоспособных БПЛА как гражданского, так и военного назначения, несмотря на достаточно большой локальный рынок. Однако российский рынок БАС, по разным оценкам, составляет около 2% мирового рынка и его может быть недостаточно для достижения технологического лидерства в данной сфере. В связи с этим основным целеполаганием внедрения экосистемной модели отрасли БАС должно стать создание продукции мирового уровня, конкурирующей с лучшими образцами китайских и американских брендов (Волков, Воробьева 2023). Достижение такой амбициозной цели требует объединения компетенций и ресурсов технологических лидеров беспилотного авиастроения, научных организаций, компаний финансового сектора и институтов развития.

Правительство Российской Федерации и ведомства, отвечающие за реализацию промышленной политики и осуществляющие управление развитием отрасли БАС, являются ключевыми акторами в обеспечении эффективного функционирования экосистемы БАС. Несмотря на децентрализацию органов управления экосистемой, ее модель предназначена для реализации национальной стратегии развития отрасли БАС, поэтому государство в лице своих представителей в коллегиальных и операционных органах управления является организационным ядром экосистемы. Концептуальная модель экосистемы БАС представлена на рис. 5.

В современных условиях внедрение экосистемы БАС направлено на повышение эффективности предоставления мер государственной поддержки, обеспечение роста ВВП и создание новых рабочих мест, на повышение экспортного потенциала промышленности и обороноспособности за счет трансфера гражданских технологий в ВПК.

Дальнейшие направления исследований экосистемной модели БАС должны включать оценку потенциального экономического эффекта от внедрения экосистемной модели, разработку соответствующей экономической модели экосистемы и показателей ее эффективности, а также оценку рисков внедрения экосистемы БАС.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Отрасли БАС сегодня на государственном уровне отводится важная роль движущей силы технологического суверенитета отечественной экономики, для чего разработана и утверждена Стратегия развития беспилотной авиации Российской Федерации, а также разрабатывается соответствующий национальный проект. В то же время реализация такого масштабного проекта, по сути создания полноценной отрасли, опирается на традиционную иерархическую модель управления высокотехнологичным сектором.

На основе проведенного нами исследования можно сделать вывод, что рынок БАС имеет межотраслевой характер, ввиду чего важной задачей является консолидация и координация экономических агентов из различных отраслей в целях создания и развития новой отрасли БАС на основе современных цифровых технологий и механизмов сетевого взаимодействия. Результатом исследования является разработка экосистемной модели развития отрасли БАС и обоснование необходимости ее внедрения. Разработанная модель развития отрасли БАС позволит обеспечить ускоренное развитие промышленного производства БАС в Российской Федерации за счет интеграции участников отрасли в единое организационно-экономическое информационное пространство, устранения коммуникационных барьеров и снижения транзакционных издержек.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

Бабкин А.В., Байков Е.А. (2019). Особенности стратегического управления в инновационных пространственно-распределенных организационно-экономических системах // *Экономика и управление*. № 7 (165). С. 15–23. DOI: 10.35854/1998-1627-2019-7-15-23 [**Babkin A.V., Baykov E.A.** (2019). Specific aspects of strategic management in innovative geographically distributed organizational and economic systems. *Economics and Management*, 7 (165), 15–23. DOI: 10.35854/1998-1627-2019-7-15-23 (in Russian).]

Быстров А.В., Толстых Т.О., Радайкин А.Г. (2020). Отраслевая экосистема как организационно-экономическая модель развития высокотехнологичных производств // *Экономика и управление*. Т. 26. № 6. С. 564–576. [**Bystrov A.V., Tolstykh T.O., Radaykin A.G.** (2020). Cross-industry ecosystem as an organizational and economic model for the development of high-tech Industries. *Economics and Management*, 26 (6), 564–576 (in Russian).]

Волков В.И., Воробьева М.В. (2023). Методический подход к формированию обобщенного показателя конкурентоспособности беспилотных авиационных систем // *Самоуправление*. № 2 (135). С. 366–370. [**Volkov V.I., Vorobyova M.V.** (2023). Methodological approach to the formation of a generalized indicator of the competitiveness of unmanned aircraft systems. *Self-government* (*Samoupravleniye*), 2 (135), 366–370 (in Russian).]

Гапсаламов А.Р., Васильев В.Л., Бочкарева Т.Н. (2023). Трансформация государственной промышленной политики в СССР: факторы влияния, формы и направления // *Вопросы истории*. № 6–1. С. 56–65. DOI: 10.31166/VoprosyIstorii202306Statyi19 [**Gapsalamov A.R., Vasiliev V.L., Bochkareva T.N.** (2023). Transformation of state industrial policy in the USSR: Factors of influence, forms and directions. *Voprosy Istorii*, 6–1, 56–65 (in Russian).]

Дементьев В.Е., Евсюков С.Г., Устюжанина Е.В. (2017). Гибридные формы организации бизнеса: к вопросу об анализе межфирменных взаимодействий // *Российский журнал менеджмента*. Т. 15. № 1. С. 89–122. [**Dementiev V.E., Evsukov S.G., Ustyuzhanina E.V.** (2017). Hybrid forms of business organization: The interfirm cooperation perspective. *Russian Management Journal*, 1, 89–122 (in Russian).]

Дударева О.В. (2023). *Управление устойчивым развитием промышленных экосистем в условиях технологических трансформаций*. Курск: ЗАО «Университетская книга». 401 с. ISBN: 978-5-907710-99-3. [**Dudareva O.V.** (2023). *Management of sustainable development of industrial ecosystems in the conditions of technological transformations.* Kursk: Closed Joint Stock Company "University Book". 401 p. (in Russian).]

Квинт В.Л., Бабкин А.В., Шкарупета Е.В. (2022). Стратегирование формирования платформенной операционной модели для повышения уровня цифровой зрелости промышленных систем // *Экономика промышленности*. Т. 15 (3). С. 249–261. DOI: 10.17073/2072-1633-2022-3-249-261 [**Kvint V.L., Babkin A.V., Shkarupeta E.V.** (2022). Strategizing of forming a platform operating model to increase the level of digital maturity of industrial systems. *Russian Journal of Industrial Economics*, 15 (3), 249–261. DOI: 10.17073/2072-1633-2022-3-249-261 (in Russian).]

Клейнер Г.Б. (2018). Социально-экономические экосистемы в контексте дуального пространственно-временного анализа // *Экономика и управление: проблемы и решения*. № 5–5'. С. 5–13. [**Kleiner G.B.** (2018). Socio-economic ecosystems in the context of dual spatial-temporal analysis. *Economics and Management: Problems, Solutions*, 5–5', 5–13 (in Russian).]

Костырев А.П. (2019). Промышленность в системе межотраслевых связей в условиях цифровой экономики // *Развитие теории и практики управления социальными и экономическими системами*. № 8. С. 93. [**Kostyrev A.P.** (2019). Industry in the system of intersectoral relations in the digital economy. *Development of Theory and Practice of Management of Social and Economic Systems*, 8, 93 (in Russian).]

Ксенофонтова О.Л. (2015). Опыт зарубежных стран по созданию и функционированию кластеров: модельный подход // *Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение*. № 2 (42). С. 36–42. [**Ksenofontova O.L.** (2015). The experience of foreign countries in the creation and functioning of clusters: A model approach. *Modern High Technologies. Regional Application*, 2 (42), 36–42 (in Russian).]

Макаров В.Л. (2021). Сети управления — новый эффективный инструмент в цифровом мире // *Вестник ЦЭМИ*. № 1. DOI: 10.33276/S265838870015402-5 [**Makarov V.L.** (2021). Management networks — a new effective tool in the digital world. *Bulletin of the CEMI*, 1. DOI: 10.33276/S265838870015402-5 (in Russian).]

Нечаева Н.А. (2021). Региональная система государственного управления инвестиционной деятельностью предприятий промышленного комплекса // *Вектор экономики*. № 7 (61). [**Nechaeva N.A.** (2021). Regional system of state management of investment activity of industrial complex enterprises. *Vector of Economy*, 7 (61) (in Russian).]

Преображенский Б.Г., Толстых Т.О., Шмелева Н.В. (2019). Оценка человеческого капитала в рамках отраслевой трансформации промышленных систем // *Регион: системы, экономика, управление*. № 4 (47). С. 193–197. [**Preobrazhensky B.G., Tolstykh T.O., Shmeleva N.V.** (2019). Assessment of human capital in the framework of cross-sectoral transformation of industrial systems. *Region: Systems, Economics, Management*, 4 (47), 193–197 (in Russian).]

Радайкин А.Г. (2019). Инвестиционный потенциал и перспективы развития производства беспилотных авиационных систем в России // *Горизонты экономики*. № 6 (52). С. 44–52. [**Radaykin A.G.** (2019). Investment potential and development prospects of the production of unmanned aircraft systems in Russia. *Economic Horizons*, 6, 44–52 (in Russian).]

Фаттахов М.Р., Киреев А.В., Клещ В.С. (2022). Рынок беспилотных авиационных систем в России: состояние и особенности функционирования в макроэкономических условиях 2022 года // *Вопросы инновационной экономики*. Т. 12. № 4. С. 2507–2528. DOI: 10.18334/vinec.12.4.116912 [**Fattakhov M.R., Kireev A.V., Tick V.S.** (2022). The market of unmanned aircraft systems in Russia: The state and features of functioning in the macroeconomic conditions of 2022. *Russian Journal of Innovation Economics*, 12, 4, 2507–2528 (in Russian).]

Цёхла С.Ю., Симченко С.Ю., Филонов В.И. (2020). К вопросу об изменениях издержек институтов сетевого взаимодействия при реализации отраслевых цифровых проектов // *Друкеровский вестник*. № 3 (35).

С. 56–63. [**Tsekhla S. Yu., Simchenko S. Yu., Filonov V.I.** (2020). On the issue of changes in the costs of institutions of network interaction in the implementation of cross-industry digital projects. *Drukerovskiy Vestnik*, 3 (35), 56–63 (in Russian).]

Череповская Н.А., Селезнева Е.Ф. (2021). Теоретико-методологические аспекты кластерного подхода к формированию эффективной экономики // *Проблемы теории и практики управления*. № 1. С. 36–53. DOI: 10.46486/0234-4505-2021-1-36-53 [**Cherepovskaya N.A., Selezneva E.F.** (2021). Theoretical and methodological aspects of the cluster approach to the formation of an effective economy. *Problems of the Theory and Practice of Management,* 1, 36–53 (in Russian).]

Шаталова О.М., Касаткина Е.В., Лившиц В.Н. (2022). Кластерный анализ и классификация промышленно ориентированных регионов РФ по экономической специализации // *Экономика и математические методы*. Т. 58. № 1. С. 80–91. DOI: 10.31857/S042473880018971-7 [**Shatalova O.M., Kasatkina E.V., Livchits V.N.** (2022). Cluster analysis and classification of Russia's industrial oriented regions by economic specialization. *Economics and Mathematical Methods*, 58, 1, 80–91. DOI: 10.31857/S042473880018971-7 (in Russian).]

Шкарупета Е.В., Дударева О.В. (2021). Концептуальное представление промышленной экосистемы в ходе эволюции устойчивого развития // *Цифровая и отраслевая экономика*. № 1 (22). С. 5–8. [**Shkarupeta E.V., Dudareva O.V.** (2021). Conceptual representation of the industrial ecosystem during the evolution of sustainable development. *Digital and Industrial Economy*, 1 (22), 5–8 (in Russian).]

Cobben D., Ooms W., Roijakkers N., Radziwon A. (2022). Ecosystem types: A systematic review on boundaries and goals. *Journal of Business Research*, 142, 138–164. DOI: 10.1016/j.jbusres.2021.12.046

Farhadi N. (2019). *Cross-industry ecosystems: Grundlagen, archetypen, modelle und strategische ansätze*. Verlag: Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH. DOI: 10.1007/978-3-658-26129-0.

Fernandes A.J., Ferreira J.J. (2022). Entrepreneurial ecosystems and networks: A literature review and research agenda. *Review of Management Science*, 16, 189–247. DOI: 10.1007/s11846-020-00437-6

Ghio N., Guerini M., Lamastra-Rossi C. (2019). The creation of high-tech ventures in entrepreneurial ecosystems: Exploring the interactions among university knowledge, cooperative banks, and individual attitudes. *Small Business Economics*, 52, 2, 523–543.

Holgersson M., Baldwin C.Y., Chesbrough H., Bogers M.L.A.M. (2022). The forces of ecosystem evolution. *California Management Review*, 64 (3), 5–23. DOI: 10.1177/00081256221086038

Jacobides M., Cennamo C., Gawer A. (2015). Industries, ecosystems, platforms, and architectures: Rethinking our strategy constructs at the aggregate level. *Working paper, London Business School*.

Komninos N. (2022). Transformation of industry ecosystems in cities and regions: A generic pathway for smart and green transition. *Sustainability*, 14, 9694. DOI: 10.3390/su14159694

Lis A.M., Lis A. (2021). The cluster organization: Analyzing the development of cooperative relationships. 1st ed. Abingdon: Routledge. DOI: 10.4324/9781003001041

Mattes V., Schallmo D. (2023). Entrepreneurial ecosystems: A systematic literature review and bibliometric analysis. Conference: *2023 ISPIM Innovation Conference (Ljubljana). Ljubljana.* Available at: https://www.researchgate.net/publication/372676410_Entrepreneurial_Ecosystems_A_Systematic_Literature_Review_and_Bibliometric_Analysis

Thomas L.D. W., Autio E. (2020). *Innovation ecosystems in management: An organizing typology. Oxford encyclopedia of business and management*. New York: Oxford University Press. DOI: 10.1093/acrefore/9780190224851.013.203

Vasin S., Gamidullaeva L., Tolstykh T., Rostovskaya T., Skorobogatova V. (2018). From innovation system through institutional transformation to digital innovation ecosystem. Proceedings of the *31st International Business Information Management Association Conference, IBIMA 2018: Innovation Management and Education Excellence through Vision*, 4620–4633.

Ecosystem model of development of the unmanned aircraft systems industry

© 2024 A.V. Bystrov, A.G. Radaykin, F.A. Zagumennov, Yu.V. Butenko

A.V. Bystrov,
Plekhanov Russian University of Economics, Moscow, Russia; e-mail: bistrov-sun@mail.ru

A.G. Radaykin,
Plekhanov Russian University of Economics, Moscow, Russia; e-mail: radaykin.ag@rea.ru

F.A. Zagumennov,
Plekhanov Russian University of Economics, Moscow, Russia; e-mail: sgw32@yandex.ru

Yu.V. Butenko,
State Scientific-Research and Project-Development Institution "MosTransProekt", Russia; e-mail: u.v.butenko@gmail.com

Received 25.09.2023

This study was supported by the Russian Science Foundation (No. 23-28-01419), https://rscf.ru/project/23-28-01419/

Abstract. The article analyzes the structural transformations of Russian industry in the context of external constraints and the need to ensure technological sovereignty in high-tech industries. The scientific hypothesis of the work is the assumption of the importance of cross-sectoral coordination of subjects of industrial policy in order to develop the production of critical products. The digital industrial ecosystem of the unmanned aircraft systems (UAS) industry is considered as an object of research. The purpose of the research is to develop the foundations of the structure of the ecosystem model of the development of the UAS industry and substantiate the feasibility of its application in the interests of improving high-tech industries of the Russian Federation. The article offers the author's interpretations of the concepts of "digital industrial ecosystem" and "cross-industry ecosystem", substantiates the principles of functioning of the ecosystem model and its architecture. An ecosystem model of the development of the UAS industry was developed, including management bodies, technical infrastructure, organizational and economic tools, technological clusters and a network of participants. The main distinguishing features of the proposed model from the existing ones are: the distribution of ecosystem management bodies that ensure the autonomy of management at all horizontal and hierarchical levels of its organization; the ecosystem is considered as an instrument of the mechanism of strategic development of high-tech industries involved in the creation of civil-purpose UAS, and provides cross-industry interaction of participants in order to accelerate the development of industrial production and the formation of the UAS market. The ecosystem management model will ensure the possession of up-to-date data of actual and planned indicative evaluation indicators of the state and development of the industry on a time scale close to real, based on the principle of digital transparency.

Keywords: UAS; UAV; industrial ecosystem; cross-industry interaction, digital platform; cross-industry market; end-to-end technologies; digital transformation of industry.

JEL Classification: L52, L60, O32.

UDC: 338.012.

For reference: **Bystrov A.V., Radaykin A.G., Zagumennov F.A., Butenko Yu.V.** (2024). Ecosystem model of development of the unmanned aircraft systems industry. *Economics and Mathematical Methods*, 60, 3, 70–81. DOI: 10.31857/S0424738824030078 (in Russian).

ЭКОНОМИКА И МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ, 2024, том 60, № 3, с. 82–93

ОТРАСЛЕВЫЕ ПРОБЛЕМЫ

Ценовой индекс на компьютерные игры: что скрыто от невооруженного глаза?

© 2024 г. М.В. Арсланов, Т.А. Ратникова

М.В. Арсланов,
ВШЭ, Москва; e-mail: markarslanov8@gmail.com,

Т.А. Ратникова,
ВШЭ, Москва; e-mail: taratnikova@yandex.ru

Поступила в редакцию 30.07.2023

Аннотация. В данной работе представлено исследование ценовой динамики широкого спектра видеоигр в период с 2008 по 2020 г. В ходе исследования создана необходимая для анализа база данных; проводится моделирование цен видеоигр эконометрическими методами и конструируются ценовые индексы для различных игровых жанров: ролевые (RPG, Role-Playing Game), стратегии (Strategy), экшн-игры (Action), приключения (Adventure), казуальные игры (Casual), инди-игры (indie), симуляторы (Simulators) и др. Гипотетически разброс цен на видеоигры по разным жанрам и системным требованиям обусловлен разным объемом усилий, необходимых для их создания. В ходе конструирования гедонистических ценовых индексов производится очищение цен от характеристик качества продуктов (компьютерных игр). В роли характеристик используются системные параметры видеоигр. Также в работе применяются различные подходы к модификации гедонистических индексов путем рассмотрения неоднородности жанров. Благодаря исследованию удается отследить динамику стоимости видеоигр на рассматриваемом промежутке времени с представлением запаздывающих и опережающих тенденций. В конце исследования предлагается диверсификация жанров по ценовой эластичности ключевых переменных, которые были использованы в ходе построения моделей.

Ключевые слова: гедонистические регрессии; видеоигры; жанры видеоигр; индексы цен; модели с фиксированным эффектом; модели со случайными эффектами; многоуровневые модели.

Классификация JEL: C33, C51, C81.

УДК: 330.43.

Для цитирования: **Арсланов М.В., Ратникова Т.А.** (2024). Ценовой индекс на компьютерные игры: что скрыто от невооруженного глаза? // *Экономика и математические методы*. Т. 60. № 3. С. 82–93. DOI: 10.31857/S0424738824030073

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы, и особенно в период, начавшийся с пандемии Covid-19, наблюдается интенсивный рост цифровизации во всех сферах общественной деятельности, в частности в области досуга. Значительное число людей проводит свободное время за видеоиграми, используя свои телефоны, планшеты и ноутбуки. Данная сфера развивается достаточно стремительно, поскольку разработчики видеоигр с каждым годом внедряют новые технологии и прорабатывают все более изощренные сценарии продукта. Вместе с возрастанием спроса, а также с совершенствованием и усложнением продуктов растут и цены. И возникает естественный вопрос, как отделить эффект увеличения спроса от эффекта изменения качества продуктов на рынке компьютерных игр. Традиционный ответ на этот вопрос дает гедонистический подход к моделированию цен. Этот подход позволяет, с одной стороны, моделировать связь цены с качественными и количественными характеристиками компьютерной игры и их изменениями, с другой стороны, дает возможность выделить индекс цен, который представляет собой очищенную от многообразия неоднородных характеристик компьютерных игр компоненту цены, позволяющую увидеть реальную динамику цен. Помимо этого, индекс цен на компьютерные игры, в принципе, позволяет увидеть особенности динамики инфляции, характерные для этого сегмента потребительского рынка.

О важности моделирования индексов цен в современной экономике писал еще Эрнст Берндт в своей монографии (Berndt, 2005). Бизнесменам и аналитикам необходимо знать, как следует

проводить дефлирование объема продаж, выпуска и издержек, чтобы представлять эти показатели в реальном выражении, очищенном от инфляции. Долгосрочные контракты между продавцами и покупателями учитывают при денежных транзакциях инфляцию на конкретных рынках. Именно потому, что индексы цен имеют такое широкое распространение в современной экономике, важно, чтобы они строились настолько надежно и аккуратно, насколько это практически возможно.

В данной работе индексы цен будут сконструированы с помощью *гедонистического подхода*, который принято использовать в тех случаях, когда речь идет о рынках высоко гетерогенных по качествам продуктов со стремительно обновляющимся ассортиментом, что делает практически невозможными иные способы построения индексов (Турунцева, Зямалов, 2022).

В данной работе будет сконструирован индекс цен на компьютерные игры за период 2008–2020 гг., а также мы попробуем выяснить, в какие периоды прирост цены приходился в большей мере на изменение качества продуктов за счет совершенствования игровых платформ, технологии игр и усложнения сценариев, а в какие периоды рост цен в большей степени был связан с ростом спроса на игры. В качестве базовой модели будет использована традиционная *гедонистическая регрессия*, которая затем будет усложнена попытками очистить индекс цен от неоднородности игровых жанров путем учета фиксированных эффектов жанра или же случайных эффектов жанра в самой цене, а также — влияния случайных эффектов жанра на цену некоторых характеристик игр, которые в ходе анализа будут признаны ключевыми.

Работа будет иметь следующую структуру: после введения последует краткий обзор публикаций, посвященных гедонистическим регрессиям и индексам и изучению ценообразования в игровой индустрии, будет специфицирована и обоснована базовая модель и ее модификации. В следующем разделе речь пойдет о данных и их предварительном анализе, потом мы опишем основные результаты исследования и в заключительной части подведем итоги.

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Вопрос, на который стоит дать ответ прежде, чем переходить к основному содержанию работы, состоит в следующем: в чем заключается смысл оценивания гедонистических регрессий и конструирования гедонистических индексов цен.

Гедоническая функция описывает вариацию рыночных цен на продукты в зависимости от их характеристик. Использование гедонических регрессий наиболее целесообразно в тех случаях, когда в наличии имеются данные о ценах и характеристиках для некоторого набора продуктов и можно полагать, что характеристики хорошо предсказывают и объясняют изменчивость цен. Их имеет смысл использовать в тех случаях, когда стоимость опции или изменение характеристик невозможно идентифицировать независимо, поэтому данные о них приходится получать исходя из цен, по которым продаются на рынке товары с различными спецификациями. Оценки регрессионных коэффициентов представляют собой оценку вклада единичного изменения характеристики в цену продукта с учетом воздействия разброса, присущего другим характеристикам. Такие оценки особенно хорошо подходят для измерения величины изменений качества продукта, когда изменяется только заданный набор характеристик и требуется стоимостная оценка изменения только этих характеристик. Результаты гедонистических регрессий можно использовать для того, чтобы определять наиболее типичные характеристики, применяемые для отбора продукта. Синергетический эффект отбора цен в соответствии с характеристиками, выявленными с помощью гедонической регрессии в качестве определяющих цену, и их последующего использованием для внесения поправок на качество, должен обеспечить хорошие результаты (Руководство по индексам потребительских цен ..., 2007).

С точки зрения содержательной трактовки предполагается, что решение потребителя о покупке базируется на стремлении максимизировать полезность (Руководство по индексам потребительских цен ..., 2007). Было бы удобно, если бы коэффициенты гедонических регрессий отражали бы предельные полезности для потребителя тех или иных характеристик продуктов. Однако существующая гедонистическая теория не позволяет давать столь однозначной интерпретации.

В 1960-х годах бытовало представление, сегодня признанное ошибочным, о том, что коэффициенты, полученные гедоническим методом, отражают потребительскую стоимость, а не стоимость затрат. Розен, как это было продемонстрировано в его работе (Rosen, 1974), пришел к выводу о том, что гедонические коэффициенты, как правило, отражают как потребительскую стоимость, так и стоимость затрат производителя, т.е. представляют ситуацию как со стороны предложения, так и со стороны спроса.

Отношения таких коэффициентов могут отражать предельные нормы замещения для потребителей или предельные нормы замещения (трансформации) характеристик для производителей. Здесь существует то, что в эконометрике называется проблемой идентификации, при которой наблюдаемые цены и объемы продаж совместно определяются соображениями спроса и предложения, а их базовые источники не поддаются разделению. Собираемые данные о ценах обусловлены одновременно колебаниями спроса разных потребителей с различными вкусами и предпочтениями и колебаниями предложения разных производителей с различными технологиями.

Однако, несмотря на неоднозначность интерпретации, гедонические регрессии признаны в настоящее время важным аналитическим инструментом. Он пропагандируется в Руководствах таких организаций, как ОЭСР (Triplett, 2002), Евростат (Eurostat, 2001), и широко используется Бюро статистики труда США (Kokoski, Waehrer, Rozaklis, 2001; Moulton, 2001).

Как правило, в руководствах рассматривается теория и многочисленные методики построения индексов на базе таких сопоставимых продуктов, как индекс потребительских цен (ИПЦ) и индекс стоимости жизни (ИСЖ), которые чрезвычайно важны для индексирования заработных плат. Но рассчитывают индексы и для отдельных секторов производства товаров и услуг, например, индексы финансовых или телекоммуникационных услуг. И гедонистический подход оказывается незаменим, если в секторе происходит постоянное и быстрое обновление продуктов, как это имеет место в секторах высоких технологий, и нет возможности пользоваться методиками, основанными на сравнении цен одного и того же набора товаров в различные моменты времени. К этому типу секторов относится и сектор производства компьютерных игр, и его индекс цен тоже может представлять определенный интерес.

Рынку компьютерных игр в настоящее время уделяется довольно много внимания в современной научной литературе, в которой он рассматривается то как часть креативной экономики (Ожегова, Ожегов, 2015), то как часть информационной экономики (Varian, 2000). Большая часть работ имеет характер конъюнктурных обзоров рынка в целом или эмпирических исследований того, какие важно учитывать характеристики игр при конструировании моделей, объясняющих цены. В работе (Varian, 1995) представлен весьма интересный теоретический подход для моделирования выбора потребителя на рынке информационных услуг: покупать продукт или брать его напрокат. Но, к сожалению, модель, которая удачно описывает потребление книг, журналов, фильмов, не подходит для нашего случая. Есть небольшой пласт эконометрических исследований, призванных ответить на некоторые специальные вопросы, например, о том, почему стратегия выпуска версий одной и той же игры может быть оптимальна для разработчика игр с точки зрения ценообразования (Cox, 2017), или о том, какие свойства превращают игру в блокбастер (Cox, 2014). Однако работ, посвященных попыткам поиска более совершенных моделей и методов конструирования индекса цен на компьютерные игры, нам пока не удалось найти. Это обстоятельство служит мотивацией для написания нашей работы и предложения ее на суд читателю.

МОДЕЛЬ И ЕЕ МОДИФИКАЦИИ

Уравнение гедонистической регрессии, с помощью которой будет оцениваться вклад изменения характеристик в цену и от этого вклада отделяться инфляционная составляющая (или индекс цен), будет специфицировано следующим образом:

$$\ln price_i = \beta_0 + \sum_{t=1}^{T} \beta_t X_{it} + \sum_{t=1}^{T} d_t year_{it} + \varepsilon_i, \quad \varepsilon_i \sim N\left(0, \sigma_\varepsilon^2\right), \tag{1}$$

где $price_i$ — цена в рублях, по которой видеоигра i была выпущена на рынок; под X_{ij} понимаются всевозможные наблюдаемые характеристики видеоигры, представленные в табл. 1; t — идентификатор года выпуска игры.

Цена в данном исследовании представлена в виде начальной стоимости продукта. Иными словами, цена устанавливается на момент выпуска видеоигры, и изменения ее в дальнейшем периоде не учитываются.

Набор переменных основан на статистических данных о видеоиграх, собранных с онлайн-сервиса Steam[1].

Коэффициенты при наборе временных дамми-переменных (*year)* в гедонистических регрессиях являются основой для вычисления ценового индекса: $Index_t = e^{d_t}$.

[1] Steam: Библиотека (https://store.steampowered.com/search).

Таблица 1. Характеристики, используемые в исследовании

Переменная	Значение	Тип переменной
id	Идентификатор наблюдения (название видеоигры)	–
year	Год создания игры	Набор дамми-переменных
month	Месяц создания игры	Набор дамми-переменных
game_avards	Число возможных наград в игре	Логарифм числа наград
processor	Процессор	Набор бинарных переменных для наиболее распространенных версий процессоров.
memory	Оперативная память	Непрерывная переменная (в Гб)
storage	Место на жестком диске	Непрерывная переменная (в Гб)
win	Игра поддерживается на платформе Windows	Дамми-переменная
mac	Игра поддерживается на платформе Mac OS X	Дамми-переменная
linux	Игра поддерживается на платформе Linux	Дамми-переменная
vr_supported	Поддержка VR-системы	Дамми-переменная
pand	Период пандемии	Дамми-переменная

Базовая модель будет оцениваться по всей выборке с помощью обычного МНК.

Далее мы приведем модификации модели, призванные тем или иным образом отразить неоднородность цен в зависимости от игровых жанров.

Очевидно, что наблюдаемые и измеримые характеристики далеко не в полной мере способны отразить свойства видеоигры, воздействующие на потребителя. Есть множество атрибутов игры, связанных с сюжетом, жанром, стилем анимации и т.п., которые плохо поддаются оцифровке. Для того чтобы учесть по возможности все это многообразие неизмеримых характеристик, мы введем в уравнение модели специфические эффекты жанров, а затем, варьируя спецификацию этих эффектов, сконструируем несколько модификаций базовой модели.

В первой модификации будет учтен фиксированный эффект жанра на константу с помощью набора фиктивных переменных (k — идентификатор жанра):

$$\ln price_i = \beta_0 + \sum_{t=1}^{T} \beta_t X_{it} + \sum_{k=1}^{K} \gamma_k genre_{ik} + \sum_{t=1}^{T} d_t year_{it} + \varepsilon_i, \quad \varepsilon_i \sim N\left(0, \sigma_\varepsilon^2\right). \tag{2}$$

Смысл этой модификации состоит в том, чтобы непосредственно в самом уравнении регрессии отразить неоднородность цен, вызванную жанровыми особенностями игры. Эта модель также оценивается обычным МНК.

Во второй модификации эффект жанра на цену будет трактоваться как случайный. Это позволит учесть коррелированность наблюдений, относящихся к играм одного и того же жанра в ковариационной матрице регрессионных ошибок. В частности, данный метод рассматривается как один из способов борьбы с неоднородностью.

$$\ln price_i = \beta_0 + u_k + \sum_{t=1}^{T} \beta_t X_{it} + \sum_{t=1}^{T} d_t year_{it} + \varepsilon_i, \quad \varepsilon_i \sim N\left(0, \sigma_\varepsilon^2\right),\ u_k \sim N\left(0, \sigma_u^2\right). \tag{3}$$

Эта модель подлежит оцениванию симуляционным методом максимального правдоподобия с ковариационной матрицей ошибок, в которой диагональные элементы равны $\sigma_\varepsilon^2 + \sigma_u^2$, а для ошибок, относящихся к играм одного жанра в матрице, будут существовать нетривиальные недиагональные элементы σ_u^2.

Третья модификация предназначена для учета случайных эффектов жанра во влиянии ключевой характеристики игры, которой по предварительным исследованиям может быть признаны переменные объема памяти на жестком диске (*Storage*) и объема оперативной памяти (*Memory*). Использование данных переменных обосновано тем, что фланговые жанры преимущественно требуют больше места на памяти устройства, чем менее популярные жанры.

$$\ln price_i = \beta_0 + u_k + (\alpha + \mu_k) Storage_i + \sum_{t=1}^{T} \beta_t X_{it} + \sum_{t=1}^{T} d_t year_{it} + \varepsilon_i, \quad u_k \sim N\left(0, \sigma_u^2\right), \quad \mu_k \sim N\left(0, \sigma_\mu^2\right); \tag{4}$$

$$\ln price_i = \beta_0 + u_k + (\alpha + \mu_k) Memory_i + \sum_{t=1}^{T} \beta_t X_{it} + \sum_{t=1}^{T} d_t year_{it} + \varepsilon_i, \quad u_k \sim N\left(0, \sigma_u^2\right), \quad \mu_k \sim N\left(0, \sigma_\mu^2\right). \tag{5}$$

Поскольку данные переменные фактически отвечают за объем всех файлов видеоигры и объем используемой ими оперативной памяти, можно предположить, что чем большее значение принимают эти переменные, тем качественнее будет игра. На создание видеоигры с большим объемом памяти тратится значительное количество ресурсов компаний-разработчиков, поскольку, как правило, большой объем связан с тщательной проработкой игрового контента, а значит — с более высокими требованиями к качеству программирования и оптимизации алгоритмов. Соответственно, в тех жанрах, где игроку требуется наибольшее погружение в виртуальный мир, потребуется как увеличение памяти на жестком диске, так и использование больших ресурсов оперативной памяти.

Следует отметить, что пользователи не всегда смотрят на данную характеристику при покупке видеоигры, а иногда и вовсе стараются избегать приобретения товара с высокими значениями данного показателя, поскольку объем свободного места на жестком диске может быть ограничен. Несмотря на это, большие объемы памяти, требуемой для установки той или иной видеоигры, могут служить гарантом качества продукта в силу насыщенности игрового контента.

Модель также будет оцениваться симуляционным методом максимального правдоподобия.

Наконец, четвертая модификация будет представлять собой модель индивидуальных регрессий по каждому жанру:

$$\ln price_{ik} = \beta_{0k} + \sum_{t=1}^{T} \beta_{kt} X_{kit} + \sum_{t=1}^{T} d_{tk} year_{kit} + \varepsilon_{ik}, \quad \varepsilon_{ik} \sim N\left(0, \sigma_{\varepsilon}^2\right). \tag{6}$$

В ней предполагается, что влияние всех характеристик на цену неоднородно по жанрам. Таким образом, эта модель призвана исчерпывающим образом учесть всю жанровую неоднородность данных об играх и их ценах в самом уравнении модели.

Далее возникает естественный вопрос, какая модель из представленных позволяет конструировать индекс цен наиболее адекватно имеющимся данным и степени их неоднородности. Для ответа на этот вопрос мы будет использовать модель ANCOVA, которая предоставляет возможность сопоставлять спецификации (1), (2) и (5), аналог теста Хаусмана, посредством которого можно сделать выбор между спецификациями (2) и (3), и тест множителя Лагранжа для выяснения оправданности использования спецификации (4).

ДАННЫЕ

Данные для исследования были получены с онлайн-сервиса Steam при помощи парсинга на языке python с использованием библиотеки BeautifulSoup. После выгрузки число наблюдений составляло 44 000. Далее была проведена стадия предобработки данных, в результате чего число наблюдений сократилось до 12 256.

Объектом наблюдения в нашей базе данных служит *цена*, назначенная разработчиком за конкретную игру в момент ее выпуска для потребителей на российском рынке видеоигр. Следует отметить, что в дальнейших расчетах используются цены, взятые из архивов данного онлайн-сервиса с учетом даты выпуска видеоигры. Предполагается, что в дальнейшем эта цена не меняется, и все пользователи покупают игру именно по этой цене. При этом с помощью многочисленных фильтров выборка была очищена от многообразия платформ, разновидностей изданий игры и от тех видов игр, которые требуют периодического внесения оплаты за подписку в дополнение к первоначальной стоимости покупки игры, от наборов, где содержатся две и более видеоигры и от нескольких выбросов с очень высокими ценами.

Цены доступны в приведенном к 2020 г. уровню с учетом колебаний курса рубля к доллару или иной валюте, к которой была изначально привязана цена компанией-разработчиком.

Также для улучшения качества исследования были удалены наблюдения, в которых были пропущены данные о системных характеристиках видеоигр: размере оперативной памяти, объеме занимаемого на жестком диске места, числе наград внутри видеоигр. Данные об оперативной и HDD-памяти для удобства были приведены к единому измерению — Гб.

Все непрерывные переменные модели прологарифмированы.

Поскольку существует определенная тенденция компаний разрабатывать видеоигры на конкретных оперативных системах, мы отобрали наиболее используемые из всех имеющихся, а именно: Windows 7, Windows 8, Windows 10, Windows XP, Windows Vista. В дополнение к типам ОС

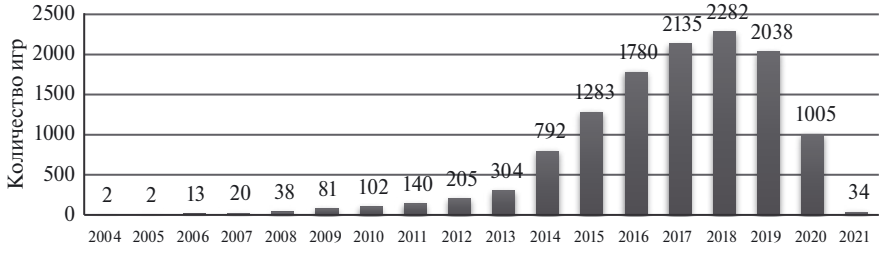

Рис. 1. Распределение числа выпущенных игр по годам

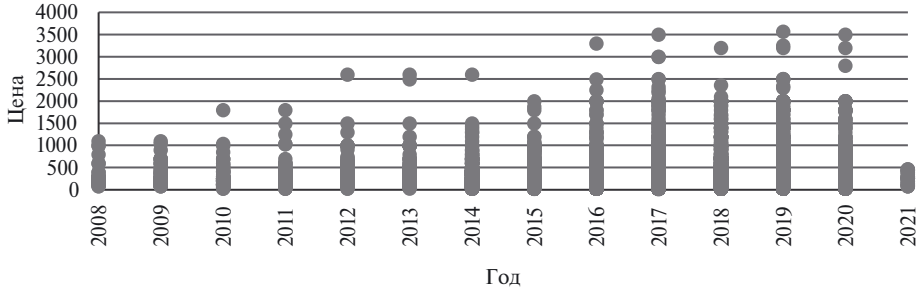

Рис 2. Распределение цен на видеоигры во времени

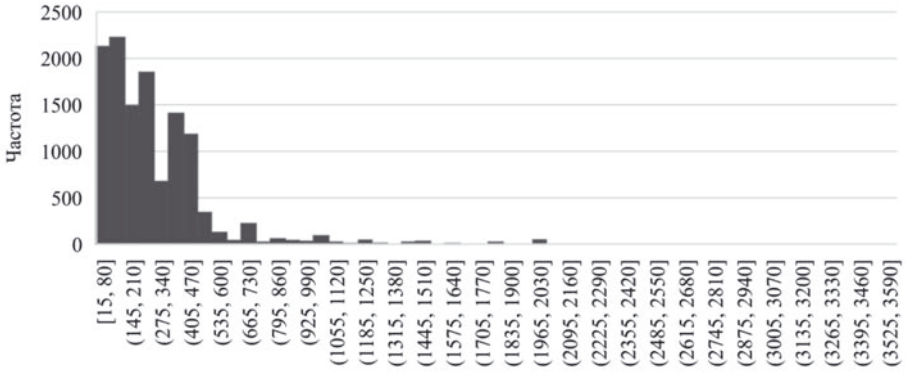

Рис 3. Распределение цен на видеоигры

использовались данные о видах процессоров, из которых также рассматривались самые популярные: I3, I5, I7, AMD.

Число выпускаемых игр год от года росло, о чем свидетельствует диаграмма, приведенная на рис. 1. На рис. 2 показано, как с ростом числа игр рос разброс цен на них.

Основные выводы, которые можно сделать из предварительного визуального анализа данных о ценах, состоят в том, что по мере роста числа выпускаемых игр средние цены на них вели себя нелинейно в период с 2007 по 2021 г.: в 2013 и 2019 г. наблюдались резкие скачки цен, скачок в 2019 г. объясняется началом пандемии, когда спрос на игры резко повысился, а скачок в 2013 г. связан с выходом на рынок игр нового поколения с продвинутыми сценарием и «механикой».

Если теперь обратиться к оценке плотности распределения цен (рис. 3), то видно, что крайне редко покупают игры дороже 1 тыс. руб. Однако есть значимое число игр с практически нулевой ценой. Это связано с политикой разработчиков, имевшей место в ранний период развития рынка, когда тестовые версии игр предоставлялись потребителям почти бесплатно.

Таблица 2. Описательная статистика

№	Жанр	Число наблюдений	Средняя цена видеоигры	Стандартное отклонение стоимости видеоигры	Цена		Корректировка цены / объема		
					min	max	Память на жестком диске	Оперативная память	С учетом COVID-19
1	Action Games	2754	329,39	343,28	28	3500	0,55	0,26	0,1327
2	Adventure Games	1637	296,90	276,35	28	3566	0,42	0,19	0,1387
3	Casual Games	1210	193,94	189,38	16	2191	0,23	0,08	−0,0002
4	Indie Games	3324	210,64	176,75	28	3300	0,18	0,15	0,1186
5	RPG Games	909	367,69	358,29	28	3200	0,50	0,42	0,1550
6	Racing Games	230	368,35	333,73	30	2060	0,40	0,55	0,0558
7	Sexual Content Games	133	58,69	66,54	29	420	−0,04	−0,12	−0,1976
8	Simulation Games	676	351,38	338,71	30	3200	0,47	0,28	0,0896
9	Sports Games	184	401,84	470,71	29	3000	0,35	0,30	0,0980
10	Strategy Games	981	340,53	303,76	28	2600	0,52	0,32	0,0748

Данные табл. 2 анализа описательных статистик показывает, как различаются средние цены и их размах по жанрам за весь период, а также сколь разнообразно устроена корреляция цен с характеристиками объема памяти (на жестком диске и оперативной) и дамми-переменной, отвечающей за изменение цены после начала пандемии, в зависимости от жанра.

Для более качественного анализа были удалены жанры: бесплатные игры («Free to Play Games»), игры с ранним доступом («Early Access Games»), жестокие игры («Violent Games»), игры 18+ («Nudity Games»), массовые многопользовательские игры («Massively Multiplayer Games»), поскольку число наблюдений в них мало, не превышает 100.

Столбец, где помещаются средние значения цен по жанрам, косвенно служит подтверждением идеи дифференциации константы гедонистической регрессии по жанрам, а последние три столбца показывают, что степень, и даже знак влияния ключевых технических характеристик игр на цену, может существенно варьировать в зависимости от жанра. Также очень неодинаково по жанрам влияние пандемии на цены.

В следующем разделе работы мы попытаемся выяснить, насколько сильно учет в моделях обнаруженных жанровых особенностей продуктов игрового рынка способен повлиять на динамику ценового индекса и различается ли по жанрам вклад инфляционных эффектов и эффектов технологических изменений в цену.

ОСНОВНЫЕ ЭМПИРИЧЕСКИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Основная цель этого раздела — изучить, как меняются оценки ценового индекса при усложнении гедонистической модели.

Рис. 4 позволяет увидеть, как выглядит составляющая цены, отвечающая за инфляцию и флуктуации спроса на рынке компьютерных игр, с точки зрения моделей, по-разному элиминирующих составляющую цены, отвечающую за технологические изменения в характеристиках продуктов игровой индустрии:

*index*_0 — индекс цен, рассчитанный по базовой модели (1);

*index*_1 — индекс цен, рассчитанный по модели с детерминированными эффектами жанра (2);

index_g_re — индекс цен со случайными эффектами жанра (3);

index_g_re_pand — индекс цен со случайными эффектами жанра в переменной, отвечающей за период пандемии (3);

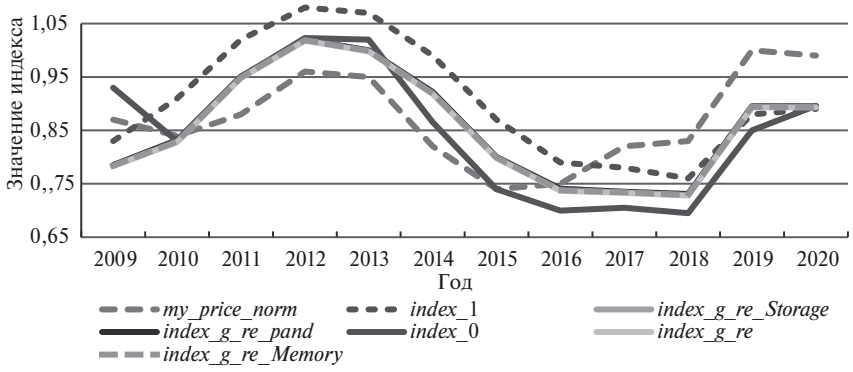

Рис 4. Цена и ценовые индексы с учетом и без учета характеристик и жанровой неоднородности самих цен и ее влияния на вклад характеристик в цены

index_g_re_Storage — индекс цен со случайными эффектами жанра в объеме на жестком диске (4);

index_g_re_Memory — индекс цен со случайными эффектами жанра в объеме оперативной памяти (5).

Показатель *my_price_norm* — усредненные по периодам цены на видеоигры, нормированные на максимальное значение, приведен на графике для иллюстрации динамики фактических цен.

На рис. 4 видно, что в целом все модельные индексы воспроизводят довольно близко общую конфигурацию динамики средних цен (среднегодовых цен, нормированных на фактический глобальный максимум) за исследуемый период. Однако в зависимости от модели различается длительность периода, в который составляющая цен, связанная со всплесками спроса, превалировала над технологической (значение индекса превышает 1): по моделям с фиксированным эффектом жанра на константу этот период продолжался с 2011 до 2014 г., а согласно базовой модели и моделям со случайным эффектом жанра на константу или на константу и наклон при избранном ключевом показателе этот период длится только два года — 2012 и 2013 г.

В целом же технологическая компонента цены преобладает над компонентой, отражающей колебания спроса. Наименьшее значение составляющей спроса приходится на 2016–2018 гг. И даже в период пандемии, когда наблюдался резкий скачок цен на игры, он был в меньшей степени связан с изменениями спроса, чем с технологическими изменениями в продуктах. Интерес представляет такой парадокс: если модель учитывает набор характеристик, но не берет во внимание жанровую неоднородность значений этих характеристик (*index*_0), то оценка составляющей спроса в цене оказывается значительно выше, чем у тех моделей, которые так или иначе уделяют внимание учету жанровой неоднородности, однако начиная с 2018 г., эти различия в оценках нивелируются.

Исходя из результатов динамики представленных индексов, можно утверждать, что, безусловно, технологический прогресс в значительной мере связан с данной отраслью, а поэтому фиксированные эффекты будут наиболее сильно выражаться в значении индекса. Несмотря на это случайные эффекты также лучше объясняют динамику поведения стоимости видеоигр, чем базовая модель. Следует заметить, что с 2015 г. у индексов прослеживается запаздывающая динамика по сравнению со средней стоимостью игр. Это может быть связано с экономической ситуацией в мире после 2014 г., поскольку многие игры производились зарубежом, что впоследствии привело к сильному росту цен.

Расхождения в моделях с фиксированными эффектами (FE) и случайными эффектами (RE) относительно оценки длительности периодов существенны и порождают вопрос о том, какую из моделей можно считать состоятельной. Традиционный тест Хаусмана, применяемый в анализе панельных данных, здесь неприменим. Однако можно использовать идею вспомогательной тестовой регрессии Мундлака.

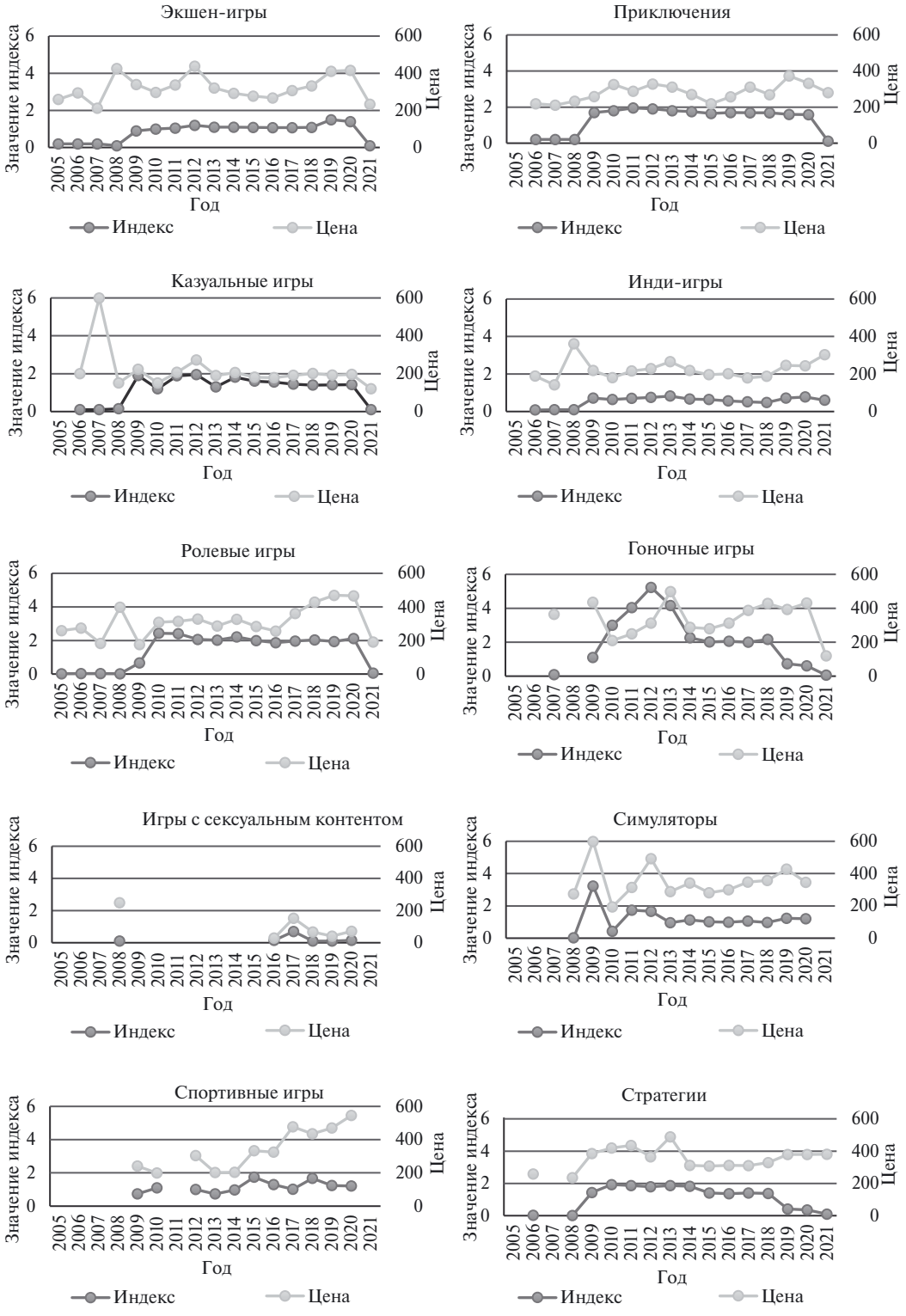

Рис. 5. Жанровое разнообразие цен и индивидуальные ценовые индексы для отдельных игровых жанров

На основании результата проведенного теста ($F = 64{,}61$, *p-value* $= 0{,}00$) было выявлено, что модель с детерминированными ненаблюдаемыми эффектами жанров более адекватно описывает имеющиеся данные, нежели модель со случайными эффектами. Иными словами, жанровая неоднородность цен весьма значительна и наиболее достоверно картину отражает *index*_1. Что же касается индексов, построенных с учетом со случайных эффектов жанров, в которых учтена коррелированность цен продуктов одного жанра, то тест отношения правдоподобия отдает им предпочтение по сравнению с базовой моделью, пренебрегающей какими бы то ни было эффектами жанров на цены (например, для модели, по которой рассчитывался индекс *index_g_re*, статистика $LR = 624{,}21$ с *p-value* $= 0{,}00$, для остальных случайных моделей результаты практически те же).

Если теперь предположить, что существенны не только ненаблюдаемые эффекты жанров на константу, но и влияние технических характеристик игр на цены в различных жанрах различаются, то целесообразно рассмотреть модель отдельных регрессий по жанровым подвыборкам. Результаты оценки индексов цен в этом случае показаны на рис. 5.

Из данных на рис. 5 видно, насколько различна динамика отдельных индексов по жанрам. В некоторых случаях наблюдений слишком мало, чтобы можно было составить четкое представление о поведении индекса. Однако теперь становится понятным происхождение всплеска в сводном рыночном индексе в окрестности 2013 г.: он связан с выходом на рынок продуктов нового игрового жанра «Игра — симулятор» и скачком цен на игры в жанре «Гоночные игры». Также, как уже отмечалось ранее, стоимость многих жанров начала расти в 2015 г. из-за сложившейся экономической и политической ситуации в мире.

В заключение остается обсудить, какие дополнительные возможности дает оценка гедонистических моделей с такими случайными эффектами жанра на наклоны при ключевых переменных, как объем оперативной памяти (*Memory*), объем памяти на жестком диске (*Storage*) и дамми для учета эффекта периода пандемии (*Pand*). Здесь следует отметить, что из-за сильной мультиколлинеарности технически затруднительно оценивать модели с фиксированными эффектами жанров на наклоны, в моделях же со случайными эффектами жанра на наклоны при ключевых переменных мультиколлинеарности не возникает.

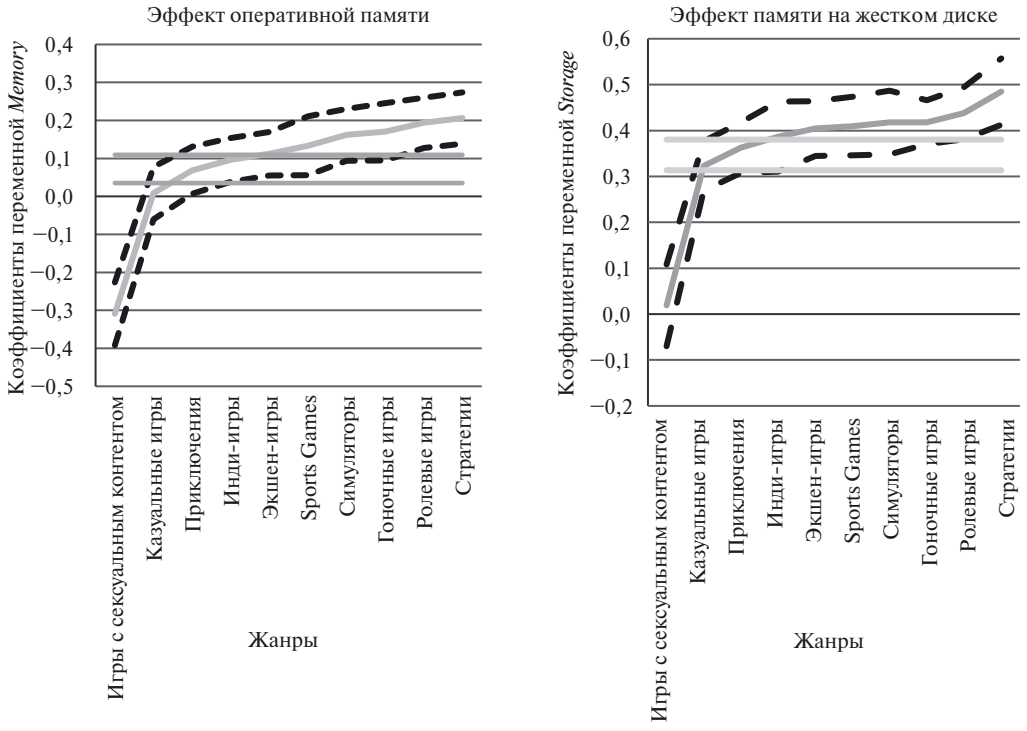

Рис. 6. Жанровая диверсификация ценовой эластичностей ключевых переменных

С точки зрения визуального анализа нет отличий в моделях со случайным эффектом жанра только на константу и моделей со случайным эффектом жанра еще и на наклоны. Однако эти модели позволяют оценить влияние важных технических характеристик игр с учетом различия между жанрами и сопоставить эти оценки с теми, которые дают модели отдельных регрессий по жанрам.

Рис. 6 демонстрирует результаты оценок эффектов объема оперативной памяти (*Memory*) и объема памяти на жестком диске (*Storage*), обнаруженные для различных жанров. Из этого графика хорошо видно, что существуют отдельные жанры, для которых эластичности ключевых переменных статистически значимо отличаются от среднего. Наиболее сильные эффекты характерны для таких жанров, как ролевые игры, экшн-игры, стратегии, гоночные игры. Данные жанры являются наиболее высокотехнологичными, поскольку разработка игр в них требует наибольших усилий разработчика. В то же время существуют жанры второстепенного плана, например инди-игры, казуальные игры, которые создаются массово, из-за чего качество таких видеоигр иногда страдает. Однако они могут занимать большой объем жесткого диска, так как после выпуска разработчик дополнительно выпускает новый платный контент в виде дополнений, которые, в свою очередь, влияют на объем этих игр.

Что касается эффекта пандемии на цену, то ни в среднем, ни в отдельных жанрах обнаружить его статистически значимых проявлений не удалось.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе представлены гедонистические ценовые регрессии и попытка конструирования в рамках гедонистического подхода индексов цен на компьютерные игры по данным о ценах и характеристиках продуктов, реализованных на российском рынке в период с 2009 по 2020 г. Поскольку цены были предварительно продефлированы (это автоматически делается на сайте, с которого собирались данные для исследования), инфляционная компонента цены не обсуждается, но можно выявить периоды, когда всплески спроса в большей мере определяли цены, чем изменения в качестве продуктов. Исследование индекса позволило выявить период, когда составляющая спроса в цене превалировала над технологической, однако оценка продолжительности этого периода варьирует в рамках различных модификаций модели: 2012–2013 гг. — в модели со случайным эффектом жанра и 2011–2015 гг. — в модели с фиксированным эффектом.

В работе также построены индексы отдельных жанров и исследована жанровая неоднородность влияния ключевых факторов на цену: объема места на жестком диске и объема оперативной памяти. Интересным выводом оказалось довольно тесное совпадение ценовых индексов у жанров «инди» и «приключения», так как оба жанра довольно сильно отличаются по диапазону цен. Во многом это может быть связано с некоторой схожестью этих жанров, однако их системные характеристики сильно разнятся. Следует отметить, что наибольшее влияние на стоимость видеоигр оказал параметр, отвечающий за объем памяти на жестком диске. Однако в дальнейшем данная тенденция может измениться, поскольку в последнее время разработчики нацелены на улучшение формата продукта. Такой переход характеризуется внедрением более качественного контента, который поддерживается передовыми видеокартами и процессорами. В свою очередь, размер контента, который может выражаться во времени, затрачиваемом на полное прохождение видеоигры, постепенно снижается.

Дальнейший этап исследования может включать рассмотрение влияния разных типов процессоров и видеокарт на стоимость видеоигр и связь ценообразования на видеоигры с увеличением стоимости этих компонент.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

Берндт Э.Р. (2005). *Практика эконометрики. Классика и современность.* Пер. с англ.к.э.н. Е.Н. Лукаша; под ред. С.А. Айвазяна. Москва: Юнити-Дана. 864 с. [**Berndt E.R.** (2005). *The practice of econometrics: Classics and contemporary*. Moscow: Juniti-Dana. 864 p. Originally published in 1996, Reading (MA): Addison-Wesley Publ. Co.]

Ожегова Л.А., Ожегов А.Ю. (2015). Региональные особенности мирового рынка игровой индустрии. *Ученые записки Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского. География. Геология*. Т. 1 (2). С. 24–32. [**Ojegova L.A., Ojegov A. Yu.** (2015). Regional features of the world market of the game industry. *V.I. Vernadsky Crimean Federal University. Geography. Geology*, 1 (2), 24–32 (in Russian).]

Руководство по индексу потребительских цен: теория и практика (2007). МОТ, МВФ, ОЭСР, Евростат, ЕЭК ООН, Всемирный банк. Вашингтон: Международный валютный фонд. ISBN: 92-2-113699-X. [Consumer price index manual: Theory and practice. (2007). International Labour Organization, OECD, The World Bank, The United Nations Economic Commission for Europe, Statistical Office of the European Communities. Luxembourg (in Russian).]

Турунцева М.Ю., Зямалов В.Е. (2022). Гедонистические ценовые индексы: опыт применения к российскому рынку» // *Экономический журнал Высшей школы экономики*. 26 (3).429–449. DOI: 10.17323/1813-8691-2022-26-3-429-449 [**Turuntseva M.Y., Zyamalov V.E.** (2022). Hedonic price indices: Application to the Russian market. *HSE Economic Journal*, 26 (3), 429–449. DOI: 10.17323/1813-8691-2022-26-3-429-449 (in Russian).]

Cox J. (2014). What makes a blockbuster video game? An empirical analysis of US sales data. *Managerial and Decision Economics*, 35 (3), 189–198. DOI: 10.1002/mde.2608

Cox J. (2017). Play it again, Sam? Versioning in the market for second-hand video game software. *Managerial and Decision Economics*, 38 (4), 526–533. DOI: 10.1002/mde.2800

Eurostat (2001). *Economy — wide material flow accounts and derived indicators: A methodological guide*. Office for Official Publications of the European Communities.

Kokoski M., Waehrer K., Rozaklis P. (2001). *Using hedonic methods for quality adjustment in the CPI: The consumer audio products component*. US Department of Labor, Bureau of Labor Statistics, Office of Prices and Living Conditions.

Moulton B.R. (2001). The expanding role of hedonic methods in the official statistics of the United States. *Proceedings of a Symposium on Hedonic Methods*. Wiesbaden: Deutches Bundesbank and German Federal Statistical Office.

Rosen S. (1974). Hedonic prices and implicit markets: Product differentiation and pure competition. *Journal of Political Economy*, 82, 34–49. DOI: 10.1086/260169

Triplett J.E. (2002). Handbook on quality adjustment of price indexes for information and communication technology products. *OECD Directorate for Science, Technology and Industry*. Paris: OECD. DOI: 10.1787/643587187107

Varian H.R. (1995). *Pricing information goods*. University of Michigan. DOI: 10.1109/ICSSSM.2013.6602532

Varian H.R. (2000). Buying, sharing and renting information goods. *The Journal of Industrial Economics*, 48 (4), 473–488. DOI: 10.1111/1467-6451.00133

Price index for computer games: What is hidden from the naked eye?

© 2024 M.V. Arslanov, T.A. Ratnikova

M.V. Arslanov,
HSE University, Moscow, Russia; e-mail: markarslanov8@gmail.com,

T.A. Ratnikova,
HSE University, Moscow, Russia; e-mail: taratnikova@yandex.ru

Received 30.07.2023

Abstract. This paper presents a study of the price dynamics of a wide range of video games in the time period from 2008 to 2020. During the research, a necessary database for analysis was created, video game prices were modeled using econometric methods, and price indices were constructed for various game genres: RPG (Role-Playing Game), strategy (Strategy), action (Action), adventure games (Adventure), causal games (Casual), indie games (Indie), simulators (Simulators) etc. Hypothetically, the price range of video games by genre and system requirements were due to the different amount of effort required to create them. During the construction of hedonistic price indices, prices were cleared from the characteristics of the quality of products (computer games). Video game system parameters were used as characteristics. The work also uses various approaches to modify hedonistic indices by considering genre heterogeneity. Thanks to the study, it is possible to track the dynamics of the behavior of the cost of video games over the considered period of time, with the representation of lagging and advancing trends. Genre diversification of the price elasticity of key variables used during the construction of models was provided.

Keywords: hedonic regressions; video games; video game genres; price indices; fixed-effect models; random effect models; multilevel mixed-effect models.

JEL Classification: C33, C51, C81.

UDC: 330.43.

For reference: **Arslanov M.V., Ratnikova T.A.** (2024). Price index for computer games: What is hidden from the naked eye? *Economics and Mathematical Methods*, 60, 3, 82–93. DOI: 10.31857/S0424738824030073 (in Russian).

ЭКОНОМИКА И МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ, 2024, том 60, № 3, с. 94–106

МАТЕМАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЭКОНОМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

Агент-ориентированная модель трехуровневого иерархического минимаксного управления региональным промышленным комплексом

© 2024 г. В.В. Акбердина, А.Ф. Шориков, Г.Б. Коровин, Д.В. Сиротин

В.В. Акбердина,
Институт экономики УрО РАН, Екатеринбург; e-mail: akberdina.vv@uiec.ru

А.Ф. Шориков,
Институт экономики УрО РАН, Екатеринбург; e-mail: shorikov.af@uiec.ru

Г.Б. Коровин,
Институт экономики УрО РАН, Екатеринбург; e-mail: korovin.gb@uiec.ru

Д.В. Сиротин,
Институт экономики УрО РАН, Екатеринбург; e-mail: sirotin.dv@uiec.ru

Поступила в редакцию 14.07.2023

Работа выполнена в соответствии с планом НИР Института экономики УрО РАН.

Аннотация. Опыт развитых стран свидетельствует об актуальности проблем управления территориальными промышленными комплексами. Необходимо создавать применимые на практике модели управления, опирающиеся на современные подходы и позволяющие его оптимизировать. Методологической базой исследования послужили теории экономики промышленности, экономико-математического моделирования, оптимального управления, оптимизации, игр. Методическую основу модели составляют агент-ориентированный подход, методы экономико-математического моделирования, методы построения систем управления социально-экономическими системами, минимаксный подход. В статье предложена трехуровневая модель управления региональным промышленным комплексом, определена ее иерархическая субъектно-объектная структура. Параметры промышленных объектов представлены в виде фазового вектора, а для каждого агента формализована структура управляющих и информационных связей и алгоритмы управляющих воздействий. Сформулированы решаемые в ходе использования модели задачи формирования множеств минимаксных управляющих воздействий для каждого агента; предложен общий алгоритм по выбору оптимальных управляющих воздействий. Модель позволяет реализовать ее в программной среде и создать инструмент моделирования процессов управления промышленным комплексом региона, а в дальнейшем — гибкий расширяемый программный инструментарий для управления промышленностью на региональном уровне.

Ключевые слова: промышленность, региональный промышленный комплекс, управление, агент-ориентированное моделирование, минимаксный подход.

Классификация JEL: L52, C54, L60.

УДК: 338.2.

Для цитирования: **Акбердина В.В., Шориков А.Ф., Коровин Г.Б., Сиротин Д.В.** (2024). Агент-ориентированная модель трехуровневого иерархического минимаксного управления региональным промышленным комплексом // *Экономика и математические методы.* Т. 60. № 3. С. 94–106. DOI: 10.31857/S0424738824030089

1. ВВЕДЕНИЕ

Промышленный комплекс представляет собой сложный объект управления, имеющий многоуровневую субъектно-объектную структуру. Промышленная система состоит из многомерной системы материальных, управляющих и информационных связей (Смородинская, 2017) и находится под влиянием технологических социальных и экономических процессов. Модель управления промышленным комплексом региона должна учитывать сложности, связанные с корректностью понимания состава объектов такого комплекса, с целевыми ориентирами субъектов управления и критериями оптимальности управления промышленным комплексом. Экономическая наука, несмотря на ряд достижений, нуждается в разработке новых подходов к моделированию развития

региональных промышленных комплексов, в создании моделей и инструментов, которые могли бы иметь практическое применение.

Данная статья развивает полученные ранее результаты (Акбердина, Шориков, 2022; Коровин, 2022; Сиротин, 2019; Шориков, 2006) построения детерминированной экономико-математической модели прогнозирования состояния и оптимизации управления промышленностью на основе трехуровневой иерархической дискретной управляемой динамической системы. Целью настоящего исследования является разработка на основе выбранного подхода структуры экономико-математической модели, формализации и математического описания объектов и субъектов управления, информационных и управляющих связей в модели, алгоритмов управления объектами модели.

Исследование опирается на теории отраслевых рынков, экономического роста, экономики промышленности, системной динамики, диффузии инноваций, оптимального управления, игр с применением методов системного, экономико-математического и статистического анализов, эконометрического моделирования и минимаксного подхода.

Для моделирования промышленности отдельных территорий применяется широкий круг методов, среди которых методы статистического анализа, регрессионного, факторного анализа, экстраполяции, методы исследования экспертного мнения, методы выбора оптимальных решений, имитационные методы, которые используются для построения прогнозов социально-экономического развития территорий (Ивантер, 2016; Широв, Гусев, Янтовский, 2012) и отраслей промышленности (Maaouane et al., 2021).

В числе наиболее значимых российских моделей на базе данных методов можно выделить макроэкономическую модель «RUSEC» и ее развитие (Макаров, Бахтизин, Бахтизина, 2005); агент-ориентированную региональную модель «Губернатор» (ЦЭМИ РАН) (Сушко, 2012); комплекс моделей на основе межотраслевой модели RIM, включающий региональную социально-экономическую модель NORM (ИНП РАН) (Широв, Янтовский, 2017); макроструктурную модель российской экономики (Центр фундаментальных исследований ГУ ВШЭ); сценарную динамическую модель демографической ситуации (ИИММ КНЦ РАН) (Маковеев, 2016) и др. Функции имитационных и системно-динамических моделей, как правило, включают возможности управленческого моделирования отраслевых комплексов, межотраслевых связей, управления производственной программой, бизнес-процессами и др.

2. МЕТОДОЛОГИЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА

Для моделирования промышленного комплекса в исследовании выбрана методология агент-ориентированного моделирования (АОМ), которая позволяет рассматривать экономическую систему как сообщество агентов, описывать из связи, ресурсы, стратегии и алгоритмы действий отдельных субъектов. Отношение к экономической системе как к совокупности разнородных агентов и их координации на примере промышленности Дж. Стиглиц обосновывал децентрализованным поведением, радикально различными целями, разнородностью агентов (Cimoli et al., 2006).

Если рассматривать только наиболее значимые исследования, основанные на АОМ, необходимо указать на работы В.Л. Макарова и А.Р. Бахтизина с соавторами (ЦЭМИ РАН), которые легли в основу отечественной научной базы компьютерного симуляционного моделирования экономических систем, в том числе с использованием агент-ориентированного подхода. Так, на основе модели общего экономического равновесия и нейросетевых алгоритмов была создана АОМ социально-экономической системы (Бахтизин, 2007; Макаров, Бахтизин, Сушко, 2020; Макаров, Бахтизин, Сушко, 2017). Применению АОМ в исследованиях развития промышленного комплекса России и субъектов РФ в разрезе отдельных видов деятельности посвящены работы (Горчакова, Шабалов, 2017;Медведев, Аксенов, 2012; Кислицын, Городничев, 2021).

Значимая комплексная зарубежная модель АОМ «Eurace» была разработана в 2009 г. совместными усилиями ряда европейских стран[1] (Cincotti, Raberto, Teglio, 2010). Для данной модели была создана методология, известная как ACE (agent-based computational economics), которая моделирует рыночное взаимодействие основных секторов экономики стран Евросоюза на базе реальных экономических механизмов. По результатам некоторых исследований использование методов машинного обучения и АОМ повышает общую производительность систем поддержки и принятия

[1] Германия, Великобритания, Франция, Италия и др.

решений (Turgut, Bozdag, 2022; Bonabeau, 2002). В числе сфер активного применения АОМ можно отметить исследование влияния цифровых технологий на деятельность различных отраслей и на экономику в целом (Chanias, Myers, Hess, 2019; Stummer et al., 2015; и др.).

Описанные опыт и выявленные особенности АОМ дали возможность предложить модель иерархического управления и прогнозирования развития региональных промышленных комплексов. Модель состоит из трех уровней управления — федерального, регионального и уровня предприятий, объединенных по видам деятельности. При этом в качестве объектов управления мы рассматриваем совокупности предприятий, относящихся к одному классу промышленного вида деятельности, в соответствие с классификацией ОКВЭД. Федеральный уровень управления является доминирующим, которому подчиняется региональный уровень управления, доминируя над уровнем управления видами деятельности. Виды деятельности (классы, в соответствии с классификацией ОКВЭД) регионального промышленного комплекса рассматриваются как объекты, управляемые соответствующими подчиненными агентами.

Выбор решений об управлении агентами производится на основе минимаксного подхода (Красовский, Субботин, 1974; Шориков, 1997) в рамках развития полученных ранее результатов (Шориков, 2006; Шориков, 2022). Предлагаемый подход используется для формирования общей экономико-математической модели, в которой формулируется задача гарантированной (минимаксной) оптимизации функционирования регионального промышленного комплекса, в виде задачи трехуровневого иерархического минимаксного управления региональным промышленным комплексом.

Для каждого объекта модели формируется его фазовый вектор, состоящий из групп параметров: атрибуты (ключевые признаки); финансово-экономические параметры; реакции на возможные управляющие воздействия регионального и федерального уровней; реакции на возможные риски и возмущения (случайные или детерминированные события в экономике).

Выбранный методологический подход, с одной стороны, реализует близкую к фактической детализированную структуру промышленного комплекса, систему управления видами промышленной деятельности, предусматривает информационные и управленческие связи, возникающие в процессе управления. С другой стороны, подход к выбору оптимального управляющего воздействия позволяет просчитывать широкий спектр сценариев развития промышленного комплекса, учитывать важные риски, ограничения, ориентироваться на различные целевые функции для каждого агента. Кроме того, пошаговые расчеты реализуют принцип адаптивности в управлении промышленным комплексом региона.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

3.1. Концепция агент-ориентированной модели иерархического минимаксного управления региональным промышленным комплексом

Приведем формализацию мультиагентной модели динамики объектов, ограничений и целевых функций агентов регионального промышленного комплекса при наличии рисков и возмущений, информационной неопределенности.

Модель предполагает, что региональный промышленный комплекс состоит из n видов деятельности, входящих в добывающую и обрабатывающую отрасли, $n \in \mathbf{N}$, где $\mathbf{N}$ — множество всех натуральных чисел.

Региональный промышленный комплекс в целом рассматривается как *основной объект* $\mathbf{I}$, управляемый *доминирующим агентом* E, отождествляемым с региональным органом управления промышленным комплексом, который подчиняется *федеральному агенту* P, отождествляемому с органом управления промышленностью РФ. Отдельные виды деятельности регионального промышленного комплекса рассматриваются как *вспомогательные объекты* $\mathbf{I}_i$, $i \in \{1, \ldots, n\}$, управляемые соответствующими *подчиненными агентами* E_i, подчиняющимися агентам P и E и имеющими различные цели и информацию для принятия управленческих решений. Процесс управления региональным промышленным комплексом рассматривается на заданном целочисленном промежутке времени $\{0, \ldots, T\}$, $T \in \mathbf{N}$.

Пусть в конечномерном векторном пространстве $\mathbf{R}^{\mu}$ при фиксированном $\mu \in \mathbf{N}$ *множество всех конечных подмножеств* обозначается как $\boldsymbol{\Sigma}(\mathbf{R}^{\mu})$, а $\boldsymbol{\Omega}(\mathbf{R}^{\mu})$ — *множество всех выпуклых многогранников-компактов (с конечным числом вершин)*, содержащихся в $\mathbf{R}^{\mu}$ (по определению полагается, что одноэлементные множества в рассматриваемых конечномерных векторных пространствах являются выпуклыми многогранниками-компактами).

Предполагается, что *динамика основного объекта* **I**, управляемого *доминирующим агентом E*, описывается векторно-матричным линейным рекуррентным уравнением

$$\mathbf{X}(t+1) = \mathbf{A}(t)\mathbf{X}(t) + \mathbf{B}(t)\mathbf{W}(t) + \mathbf{C}(t)\mathbf{U}(t) + \mathbf{D}(t)\mathbf{V}(t) + \mathbf{E}(t)\mathbf{S}(t), \ \mathbf{X}(0) = \mathbf{X}_0, \tag{1}$$

параметры которого должны удовлетворять заданным ограничениям:

– фазовый вектор $\mathbf{X}(t) = \left(X_1(t), \ldots, X_k(t)\right)'$ объекта **I** —

$$\mathbf{X}(t) \in \mathbf{X}_*(t) \in \boldsymbol{\Omega}\left(\mathbf{R}^k\right) \quad \forall t \in \{0, \ldots, T\}; \tag{2}$$

– вектор управления $\mathbf{W}(t) = \left(W_1(t), \ldots, W_m(t)\right)'$ агента P —

$$\mathbf{W}(t) \in \mathbf{W}_*(t) \in \boldsymbol{\Sigma}\left(\mathbf{R}^m\right) \quad \forall t \in \{0, \ldots, T-1\}; \tag{3}$$

– вектор управления $\mathbf{U}(t) = \left(U_1(t), \ldots, U_p(t)\right)'$ агента E —

$$\mathbf{U}(t) \in \mathbf{U}_*\left(t; \mathbf{W}(t)\right) \in \boldsymbol{\Sigma}\left(\mathbf{R}^p\right) \quad \forall t \in \{0, \ldots, T-1\}, \ \mathbf{W}(t) = \left(W_1(t), \ldots, W_m(t)\right) \in \mathbf{W}_*(t); \tag{4}$$

– вектор неконтролируемых рисков и возмущений $\mathbf{V}(t) = \left(V_1(t), \ldots, V_q(t)\right)'$, влияющих на функционирование объекта **I**, —

$$\mathbf{V}(t) \in \mathbf{V}_*(t) \in \boldsymbol{\Sigma}\left(\mathbf{R}^q\right) \ \forall t \in \{0, \ldots, T-1\}; \tag{5}$$

– вектор спроса $\mathbf{S}(t) = \left(S_1(t), \ldots, S_s(t)\right)'$ на продукцию объекта **I** —

$$\mathbf{S}(t) \in \mathbf{S}_*(t) \in \boldsymbol{\Omega}\left(\mathbf{R}^s\right) \quad \forall t \in \{0, \ldots, T-1\}. \tag{6}$$

Предполагается, что *динамика объекта* $\mathbf{I}_i$, $i \in \{1, \ldots, n\}$, управляемого *подчиненным агентом* E_i, описывается векторно-матричным линейным рекуррентным уравнением

$$\begin{gathered}\mathbf{X}^{(i)}(t+1) = \mathbf{A}^{(i)}(t)\mathbf{X}^{(i)}(t) + \mathbf{B}^{(i)}(t)\mathbf{W}(t) + \mathbf{C}^{(i)}(t)\mathbf{U}(t) + \mathbf{D}^{(i)}(t)\mathbf{U}^{(i)}(t) + \mathbf{E}^{(i)}(t)\mathbf{V}^{(i)}(t) + \\ + \mathbf{G}^{(i)}(t)\mathbf{S}^{(i)}(t), \quad \mathbf{X}^{(i)}(0) = \mathbf{X}_0^{(i)},\end{gathered} \tag{7}$$

параметры которого должны удовлетворять ограничениям:

– фазовый вектор $\mathbf{X}^{(i)}(t) = \left(X_1^{(i)}(t), \ldots, X_{k_i}^{(i)}(t)\right)'$ объекта $\mathbf{I}_i$ —

$$\mathbf{X}^{(i)}(t) \in \mathbf{X}_*^{(i)}(t) \in \boldsymbol{\Omega}\left(\mathbf{R}^{k_i}\right) \ \forall t \in \{0, \ldots, T\}; \tag{8}$$

– вектор управления $\mathbf{U}^{(i)}(t) = \left(U_1^{(i)}(t), \ldots, U_{p_i}^{(i)}(t)\right)'$ агента E_i ($i \in \{1, \ldots, n\}$) —

$$\begin{gathered}\mathbf{U}^{(i)}(t) \in \mathbf{U}_*^{(i)}\left(t; \mathbf{W}(t), \mathbf{U}(t)\right) \in \boldsymbol{\Sigma}\left(\mathbf{R}^{p_i}\right) \ \forall t \in \{0, \ldots, T-1\}, \ \forall \mathbf{W}(t) \in \mathbf{W}_*(t) \subset \mathbf{R}^m, \\ \forall \mathbf{U}(t) \in \mathbf{U}_*\left(t; \mathbf{W}(t)\right) \subset \mathbf{R}^p;\end{gathered} \tag{9}$$

– вектор неконтролируемых возмущений (рисков) $\mathbf{V}^{(i)}(t) = \left(V_1^{(i)}(t), , \ldots, V_{q_i}^{(i)}(t)\right)'$, влияющих на функционирование объекта $\mathbf{I}_i$, —

$$\mathbf{V}^{(i)}(t) \in \mathbf{V}_*^{(i)}(t) \in \boldsymbol{\Sigma}\left(\mathbf{R}^{q_i}\right) \quad t \in \{0, \ldots, T-1\}; \tag{10}$$

– вектор спроса $\mathbf{S}^{(i)}(t) = \left(S_1^{(i)}(t), \ldots, S_{s_i}^{(i)}(t)\right)$ на продукцию объекта $\mathbf{I}_i$ деятельности i —

$$\mathbf{S}^{(i)}(t) \in \mathbf{S}_*^{(i)}(t) \in \boldsymbol{\Omega}\left(\mathbf{R}^{s_i}\right) \quad t \in \{0, \ldots, T-1\}. \tag{11}$$

В векторно-матричном рекуррентном уравнении (1), $\mathbf{A}(t)$, $\mathbf{B}(t)$, $\mathbf{C}(t)$, $\mathbf{D}(t)$ и $\mathbf{E}(t)$ — действительные матрицы размерностей $(k \times k)$, $(k \times m)$, $(k \times p)$, $(k \times q)$ и $(k \times s)$ соответственно, в векторно-матричном рекуррентном уравнении (7), $\mathbf{A}^{(i)}(t)$, $\mathbf{B}^{(i)}(t)$, $\mathbf{C}^{(i)}(t)$, $\mathbf{D}^{(i)}(t)$, $\mathbf{E}^{(i)}(t)$ и $\mathbf{G}^{(i)}(t)$, $i \in \{1, \ldots, n\}$ — действительные матрицы размерностей $(k_i \times k_i)$, $(k_i \times m)$, $(k_i \times p)$, $(k_i \times p_i)$, $(k_i \times q_i)$ и $(k_i \times s_i)$ соответственно, элементы которых определяются на основании статистических данных рассматриваемой системы (например, с помощью эконометрических или экспертных методов).

Сформированная управляемая динамическая система (1)–(11) является экономико-математической моделью, описывающей динамику и имеющиеся ограничения на основные элементы рассматриваемого регионального промышленного комплекса.

3.2. Описание информационных, управляющих связей в трехуровневой мультиагентной иерархической модели регионального промышленного комплекса

Деятельность доминирующего агента E, управляющего региональным промышленным комплексом, — основным объектом $\mathbf{I}$, координирует федеральный орган управления промышленностью РФ — федеральный агент P. Деятельность каждого подчиненного агента E_i ($i \in \{1,...,n\}$), управляющего видом деятельности i (объект $\mathbf{I}_i$), координируют агенты P и E. Для агента E все агенты E_i, $i \in \{1,...,n\}$, рассматриваемой системы равнозначны.

Предполагается, что $\forall t \in \{0,...,T-1\}$ и каждой допустимой реализации управления $\mathbf{W}(t) \in \mathbf{W}_*(t)$ агента P агент P знает значение фазового вектора $\mathbf{X}(t) \in \mathbf{X}_*(t)$ объекта $\mathbf{I}$ и агент E сообщает ему выбор своего управления $\mathbf{U}(t) \in \mathbf{U}_*\big(t;\mathbf{W}(t)\big)$. Агенту P также известны все элементы модели (1)–(11).

Агент P оценивает состояние регионального промышленного комплекса в целом в период времени $t \in \{0,...,T-1\}$ с помощью целевой функции $\boldsymbol{\Phi}_t = \boldsymbol{\Phi}_t\big(\mathbf{X}(t),\mathbf{W}(t),\mathbf{U}(t)\big) = \boldsymbol{\Psi}\big(\mathbf{X}(t+1)\big)$, где $\boldsymbol{\Psi}: \mathbf{R}^k \to \mathbf{R}^1$ — отображение, определяющее значения терминального функционала $\boldsymbol{\Psi}$.

Цель агента P — минимизировать значение целевой функции $\boldsymbol{\Phi}_t$ путем выбора оптимального гарантирующего (минимаксного) управления $\mathbf{W}^{(e)}(t) \in \mathbf{W}_*(t)$ (Шориков, 1997) с учетом возможных наихудших, т.е. максимизирующих значение $\boldsymbol{\Phi}_t$ с помощью вектора рисков и возмущений $\mathbf{V}(t) \in \mathbf{V}_*(t)$ при условии, что агенты E и E_i, $i \in \{1,...,n\}$ способствуют ему в этом, если это не противоречит их целям и возможностям.

Предполагается, что в каждый период времени $t \in \{0,...,T-1\}$, для каждого $i \in \{1,...,n\}$ и для каждой допустимой реализации набора $\{\mathbf{W}(t),\mathbf{U}(t)\} \in \mathbf{W}_*(t) \times \mathbf{U}_*\big(t;\mathbf{W}(t)\big)$ агент E знает значения реализаций фазовых векторов $\mathbf{X}(t) \in \mathbf{X}_*(t)$ и $\mathbf{X}^{(i)}(t) \in \mathbf{X}_*^{(i)}(t)$ объектов I и $\mathbf{I}_i$ соответственно, и агенты P и E_i сообщает ему выбор своих управлений $\mathbf{W}(t) \in \mathbf{W}_*(t)$ и $\mathbf{U}^{(i)}(t) \in \mathbf{U}_*^{(i)}\big(t;\mathbf{W}(t),\mathbf{U}(t)\big)$ соответственно. Агенту E также известны все элементы модели (1)–(11).

Агент E оценивает состояние регионального промышленного комплекса в целом в период времени $t \in \{0,...,T-1\}$ с помощью целевой функции $\mathbf{F}_t = \mathbf{F}_t\big(\mathbf{X}(t),\mathbf{W}(t),\mathbf{U}(t)\big) = \boldsymbol{\Lambda}\big(\mathbf{X}(t+1)\big)$, где $\boldsymbol{\Lambda}: \mathbf{R}^k \to \mathbf{R}^1$ — отображение, определяющее значения терминального функционала $\boldsymbol{\Lambda}$. Учитывая данную целевую функцию и рекуррентное уравнение (1), это позволяет агенту P управлять поведением агента E.

Цель агента E — минимизация значения целевой функции $\mathbf{F}_t$ путем выбора оптимального гарантирующего (минимаксного) управления $\mathbf{U}^{(e)}(t) \in \mathbf{U}_*\big(t;\mathbf{W}^{(e)}(t)\big)$ с учетом возможных наихудших, т.е. максимизирующих значение $\mathbf{F}_t$, реализаций векторов рисков и возмущений $\mathbf{V}(t) \in \mathbf{V}_*(t)$ и $\mathbf{V}^{(i)}(t) \in \mathbf{V}_*^{(i)}(t)$, при условии, что агенты P и E_i, $i \in \{1,...,n\}$, способствуют ему в этом, если это не противоречит их целям и возможностям.

Предполагается, что $\forall t \in \{0,...,T-1\}$ и каждой допустимой реализации набора $\{\mathbf{W}(t),\mathbf{U}(t)\} \in \mathbf{W}_*(t) \times \mathbf{U}_*\big(t;\mathbf{W}(t)\big)$ агент E_i ($i \in \{1,...,n\}$) знает значение реализации фазового вектора $\mathbf{X}^{(i)}(t) \in \mathbf{X}_*^{(i)}(t)$ объекта $\mathbf{I}_i$, и агенты P и E сообщают ему выбор своих управлений $\mathbf{W}(t) \in \mathbf{W}_*(t)$ и $\mathbf{U}(t) \in \mathbf{U}_*\big(t;\mathbf{W}(t)\big)$ соответственно. Агенту E_i также известны все элементы модели (7)–(11).

Агент E_i ($i \in \{1,...,n\}$) оценивает состояние вида деятельности i регионального промышленного комплекса в период времени $t \in \{0,...,T-1\}$ с помощью целевой функции $\mathbf{F}_t^{(i)} = \mathbf{F}_t^{(i)}\big(\mathbf{X}^{(i)}(t),\mathbf{W}(t),\mathbf{U}(t),\mathbf{U}^{(i)}(t)\big) = \boldsymbol{\Lambda}^{(i)}\big(\mathbf{X}^{(i)}(t+1)\big)$, где $\boldsymbol{\Lambda}^{(i)}: \mathbf{R}^{k_i} \to \mathbf{R}^1$ — отображение, определяющее значения терминального функционала $\boldsymbol{\Lambda}^{(i)}$. Данная целевая функция и рекуррентное уравнение (7) позволяют агентам P и E управлять поведением агента E_i.

Цель агента E_i ($i \in \{1,...,n\}$) — минимизация значения целевой функции $\mathbf{F}_t^{(i)}$ при помощи оптимального гарантирующего (минимаксного) управления $\mathbf{U}^{(i,e)}(t) \in \mathbf{U}_*^{(i)}\big(t;\mathbf{W}^{(e)}(t),\mathbf{U}^{(e)}(t)\big)$ с учетом возможных наихудших, т.е. максимизирующих значение $\mathbf{F}_t^{(i)}$ реализаций вектора рисков и возмущений $\mathbf{V}^{(i)}(t) \in \mathbf{V}_*^{(i)}(t)$, при условии, что агенты P и E способствуют ему в этом, если это не противоречит их целям и возможностям.

Сформированную дискретную управляемую динамическую систему (1)–(11) и формализованные логические, информационные и управляющие связи между ее объектами и агентами управления назовем *трехуровневой мультиагентной иерархической интеллектуальной семантической сетью*, описывающей систему управления региональным промышленным комплексом.

На рис. 1 изображена схема отношений и структурных связей между объектами и субъектами рассматриваемой семантической сети.

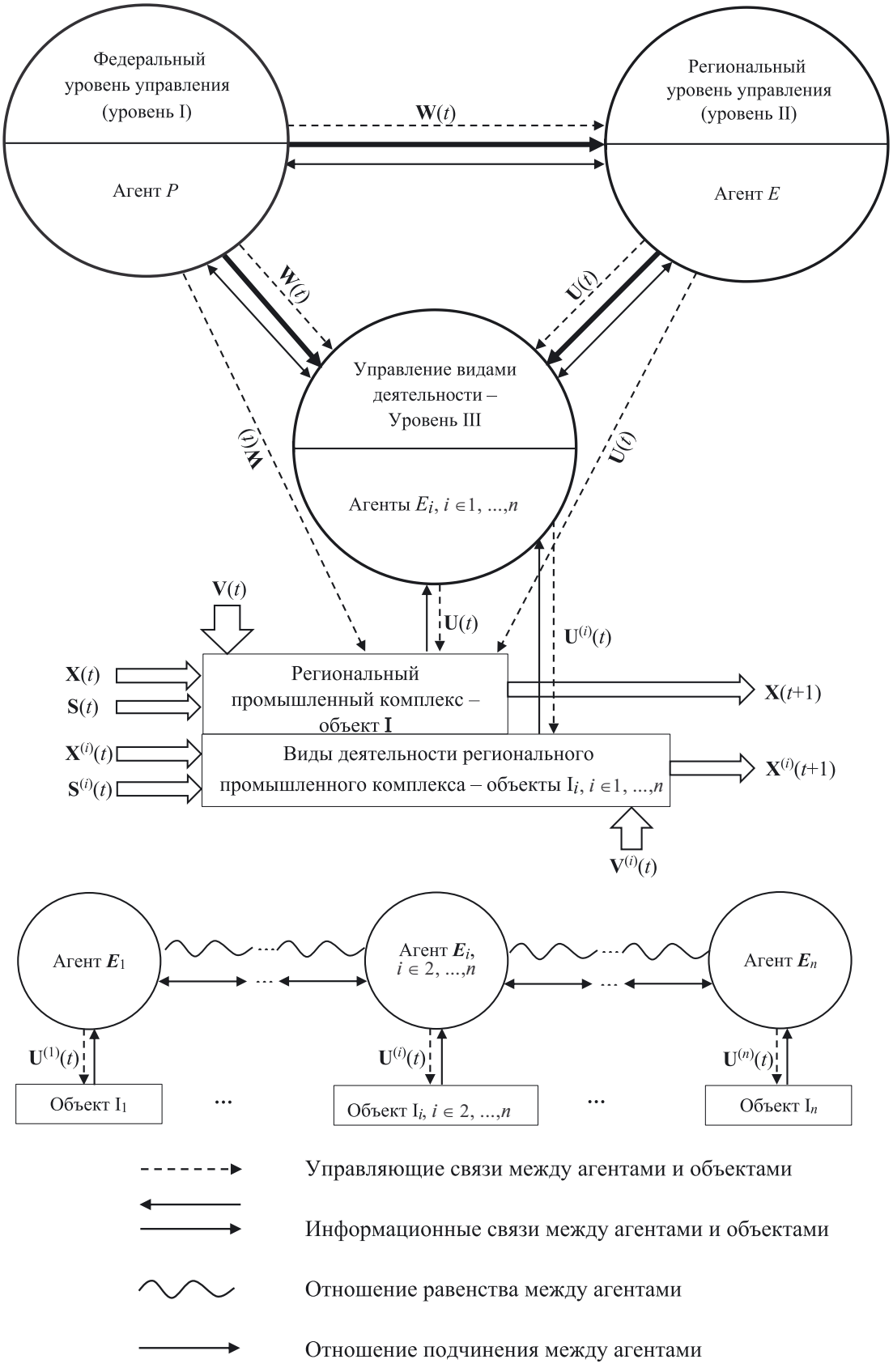

Рис. 1. Схема отношений, структурных и управляющих связей между объектами и субъектами семантической сети

3.3. Формализация задачи

Структура основной задачи *трехуровневого иерархического минимаксного управления региональным промышленным комплексом* состоит из формализации трех минимаксных задач одноуровневого пошагового управления.

На основании сформированной динамической системы (1)–(11) и описания цели агента E формулируется задача минимаксного пошагового управления объектом $\mathbf{I}$ на уровне управления II рассматриваемой трехуровневой мультиагентной иерархической интеллектуальной семантической сети.

Задача 1. Для фиксированных периода времени t ($t \in \{0,\ldots,T-1\}$) допустимой на уровне управления II рассматриваемой сети (1)–(11) реализации фазового вектора $\mathbf{X}(t) \in \mathbf{X}_*(t)$ объекта $\mathbf{I}$, заданной целевой функции $\mathbf{F}_t$ агента E и допустимой на уровне управления I реализации управления $\mathbf{W}(t) \in \mathbf{W}_*(t)$ агента P требуется найти множество $\mathbf{U}^{(e)}\left(t;\mathbf{X}(t),\mathbf{W}(t)\right) \subseteq \mathbf{U}_*\left(t;\mathbf{W}(t)\right)$ минимаксных управлений $\tilde{\mathbf{U}}^{(e)}(t) \in \mathbf{U}_*\left(t;\mathbf{W}(t)\right)$ агента E и минимаксный результат — число $c^{(e)}\left(t+1;\mathbf{X}(t),\mathbf{W}(t)\right)$, соответствующих набору $\{t,\mathbf{X}(t),\mathbf{W}(t)\}$ и целевой функции $\mathbf{F}_t$, которые удовлетворяют условию минимакса.

На основании сформированной динамической системы (1)–(11) и описания целей агента P формулируется *задача минимаксного пошагового управления объектом* $\mathbf{I}$ на уровне управления I рассматриваемой сети.

Задача 2. Для фиксированных периода времени t ($t \in \{0,\ldots,T-1\}$), допустимой на уровне управления I рассматриваемой сети (1)–(11), реализации фазового вектора $\mathbf{X}(t) \in \mathbf{X}_*(t)$ объекта $\mathbf{I}$, заданной целевой функции $\mathbf{\Phi}_t$ агента P, требуется найти множество $\mathbf{W}^{(e)}\left(t;\mathbf{X}(t)\right) \times \hat{\mathbf{U}}^{(e)}\left(t;\mathbf{X}(t),\bar{\mathbf{W}}^{(e)}(t)\right)$, где $\mathbf{W}^{(e)}\left(t;\mathbf{X}(t)\right) \subseteq \mathbf{W}_*(t)$ — множество минимаксных управлений $\bar{\mathbf{W}}^{(e)}(t) \in \mathbf{W}_*(t)$ агента P, $\mathbf{U}^{(e)}\left(t;\mathbf{X}(t),\bar{\mathbf{W}}^{(e)}(t)\right) \subseteq \hat{\mathbf{U}}^{(e)}\left(t;\mathbf{X}(t),\bar{\mathbf{W}}^{(e)}(t)\right)$ — множество минимаксных управлений $\bar{\mathbf{U}}^{(e)}(t) \in \mathbf{U}^{(e)}\left(t;\mathbf{X}(t),\bar{\mathbf{W}}^{(e)}(t)\right)$ агента E и минимаксный результат — число $d^{(e)}\left(t+1;\mathbf{X}(t)\right)$, соответствующих набору $\{t,\mathbf{X}(t)\}$ и целевой функции $\mathbf{\Phi}_t$, которое удовлетворяет условию минимакса.

На основании сформированной динамической системы (1)–(11) и описания целей агентов E_i, $i \in \{1,\ldots,n\}$, формулируется *задача минимаксного пошагового управления объектом* $\mathbf{I}_i$ на уровне управления III рассматриваемой сети.

Задача 3. Для фиксированных периода времени t ($t \in \{0,\ldots,T-1\}$), индекса i ($i \in \{1,\ldots,n\}$), допустимой на уровне управления III рассматриваемой сети (1)–(11) реализации фазового вектора $\mathbf{X}^{(i)}(t) \in \mathbf{X}_*^{(i)}(t)$ объекта $\mathbf{I}_i$, заданной целевой функции $\mathbf{F}_t^{(i)}$ агента E_i и сформированных на уровнях управления I и II реализаций минимаксных управлений $\bar{\mathbf{W}}^{(e)}\left(t\right) \in \mathbf{W}^{(e)}\left(t;\mathbf{X}(t)\right)$ и $\bar{\mathbf{U}}^{(e)}(t) \in \hat{\mathbf{U}}^{(e)}\left(t;\mathbf{X}(t),\bar{\mathbf{W}}^{(e)}(t)\right)$ агентов P и E соответственно, требуется найти множество $\mathbf{U}_i^{(e)}\left(t;\mathbf{X}^{(i)}(t),\bar{\mathbf{W}}(t),\bar{\mathbf{U}}(t)\right) \subseteq \mathbf{U}_*^{(i)}\left(t;\bar{\mathbf{W}}(t),\bar{\mathbf{U}}(t)\right)$ минимаксных управлений $\bar{\mathbf{U}}^{(i,e)}(t) \in \mathbf{U}_*^{(i)}\left(t;\bar{\mathbf{W}}(t),\bar{\mathbf{U}}(t)\right)$ агента E_i и минимаксный результат — число $c_i^{(e)}\left(t+1;\mathbf{X}^{(i)}(t),\bar{\mathbf{W}}(t),\bar{\mathbf{U}}(t)\right)$, соответствующих набору $\left\{t,\mathbf{X}^{(i)}(t),\bar{\mathbf{W}}(t),\bar{\mathbf{U}}(t)\right\}$ и целевой функции $\mathbf{F}_t^{(i)}$, которые удовлетворяют условию минимакса.

Решения минимаксных задач 1–3 существуют (доказательства осуществляются аналогично рассуждениям (Шориков, 1997)) при выполнении следующих достаточных условий:

1) целевые функции $\mathbf{\Psi}$ агента P, $\mathbf{\Lambda}$ агента E и $\mathbf{U}^{(i)}$, $i \in \{1,\ldots,n\}$, агента E_i являются линейными или выпуклыми относительно фазовых векторов из их областей определения;

2) $\forall t \in \{0,\ldots,T\}$: $\mathbf{X}_*(t) \in \mathbf{\Omega}\left(\mathbf{R}^k\right)$; $\mathbf{S}_*(t) \in \mathbf{\Omega}\left(\mathbf{R}^s\right)$;

3) $\left(\forall t \in \{0,\ldots,T\}\right) \wedge \left(i \in \{1,\ldots,n\}\right)$: $\mathbf{X}_*^{(i)}(t) \in \mathbf{\Omega}\left(\mathbf{R}^{k_i}\right)$; $\mathbf{S}_*^{(i)}(t) \in \mathbf{\Omega}\left(\mathbf{R}^{s_i}\right)$;

4) $\forall t \in \{0,\ldots,T-1\}$: $\mathbf{W}_*(t) \in \mathbf{\Sigma}\left(\mathbf{R}^m\right)$; $\mathbf{U}_*\left(t;\mathbf{W}(t)\right) \in \mathbf{\Sigma}\left(\mathbf{R}^p\right)$, $\mathbf{W}(t) \in \mathbf{W}_*(t)$; $\mathbf{V}_*(t) \in \mathbf{\Sigma}\left(\mathbf{R}^q\right)$;

$$\left(\forall t \in \{0,\ldots,T-1\}\right) \wedge \left(i \in \{1,\ldots,n\}\right): \mathbf{U}_*^{(i)}\left(t;\mathbf{W}(t),\mathbf{U}(t)\right) \in \mathbf{\Sigma}\left(\mathbf{R}^{p_i}\right), \mathbf{W}(t) \in \mathbf{W}_*(t),$$
$$\mathbf{U}(t) \in \mathbf{U}_*\left(t;\mathbf{W}(t)\right); \mathbf{V}_*^{(i)}(t) \in \mathbf{\Sigma}\left(\mathbf{R}^{q_i}\right);$$

5) при заданных начальных фазовых векторах каждого объекта системы для моделей их динамики вида (1) и (7) на промежутке времени $\{0,\ldots,T\}$ существует хотя бы по одной допустимой фазовой траектории, порожденной соответствующими допустимыми наборами реализаций на этом промежутке времени векторов — управления, рисков и возмущений, спроса.

Тогда на основании решений задач 1–3 для $\forall t \in \{0,\ldots,T-1\}$ и реализации набора $\left\{\mathbf{X}(t),\mathbf{X}^{(i)}(t)\right\}_{i \in \overline{1,n}}$, $\mathbf{X}(t) \in \mathbf{X}_*(t)$, $\forall i \in \{1,\ldots,n\}$: $\mathbf{X}^{(i)}(t) \in \mathbf{X}_*^{(i)}(t)$ можно сформировать кортеж итоговых результатов:

$$\left\{\mathbf{W}^{(e)}\left(t;\mathbf{X}(t)\right), d^{(e)}\left(t+1;\mathbf{X}(t)\right)\right\};$$

$$\forall \bar{\mathbf{W}}^{(e)}(t) \in \mathbf{W}^{(e)}\left(t;\mathbf{X}(t)\right): \left\{\hat{\mathbf{U}}^{(e)}\left(t;\mathbf{X}(t),\bar{\mathbf{W}}^{(e)}(t)\right), c^{(e)}\left(t+1;\mathbf{X}(t),\bar{\mathbf{W}}^{(e)}(t)\right)\right\};$$

$$\forall \left\{\bar{\mathbf{W}}^{(e)}(t),\bar{\mathbf{U}}^{(e)}\left(t\right)\right\} \in \mathbf{W}^{(e)}\left(t;\mathbf{X}(t)\right)\times \hat{\mathbf{U}}^{(e)}\left(t;\mathbf{X}(t),\bar{\mathbf{W}}^{(e)}(t)\right):$$

$$\bar{\mathbf{X}}^{(e)}(t+1) = \psi_t\left(t,\mathbf{X}(t),\bar{\mathbf{W}}^{(e)}(t),\bar{\mathbf{U}}^{(e)}(t),\bar{\mathbf{V}}^{(e)}(t),\bar{\mathbf{S}}^{(e)}(t)\right),\ \bar{\mathbf{V}}^{(e)}(t) \in \mathbf{V}_*(t),\ \bar{\mathbf{S}}^{(e)}(t) \in \mathbf{S}_*(t),$$

где ψ_t — одношаговый оператор, определенный на параметрах правой части уравнения (1);

$$\left\{\mathbf{U}_i^{(e)}\left(t;\mathbf{X}^{(i)}(t),\bar{\mathbf{W}}^{(e)}(t),\bar{\mathbf{U}}^{(e)}(t)\right), c_i^{(e)}\left(t+1;\mathbf{X}^{(i)}(t),\bar{\mathbf{W}}^{(e)}(t),\bar{\mathbf{U}}^{(e)}(t)\right)\right\}_{i\in 1,\ldots,n},$$

$$\bar{\mathbf{X}}^{(i,e)}(t+1) = \psi_t^{(i)}\left(t,\mathbf{X}^{(i)}(t),\bar{\mathbf{W}}^{(e)}(t),\bar{\mathbf{U}}^{(e)}(t),\bar{\mathbf{U}}^{(i,e)}(t),\bar{\mathbf{V}}^{(i,e)}(t),\bar{\mathbf{S}}^{(i,e)}(t)\right),$$

$$\bar{\mathbf{U}}^{(i,e)}(t) \in \mathbf{U}_i^{(e)}\left(t;\bar{\mathbf{W}}^{(e)}(t),\bar{\mathbf{U}}^{(e)}(t)\right),\ \bar{\mathbf{V}}^{(i,e)}(t) \in \mathbf{V}_*^{(i)}(t),\ \bar{\mathbf{S}}^{(i,e)}(t) \in \mathbf{S}_*^{(i)}(t),$$

где $i \in 1,\ldots,n$; $\psi_t^{(i)}$ — одношаговый оператор, определенный на параметрах правой части уравнения (7), который будем называть **решением задачи минимаксного пошагового управления в трехуровневой мультиагентной иерархической интеллектуальной семантической сети**, описываемой динамической системой вида (1)–(11).

3.4. Алгоритм решения задачи

Алгоритм решения рассматриваемой многошаговой задачи минимаксной оптимизации (оптимизации гарантированного результата) управления региональным промышленным комплексом (основная задача) можно представить в виде реализации последовательности одношаговых действий.

Шаг 1. Формирование неизменных исходных данных: определение числа периодов управления и определение социально-экономических параметров промышленного комплекса, региональных и федеральных управляющих воздействий власти, возмущений и объемов спроса; ввод начальных значений параметров фазовых векторов.

Начало цикла по переменной $t \in \{0,\ldots,T-1\}$.

Шаг 2. Алгоритм решения задачи 1.

2.1. Формирование переменных данных для задач 1 и 2: создание матриц коэффициентов, характеризующих региональный промышленный комплекс, взаимовлияние отдельных параметров, региональных и федеральных управляющих воздействий, возмущений и спроса, которые определяют дискретное векторно-матричное рекуррентное уравнение (1) для периода t.

2.2. Формирование набора ограничений для задач 1 и 2: на параметры фазового вектора объекта **I**, управляющее воздействие агента E, возмущений, рисков и спроса, имеющихся в модели (1)–(6), в виде систем алгебраических уравнений и неравенств и конечных наборов векторов.

2.3. Формирование параметров целевой функции $\mathbf{F}_t$.

2.4. Процедура решения задачи 1: на основании измерения реализации фазового вектора $\mathbf{X}(t)$ объекта **I** для фиксированного управления $\mathbf{W}(t)$ агента P осуществляется решение задачи формирования множества $\mathbf{U}^{(e)}\left(t;\mathbf{X}(t),\mathbf{W}(t)\right)$ минимаксных управлений агента E и минимаксного результата $c^{(e)}\left(t+1;\mathbf{X}(t),\mathbf{W}(t)\right)$, соответствующих набору $\{t,\mathbf{X}(t),\mathbf{W}(t)\}$ и целевой функции $\mathbf{F}_t$. Если решение задачи 1 существует, осуществляется переход к п. 2.5, в противном случае — к п. 2.2 для корректировки исходных данных с целью выполнения достаточных условий существования ее решения (если имеется такая возможность), или — алгоритм решения основной задачи прекращает работу из-за отсутствия решения при имеющихся ограничениях.

2.5. Формирование результатов решения задачи 1 в период t.

Шаг 3. Алгоритм решения задачи 2.

3.1. Формирование параметров целевой функции $\mathbf{\Phi}_t$.

3.2. Процедура решения задачи 2: на основании измерения реализации фазового вектора $\mathbf{X}(t)$ объекта **I** и реализации шага 2 осуществляется решение задачи формирования множества $\mathbf{W}^{(e)}\left(t;\mathbf{X}(t)\right)\times\mathbf{U}^{(e)}\left(t;\mathbf{X}(t),\bar{\mathbf{W}}^{(e)}(t)\right)$, где $\mathbf{W}^{(e)}\left(t;\mathbf{X}(t)\right)$ — множество минимаксных управлений $\bar{\mathbf{W}}^{(e)}(t)$ агента P, $\hat{\mathbf{U}}^{(e)}\left(t;\mathbf{X}(t),\bar{\mathbf{W}}^{(e)}(t)\right)\subseteq\mathbf{U}^{(e)}\left(t;\mathbf{X}(t),\bar{\mathbf{W}}^{(e)}(t)\right)$ — множество минимаксных управлений $\bar{\mathbf{U}}^{(e)}(t)\in$ $\in\mathbf{U}^{(e)}\left(t;\mathbf{X}(t),\bar{\mathbf{W}}^{(e)}(t)\right)$ агента E и минимаксного результата $d^{(e)}\left(t+1;\mathbf{X}(t)\right)$, соответствующих набору $\{t,\mathbf{X}(t)\}$ и целевой функции $\mathbf{\Phi}_t$. Если решение задачи 2 существует, осуществляется переход к п. 3.3, в противном случае — к п. 3.1 для корректировки исходных параметров целевой функции $\mathbf{\Phi}_t$. Если

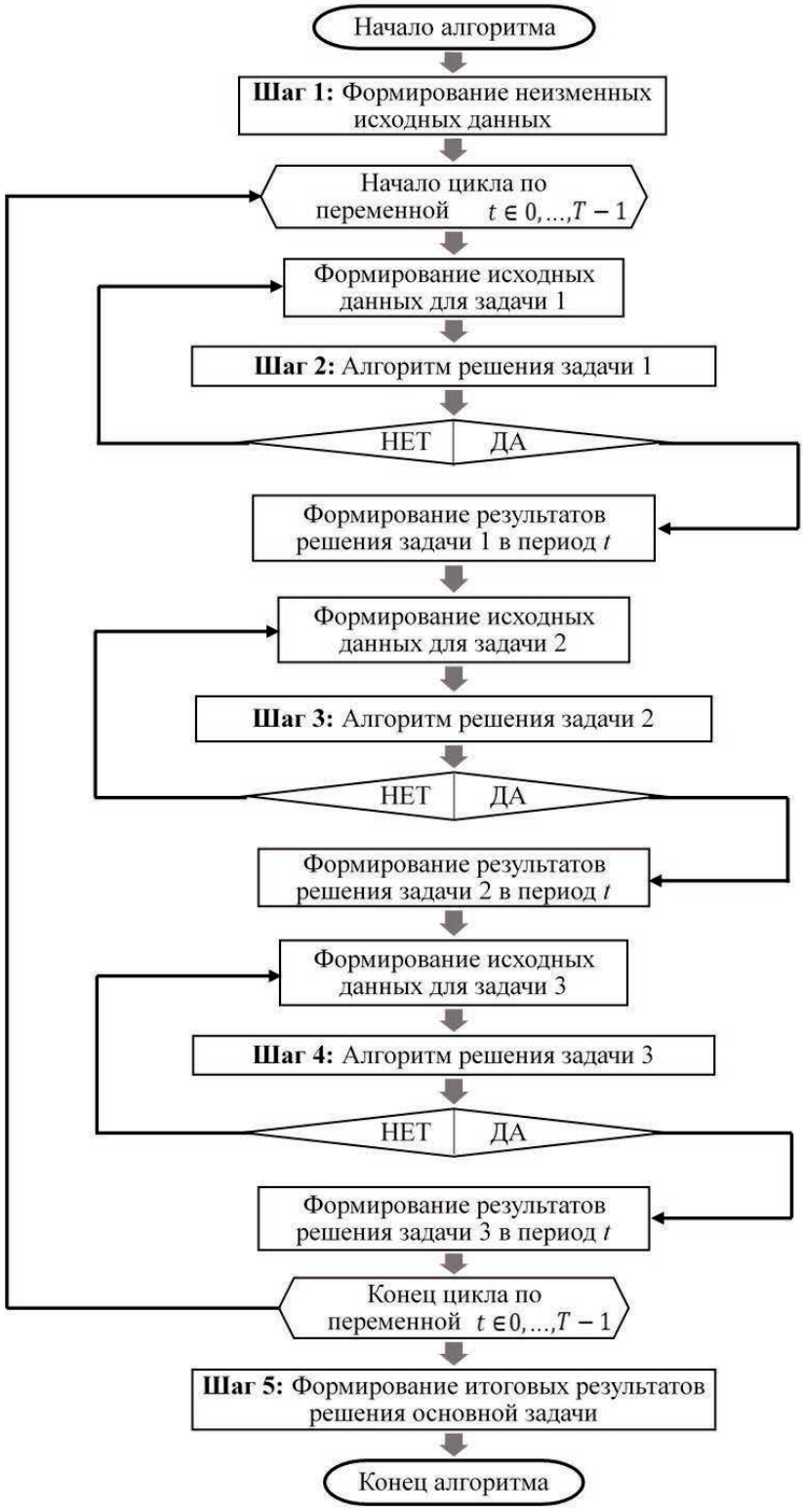

Рис. 2. Блок-схема алгоритма решения задачи трехуровневого иерархического минимаксного управления региональным промышленным комплексом

такой возможности нет, то выполнение алгоритма решения основной задачи прекращается из-за отсутствия решения при имеющихся данных, определяющих параметры целевой функции $\mathbf{\Phi}_t$.

3.3. Формирование результатов решения задачи 2 в период t.

Шаг 4. Алгоритм решения задачи 3.

Начало цикла по переменной $i \in \{1, \ldots, n\}$.

4.1. Формирование переменных данных для задачи 3: создание матриц коэффициентов, характеризующих региональный промышленный комплекс, взаимовлияние отдельных параметров, региональных и федеральных управляющих воздействий, возмущений и спроса, которые определяют дискретное векторно-матричное рекуррентное уравнение (7) в период t.

4.2. Формирование набора ограничений для задачи 3 на параметры фазового вектора объекта $\mathbf{I}_i$, управляющее воздействие агента E_i, возмущений, рисков и спроса, имеющихся в модели (7)–(11) в виде систем алгебраических уравнений и неравенств и конечных наборов векторов.

4.3. Формирование параметров целевой функции $\mathbf{F}_t^{(i)}$.

4.4. Процедура решения задачи 3: на основании измерения реализации фазового вектора $\mathbf{X}^{(i)}(t)$ объекта $\mathbf{I}_i$, решения задач шагов 2–3, реализаций минимаксных управлений $\bar{\mathbf{W}}^{(e)}(t)$ и $\bar{\mathbf{U}}^{(e)}(t)$ агентов P и E соответственно, осуществляется решение задачи формирования множества $\mathbf{U}_i^{(e)}\left(t; \mathbf{X}^{(i)}(t), \bar{\mathbf{W}}^{(e)}(t), \bar{\mathbf{U}}^{(e)}(t)\right)$ — минимаксных управлений $\bar{\mathbf{U}}^{(i,e)}(t)$ агента E_i и минимаксного результата $c_i^{(e)}\left(t+1; \mathbf{X}^{(i)}(t), \bar{\mathbf{W}}^{(e)}(t), \bar{\mathbf{U}}^{(e)}(t)\right)$, соответствующих набору $\left\{t, \mathbf{X}^{(i)}(t), \bar{\mathbf{W}}^{(e)}(t), \bar{\mathbf{U}}^{(e)}(t)\right\}$ и целевой функции $\mathbf{F}_t^{(i)}$. Если решение задачи 3 существует, то осуществляется переход к п. 4.5, в противном случае — к п. 4.2 для корректировки исходных данных. Если такой возможности нет, то выполнение алгоритма решения основной задачи прекращается в силу отсутствия ее решения при имеющихся ограничениях.

4.5. Формирование результатов решения задачи 3 для индекса i в период t.

Конец цикла по переменной $i \in \{1, \ldots, n\}$.

Конец цикла по переменной $t \in \{0, \ldots, T-1\}$.

Шаг 5. Формирование итоговых результатов решения основной задачи: $\forall t \in \{0, \ldots, T-1\}$ и реализации набора допустимых вариантов фазовых векторов $\mathbf{X}(t)$ и $\mathbf{X}^{(i)}(t)$, $i \in \{1, \ldots, n\}$, на основании реализации шагов 2–4 формируется набор минимаксных управляющих воздействий $\bar{\mathbf{W}}^{(e)}(t)$, $\bar{\mathbf{U}}^{(e)}(t)$ и $\bar{\mathbf{U}}^{(i,e)}(t)$ агентов P, E и E_i, $i \in \{1, \ldots, n\}$, для каждого уровня управления и соответствующих им минимаксных результатов $d^{(e)}\left(t+1; \mathbf{X}(t)\right)$, $c^{(e)}\left(t+1; \mathbf{X}(t), \bar{\mathbf{W}}^{(e)}(t)\right)$ и $c_i^{(e)}\left(t+1; \mathbf{X}^{(i)}(t), \bar{\mathbf{W}}^{(e)}(t), \bar{\mathbf{U}}^{(e)}(t)\right)$, которые будут являться решением основной задачи — минимаксного пошагового управления в трехуровневой мультиагентной иерархической интеллектуальной семантической сети.

Процедуры решения минимаксных задач, которые фигурируют в предлагаемом алгоритме могут быть представлены в виде конечных последовательностей операций над векторами и многогранниками-компактами в конечномерных векторных пространствах, решении систем линейных алгебраических уравнений и неравенств, а также решении задач линейного (или выпуклого) математического программирования, т.е. в виде, допускающем их алгоритмизацию. В кратком виде блок-схема алгоритма решения основной задачи приведена на рис. 2. Отметим, что на упрощенной блок-схеме представлен алгоритм для случая, когда все задачи удается успешно решить после корректировки исходных данных.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье предложена агент-ориентированная модель трехуровневого иерархического минимаксного управления региональным промышленным комплексом. В ней для каждого уровня определены структура объектов управления и управляющие агенты. Разработана структура управляющих и информационных связей модели, а также алгоритм агентов по выбору управляющих воздействий с учетом установленной иерархии управления региональным промышленным комплексом. Формализованы три уровня управления, информационные и управленческие взаимодействия, сформулированы основные задачи формирования множеств минимаксных управляющих воздействий для каждого агента модели, предложен общий содержательный алгоритм функционирования модели.

Разработанная модель имеет ряд преимуществ, связанных с использованием АОМ и широкого набора инструментов моделирования. Она имеет гибкую архитектуру, позволяет изменять структуру фазового вектора, корректировать набор социально-экономических показателей, использовать новые варианты управляющих воздействий, изменять целевые функции для каждого уровня управления. Минимаксный подход позволяет сформировать управляющие воздействия, обеспечивающие гарантированный результат при наихудших внешних факторах. Алгоритм разработанной модели предполагает реализацию пошагового управления с обратной связью, что позволит обеспечить адаптивность управления и учитывать изменчивости внешних факторов. К сложным особенностям модели можно отнести необходимость обработки значительного объема данных статистики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

Акбердина В.В., Шориков А.Ф. (2022). Иерархическая агент-ориентированная модель управления промышленным комплексом // *Управленец*. Т. 13. № 6. С. 2–14. DOI: 10.29141/2218-5003-2022-13-6-1 [**Akberdina V.V., Shorikov A.F.** (2022). Managing industrial complexes: A hierarchical agent-oriented model. *Manager*, 13. 6, 2–14 (in Russian). DOI: 10.29141/2218-5003-2022-13-6-1 (in Russian).]

Бахтизин А.Р. (2007). Опыт разработки агент-ориентированной модели // *Экономическая наука современной России*. № 3. С. 104–116. [**Bakhtizin A.R.** (2007). Experience in developing an agent-oriented model. *Economics of Contemporary Russia*, 3, 104–116 (in Russian).]

Горчакова Д.А., Шабалов В.А. (2017). О применении имитационного моделирования для прогнозирования спроса на продукцию металлургической отрасли // *Экономика и управление в XXI веке: наука и практика*. № 4. С. 108–112. [**Gorchakova D.A., Shabalov V.A.** (2017). On the application of imitation modeling for the forecasting of the demand for the production of the metallurgical industry. *Economics and Management in the XXI Century: Science and Practice*, 4, 108–112 (in Russian).]

Ивантер В.В. (2016). Стратегия перехода к экономическому росту // *Проблемы прогнозирования*. № 1. С. 3–8. [**Ivanter V.V.** (2016). Transition strategy to economic growth. *Studies on Russian Economic Development*, 1, 3–8 (in Russian).]

Кислицын Е.В., Городничев В.В. (2021). Имитационное моделирование развития отдельных отраслей тяжелой промышленности // *Бизнес-информатика*. Т. 15. № 1. С. 59–77. DOI: 10.17323/2587-814X.2021.1.59.77 [**Kislitsyn E.V., Gorodnichev V.V.** (2021). Simulation of development of individual heavy industry sectors. *Business Informatics*, 15, 1, 59–77. DOI: 10.17323/2587-814X.2021.1.59.77 (in Russian).]

Коровин Г.Б. (2022). Агент-ориентированная модель цифровизации промышленности региона // *Вестник Забайкальского государственного университета*. Т. 28. № 7. С.104–114. DOI: 10.21209/2227-9245-2022-28-7-104-114 [**Korovin G.** (2022). Agent-oriented model of the region's industry digitalization. *Transbaikal State University Journal*, 28, 7, 104–114. DOI: 10.21209/2227-9245-2022-28-7-104-114 (in Russian).]

Красовский Н.Н., Субботин А.И. (1974). *Позиционные дифференциальные игры*. М.: Наука. [**Krasovskii N.N., Subbotin A.I.** (1974). *Positional differential games*. Moscow: Nauka (in Russian).]

Макаров В.Л., Бахтизин А.Р., Бахтизина Н.В. (2005). CGE модель социально-экономической системы России со встроенными нейронными сетями. М.: ЦЭМИ РАН. 152 с. [**Makarov V.L., Bakhtizin A.R., Bakhtizina N.V.** (2005). *CGE model of the socio-economic system of Russia with embedded neural networks*. Moscow: CEMI RAS. 152 p. (in Russian).]

Макаров В.Л., Бахтизин А.Р., Сушко Е.Д. (2017). Регулирование промышленных выбросов на основе агент-ориентированного подхода // *Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз*. Т. 10. № 6. С. 42–58. DOI: 10.15838/esc/2017.6.54.3 [**Makarov V.L., Bakhtizin A.R., Sushko E.D.** (2017). Regulation of industrial emissions based on the agent-based approach. *Economic and Social Changes: Facts, Trends, Forecast*, 10, 6, 42–58. DOI: 10.15838/ esc.2017.6.54.3 (in Russian).]

Макаров В.Л., Бахтизин А.Р., Сушко Е.Д. (2020). Агент-ориентированная модель как инструмент регулирования экологии региона // *Журнал Новой экономической ассоциации*. № 1 (45). С. 151–171. DOI: 10.31737/2221-2264-2020-45-1-6 [**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*, 1 (45), 151–171. DOI: 10.31737/2221-2264-2020-45-1-6 (in Russian).]

Маковеев В.Н. (2016). Применение агент-ориентированных моделей в анализе и прогнозировании социально-экономического развития территорий // *Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз*. № 5 (47). С. 272–289. DOI: 10.15838/esc/2016.5.47.15 [**Makoveev V.N.** (2016). Using agent-based models in the analysis and forecast of socio-economic development of territories. *Economic and Social Changes: Facts, Trends, Forecast*, 5, 272–289. DOI: 10.15838/esc/2016.5.47.15 (in Russian).]

Медведев С.Н., Аксенов К.А. (2012). Анализ применимости имитационного и мультиагентного моделирования в задачах планирования машиностроительного производства // *Современные проблемы науки и образования*. № 5. С. 101–106. [**Medvedev S.N., Aksenov K.A.** (2012). The analysis of the applicability of simulation and modeling in multi-agent planning problems of engineering production. *Modern Problems of Science and Education*, 5, 101–106 (in Russian).]

Сиротин Д.В. (2019). Моделирование развития экономики региона в условиях Индустрии 4.0 // *Наука Красноярья: Экономический журнал*. Т. 8. № 3. С. 98–108. DOI: 10.12731/2070-7568-2019-3-98-108 [**Sirotin D.V.** (2019). Development modeling of the regional economy in the industry 4.0 conditions. *Krasnoyarsk Science: Economic Journal*. 8. 3. 98–108. DOI: 10.12731/2070-7568-2019-3-98-108 (in Russian).]

Смородинская Н.В. (2017). Усложнение организации экономических систем в условиях нелинейного развития // *Вестник Института экономики РАН*. № 5. С. 104–115. [**Smorodinskaya N.V.** (2017). Complication of the organization of economic systems in the conditions of nonlinear development. *Bulletin of the Institute of Economics of the Russian Academy of Sciences*, 5, 104–115 (in Russian).]

Сушко Е.Д. (2012). Мультиагентная модель региона: концепция, конструкция и реализация. Препринт WP/2012/292. М.: ЦЭМИ РАН. 54 с. [**Sushko E.D.** (2012). *Multi-agent model of the region: Concept, structure and implementation*. Preprint WP/2012/292. Moscow: CEMI RAS. 54 p. (in Russian).]

Широв А.А., Гусев М.С., Янтовский А.А. (2012). Обоснование возможных сценариев долгосрочного развития российской экономики // *ЭКО*. № 6. С. 60–80. [**Shirov A.A., Gusev M.S., Yantovsky A.A.** (2012). Justification of possible scenarios for the long-term development of the Russian economy. *ECO Journal*, 6, 60–80 (in Russian).]

Широв А.А., Янтовский А.А. (2017). Межотраслевая макроэкономическая модель RIM - развитие инструментария в современных экономических условиях // *Проблемы прогнозирования*. № 3. С.3–19. [**Shirov A.A., Yantovsky A.A.** (2017). Intersectoral macroeconomical model RIM — development of tools in modern economic conditions. *Studies on Russian Economic Development*, 3, 3–19 (in Russian).]

Шориков А.Ф. (1997). Минимаксное оценивание и управление в дискретных динамических системах. Екатеринбург: Изд-во Уральского ун-та. [**Shorikov A.F.** (1997). *Minimax estimation and control in discrete-time dynamical systems*. Yekaterinburg: Ural Univ. Publishing House (in Russian).]

Шориков А.Ф. (2006). Методология моделирования многоуровневых систем: иерархия и динамика // *Прикладная информатика*. Т. 1. № 1. С. 136–141. [**Shorikov A.F.** (2006). Methodology of modeling multilevel systems: Hierarchy and dynamics. *Journal of Applied Informatics*, 1, 1, 136–141 (in Russian).]

Шориков А.Ф. (2022). Двухуровневая мультиагентная иерархическая интеллектуальная семантическая сеть для минимаксного управления функционированием объектов сетевого промышленного комплекса. Материалы IV Международной научно-практической конференции «*Цифровая трансформация промышленности: тенденции, управление, стратегии – 2021*». Екатеринбург: Институт экономики УрО РАН. С. 281–297. [**Shorikov A.F.** (2022). A two-level multi-agent hierarchical intelligent semantic network for minimax control of the functioning of objects of the network industrial complex. Materials of the IV International Scientific and Practical Conference "*Digital Transformation of Industry: Trends, management, strategies – 2021*". Ekaterinburg: Institute of Economics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 281–297 (in Russian).]

Bonabeau E. (2002). Agent-based modeling: Methods and techniques for simulating human systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 99, 3, 7280–7287. DOI: 10.1073/pnas.082080899

Chanias S., Myers M.D., Hess T. (2019). Digital transformation strategy making in predigital organizations: The case of a financial services provider. *The Journal of Strategic Information Systems*, 28 (1), 17–33. DOI:10.1016/j.jsis.2018.11.003

Cimoli M., Dosi G., Nelson R., Stiglitz J.E. (2006). Institutions and policies shaping industrial development: An introductory note. Initiative for policy dialogue. *LEM Working Paper Series*, no. 2006/02. 24 p.

Cincotti S., Raberto M., Teglio A. (2010). Credit money and macroeconomic instability in the agent-based model and simulator Eurace. *Economics: The Open-Access, Open-Assessment E-Journal*, 4, 20–26.

Maaouane M., Zouggar S., Krajačić G., Zahboune H. (2021). Modelling industry energy demand using multiple linear regression analysis based on consumed quantity of goods. *Energy*, 225, 120270. DOI: 10.1016/j.energy.2021.120270

Stummer C., Kiesling E., Günther M., Vetschera R. (2015). Innovation diffusion of repeat purchase products in a competitive market: An agent-based simulation approach. *European Journal of Operation-al Research*, 245, 1, 157–167. DOI: 10.1016/j.ejor.2015.03.008

Turgut Y., Bozdag C.E. (2022). A framework proposal for machine learning-driven agent-based models through a case study analysis. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 123, 102707. DOI: 10.1016/j.simpat.2022.102707

Agent-oriented model of three-level hierarchical minimax management of a regional industrial complex

© 2024 V.V. Akberdina, A.F. Shorikov, G.B. Korovin, D.V. Sirotin

V.V. Akberdina,
Institute of Economics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia; e-mail: akberdina.vv@uiec.ru

A.F. Shorikov,
Institute of Economics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia; e-mail: shorikov.af@uiec.ru

G.B. Korovin,
Institute of Economics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia; e-mail: korovin.gb@uiec.ru

D.V. Sirotin,
Institute of Economics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia, e-mail: sirotin.dv@uiec.ru

Received 14.07.2023

The study was carried out according to the state task for the Institute of Economics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences.

Abstract. The developed countries experience indicates the relevance of managing problems of the territorial industrial complexes and the need to create and develop applicable models based on modern approaches that take into account uncertainty and the possibility of management optimizing. The methodological basis of the research was the theory of industrial economics, the theory of economic and mathematical modeling, the theory of optimal control, optimization theory, and game theory. The model uses an agent-oriented approach, methods of economic and mathematical modeling, methods of building management systems of socio-economic systems, a minimax approach. Three-level management model of the regional industrial complex is proposed, its hierarchical subject-object structure is determined. The parameters of industrial facilities are presented in the form of a phase vector, and for each agent the structure of control and information links, algorithms for the choice of control actions are formalized. The problems of forming minimax control actions sets for each agent, solved in the course of using the model, are formulated, and a general consistent algorithm for choosing optimal control actions is proposed. The developed model will make possible to implement it in a software environment and create a tool for modeling the processes of managing the regional industrial complex, and in future — a flexible extensible software toolkit for managing industry at the regional level is to be created.

Keywords: industry, regional industrial complex, management, agent-based modeling, minimax approach.

JEL Classification: L52, C54, L60.

UDC: 338.2.

For reference: **Akberdina V.V., Shorikov A.F., Korovin G.B., Sirotin D.V.** (2024). Agent-oriented model of three-level hierarchical minimax management of a regional industrial complex. *Economics and Mathematical Methods*, 60, 3, 94–106. DOI: 10.31857/S0424738824030089 (in Russian).

ЭКОНОМИКА И МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ, 2024, том 60, № 3, с. 107–117

МАТЕМАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЭКОНОМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

Методы оценивания интегрированной дисперсии: проблемы устойчивости к скачкам в высокочастотных временных рядах

© 2024 г. З.О. Косимов

З.О. Косимов
МГУ имени М.В. Ломоносова; e-mail: zohirsho1@gmail.com

Поступила в редакцию 13.02.2024

Автор благодарит своих научных руководителей Е.Н. Лукаша и А.А. Гущина за полезные замечания и бесценные комментарии к тексту настоящей статьи. Хотелось бы также отметить значение и важность советов Ф.С. Картаева в процессе подготовки статьи к ее публикации.

Аннотация. Интегрированная дисперсия является мерой волатильности процесса в непрерывном времени и используется в финансовой математике как инструмент оптимизации портфеля, прогноза динамики цены финансового актива. Состоятельность оценки интегрированной дисперсии случайного процесса находится в центре внимания настоящей статьи. Основополагающий диффузионный процесс расширен посредством включения компоненты скачков как средства улучшения описательной функции процесса. Именно активность скачков является тем фактором, который обуславливает состоятельность оценки интегрированной дисперсии. Поэтому состоятельность оценки определяется как степень ее устойчивости к скачкам. Рассмотрены два основных метода оценивания интегрированной дисперсии и проанализирована способность соответствующих оценок в нейтрализации эффекта скачков на сходимость. Приведены доводы, указывающие на необходимость дальнейшего исследования эффекта скачков, ссылаясь на работы авторов, заложившие основу анализа интегрированной дисперсии, а также на работы, в которых содержатся основные асимптотические результаты относительно устойчивости оценки интегрированной дисперсии к скачкам. По результатам проведенного анализа выделены направления дальнейшего развития асимптотической теории для анализа состоятельности оценки интегрированной дисперсии.

Ключевые слова: интегрированная дисперсия, диффузионный процесс, состоятельность, скачки, устойчивость к скачкам, асимптотическая теория.

Классификация JEL: C02, C32, C53, C65.

УДК: 519.214.

Для цитирования: **Косимов З.О.** (2024). Методы оценивания интегрированной дисперсии: проблемы устойчивости к скачкам в высокочастотных временных рядах // *Экономика и математические методы*. Т. 60. № 3. С. 107–117. DOI: 10.31857/S0424738824030095

ВВЕДЕНИЕ

В фокусе настоящей статьи стоит такой вероятностный феномен, как дисперсия. Роль и влияние моделирования дисперсии в финансовом мире сегодня трудно переоценить. Диапазон возможных применений моделей оценки дисперсии достаточно широк — начиная с оценки сложных финансовых инструментов до прогнозирования цен финансовых активов и их роли в формировании структуры портфеля. С доступностью больших данных, развитием инфраструктуры для их хранения и обработки, ростом вычислительной мощности приобретают все большую популярность различные непараметрические методы оценивания. Именно доступность больших данных способствовала росту исследований высокочастотных временных рядов, являющихся *объектом* нашего интереса, развитию методов машинного обучения и трансформации моделирования дисперсии в сторону более непараметрических методов. Это стало важной особенностью последних десятилетий в развитии теории количественных финансов. И эта тенденция сохранится в ближайшем будущем, притягивая все больше внимания как практиков, так и теоретиков.

В основе понимания дисперсии лежит видение ее как непрерывного явления, что представлялось бы менее целесообразным в случае меньшего объема доступных данных, соответствующего и более низкой частоте доступных данных. *Предметом* исследования настоящей статьи является оценка интегрированной дисперсии (ОИД), а именно — устойчивое к скачкам оценивание

интегрированной дисперсии, с чем мы связываем понятие *состоятельности* оценки интегрированной дисперсии. Дисперсия рассматривается как интегрированная переменная, что предполагает непрерывность[1] временных рядов.

Состоятельность[2] оценки интегрированной дисперсии обусловлена активностью *скачков*, характерных для динамики финансового актива. В нашем случае именно поведение скачков как фактора устойчивости (jump robustness) оценки интегрированной дисперсии является центральным параметром, который определяет состоятельность оценки интегрированной дисперсии.

Цель статьи — обосновать необходимость дальнейшего анализа влияния поведения скачков на состоятельность оценок интегрированной дисперсии, опираясь на основные классы оценок интегрированной дисперсии. Таким образом, обратив внимание на ограничения оценок в форме степени их устойчивости с учетом различной активности скачков, мы определим контуры дальнейшего развития анализа асимптотической теории как инструмента анализа сходимости оценок. Анализ влияния скачков на устойчивость оценки интегрированной дисперсии имеет теоретическую природу, но в заключительной части статьи будут приведены примеры для приложения скачкообразных процессов.

В разд. 1 описывается основополагающий процесс, представляющий *семимартингал*, состоящий из диффузии и скачкообразной компоненты. Определяется интегрированная дисперсия и ее оценка, а также обсуждается эффект влияния скачков на состоятельность ОИД. В разд. 2 выделяются два основных класса ОИД. Показано, что в некоторых случаях эти оценки интегрированной дисперсии неустойчивы к определенным типам активности скачков. В разд. 3 обосновывается необходимость рассмотрения скачков как фактора, влияющего на состоятельность ОИД. Необходимость более детального анализа оценок на их устойчивость основана на доводах авторов, заложивших основу понятия интегрированной дисперсии и изучивших проблему сходимости ОИД на протяжении почти одного десятилетия.

1. ИНТЕГРИРОВАННАЯ ДИСПЕРСИЯ[3]

1.1. Определение интегрированной дисперсии и ее оценка

Предположим, у нас имеются данные с достаточно высокой частотой. С теоретической точки зрения, возможность использования высокочастотных данных обосновывает целесообразность рассмотрения временного ряда как процесса с непрерывным временем. Непрерывность основывается на наблюдениях, обеспечивающих бесконечную делимость приращений промежутков времени, в результате чего диаметр разделения сетки моментов времени (интервал между приращениями $N = 1/\Delta$ при $N \to \infty$) стремится к нулю. Таким образом, мы имеем необходимые основания для аппроксимации дисперсии как интегрируемой переменной.

Итак, основополагающий для моделирования процесс следует рассматривать как процесс в непрерывном времени. Не менее фундаментальным для моделируемого процесса компонентом является броуновское движение W_t, позволяющее отразить чистую случайность, — *диффузию*. Такой стохастический процесс называется диффузионным.

Определим традиционный стохастический одномерный процесс без учета скачков:

$$X_t = X_0 + \int_0^t a_s ds + \int_0^t \sigma_s dW_s. \quad (1)$$

Процесс X_t является броуновским семимартингалом (или обобщенной диффузией), состоит из локального мартингала M_t, для которого W_s — стандартное броуновское движение, и согласованного процесса A_t с локально ограниченной вариацией, играющей роль сдвига, т.е. процесс X_t можно записать как $X_t = M_t + A_t$, где $M = \int_0^t \sigma_s dW_s$, $A = \int_0^t a_s ds$, $A_0 = M_0 = 0 \ \forall t \geq 0$. Семимартингал всегда является согласованным и с ограниченной вариацией.

---

[1] Непрерывность временных рядов и непараметрический метод оценки их дисперсии подразумевает необходимость наличия больших данных, что равносильно наличию высокочастотных временных рядов.

[2] Состоятельность оценки в данном случае должна пониматься в классическом смысле; соответствующее определение в контексте интегрированной дисперсии будет приведено далее.

[3] Более логичным было бы назвать данный раздел как «Реализованная вариация», так как именно она предлагается в данной работе в качестве состоятельной ОИД. Но так как анализ направлен на оценку интегрированной дисперсии как центральной части квадратической вариации, мы решили обратить внимание читателя именно на этот факт.

Разложение X_t не будет уникальным, так как всегда может прибавить к A_t и вычесть из M_t мартингал с ограниченной вариацией. Процесс σ_s непрерывен справа и имеет предел слева — особенность, из-за которой σ_s локально интегрируема, в частности $\int_0^t \sigma_s^2 ds < \infty$ для всех t.

Замечание 1. Строго говоря, в силу данного предположения диффузионную часть процесса X_t принято обозначать как $\int_0^t \sigma_s dW_s$. Класс непрерывных функций (càdlàg) образует пространство Скорохода.

Процесс стохастической дисперсии $\int_0^t \sigma_s dW_s$ как компонент процесса X_t всегда можно представить в виде локального мартингала с непрерывными траекториями в силу вышеуказанной особенности процесса σ_s. Все непрерывные локальные мартингалы с абсолютно непрерывной квадратической вариацией можно представить в форме процесса стохастической дисперсии. Таким образом, исключение возможности арбитража и моделирование компоненты локального мартингала как процесса стохастической дисперсии с учетом особенностей, изложенных выше, делает процесс вида (1) каноническим для непрерывных процессов в теории количественных финансов.

Следующим фундаментальным понятием является «*квадратическая вариация*» (QV), развитие теории которой тесно связана с формулой Ито и разложением интеграла Ито на части.

Замечание 2. В обобщенном виде квадратическую вариацию можно представить как $[X,X]_t = X_t^2 - 2\int_0^t X_{s-} dX_s$. Скачки в процессе X_t можно определить, используя обозначение X_{s-} как $\Delta X_s = X_s - X_{s-}$.

Принимая во внимание, что процесс X_t задан в виде (1), определим квадратическую вариацию этого процесса:

$$[X,X]_t = \langle X^c, X^c \rangle_t. \tag{2}$$

Здесь X^c представляет так называемую непрерывную мартингальную часть процесса X_t. Например, если $X_t = \sigma W_t$, то квадратическая вариация такого процесса равна $\sigma^2 t$, $[X,X]_t = \sigma^2 t$. В этом случае $[X,X]_t$ не является случайной величиной. Когда же процесс X_t задан соотношением (1), квадратическая вариация становится случайной и будет равна

$$[X,X]_t = X^c, \quad X^c{}_t = \int_0^t \sigma_s^2 ds, \tag{3}$$

что и есть непосредственно интегрированная дисперсия (IV). Так, в (Protter, 2004, p. 66) П. Протер отмечает важность квадратической вариации в теории семимартингалов (важные и для нас процессы, см. п. 1.2) и в теории финансового риска.

Введем понятие «*реализованная вариация*» (RV), базирующееся на эмпирических данных как оценку интегрированной вариации:

$$RV_N = \sum_{j=1}^{N} \left(X_{t_j} - X_{t_{j-1}} \right)^2. \tag{4}$$

Замечание 3. Определить RV можно и другим образом — предполагая равномерно распределенные данные логарифмированной доходности $r_i = X_{i/N} - X_{(i-1)/N}$ из некого промежутка, $RV = \sum_{i=1}^{N} r_i^2$.

С помощью RV мы попробуем состоятельно оценить IV. В силу особенностей реальных данных для временных рядов и вытекающих практических соображений, процесс X_t берется как логарифм начальных данных.

Для демонстрации роли RV_N приведем еще одно определение квадратической вариации

$$QV = p \lim_{N \to \infty} \sum_{j=1}^{N} \left(X_{t_j} - X_{t_{j-1}} \right)^2. \tag{5}$$

Цель построения ОИД — достичь такую сходимость, когда

$$RV \overset{u.c.p}{\to} QV = IV. \tag{6}$$

Замечание 4. «u.c.p.» (uniform convergence in probability) означает равномерную (по времени на конечных интервалах) сходимость по вероятности, т.е. $\mathbb{P}[d(RV, QV) > \varepsilon] \to 0$. В литературе можно столкнуться с иными обозначениями для определения RV и QV. Например, в (Aït-Sahalia, Jacod, 2014) введены обозначения $RV = \hat{C}(\Delta_n)_t$, $QV = C_t$, $\Delta_i^n X = X_{i\Delta_n} - X_{(i-1)\Delta_n}$ и, таким образом, $\hat{C}(\Delta_n)_t \overset{P}{\to} [X,X]_t = C_t + \sum_{i=1}^{[t/\Delta_n]} (\Delta_i^n X)^2$, где $C_t = \langle X^c, X^c \rangle_t$.

Разделение промежутка $[0,\ t)$ таково, что $t_0 = 0 < t_1 < \ldots < t_N = t$ и $\sup\left|t_j - t_{j-1}\right| \to 0\ \ \forall j$ при $N \to \infty$, что соответствует предположению о наличии высокочастотных данных при условии регулярности данных, упомянутых выше, а именно — при их равномерном расположении, т.е. исключается случай микроструктурного шума, который сам по себе представляет обособленный и привлекающий растущий академический интерес[4].

1.2. Процесс X_t с учетом скачков и их последствия для *RV*

До этого момента процесс был определен как броуновский семимартингал вида $X_t = X_0 + \int_0^t a_s ds + \int_0^t \sigma_s dW_s$. Теперь введем в процесс дополнительный компонент скачков Y_t, преобразовав процесс в

$$X_t = X_0 + \int_0^t a_s ds + \int_0^t \sigma_s dW_s + Y_t, \tag{7}$$

где Y_t — как пример процесса в непрерывном времени — может быть выражен посредством сложного пуассоновского процесса.

Замечание 5. Сложный пуассоновский процесс Y_t — это стохастический процесс со скачками в непрерывном времени. Моменты скачков ведут себя согласно пуассоновскому процессу N_t с параметром λ, размер которых D_i случаен с некоторой функцией распределения G, не зависимой от N_t. В качестве примера рассмотрим процесс вида $Y_t = \sum_{i=1}^{N_t} D_i$, где (как частный случай) $\left\{D_i : i \geq 1\right\}$ *независимы* и *одинаково* распределены. В силу предположения независимости и одинакового распределения D_t применимо тождество Вальда для вычисления математического ожидания $\mathbb{E}\left(Y_t\right) = \mathbb{E}\left[\left(D_1 + \ldots + D_{N_t}\right)\right] = \lambda t \mathbb{E}\left(D\right)$ и дисперсии $V\left(Y_t\right) = \lambda t \mathbb{E}\left(D^2\right)$.

Основополагающим в финансовой математике, как и для всей теории ценообразования активов, является предположение об отсутствии арбитража как одного из краеугольных условий для моделирования процесса. Отсутствие арбитража, в свою очередь, предполагает, что процесс должен быть семимартингалом, который, в свою очередь, должен являться càdlàg. Данное требование удовлетворяется нашим предположением о свойстве càdlàg.

В свете (7) квадратическая вариация равна

$$QV = \int_0^t \sigma_s^2 ds + \sum_{0 \leq s \leq t} \left(\Delta X_s\right)^2, \tag{8}$$

где появилось дополнительное слагаемое $\sum_{0 \leq s \leq t} \left(\Delta X_s\right)^2$, отображающее эффект скачков, но X^c, $X^c{}_t = \int_0^t \sigma_s^2 ds$ все еще является IV.

Замечание 6. Следуя обозначению из замечания 2 и определению процесса X_t как $X_t = M_t + A_t$, квадратическая вариация X_t равна

$$\left[X, X\right]_t = \left\langle X^c, X^c \right\rangle_t + \sum_{0 \leq s \leq t} \left(X_s - X_{s-}\right)^2 =$$

$$= \left\langle X^c, X^c \right\rangle_t + \sum_{0 \leq s \leq t} \left(M_s - M_{s-}\right)^2 + \sum_{0 \leq s \leq t} \left(A_s - A_{s-}\right)^2 + 2 \sum_{0 \leq s \leq t} \left(M_s - M_{s-}\right) \sum_{0 \leq s \leq t} \left(A_s - A_{s-}\right) =$$

$$= \left[M, M\right]_t + \sum_{0 \leq s \leq t} \left(A_s - A_{s-}\right)^2 + 2 \sum_{0 \leq s \leq t} \left(M_s - M_{s-}\right) \sum_{0 \leq s \leq t} \left(A_s - A_{s-}\right).$$

Если процесс A_s непрерывен, то независимо от процесса M_t, $\left[X, X\right]_t = \left[M, M\right]_t$ является интегрированной дисперсией.

Так как RV — как оценка QV — теперь должна оценить QV с учетом дополнительного ее компонента, а именно, $\sum_{0 \leq s \leq t} \left(\Delta X_s\right)^2$, то данный факт не может не иметь определенных последствий для способности RV состоятельно и эффективно оценить QV. Основополагающей задачей, таким образом, становится необходимость *обособления* эффекта скачков от компонента IV и тем самым реабилитация оценки RV. Но как это сделать?

Потенциальное исследование последствий включения в процесс дополнительного компонента скачков должно быть сконцентрировано на качестве оценивания интегрированной дисперсии. При этом тип активности скачков определяет, как они будут влиять на поведение интегрированной

[4] В некоторой литературе используется термин «in-fill asymptotics» для обозначения сходимости (6), в силу того что на фиксированном промежутке (поэтому “in-fill”) предполагается все большая масса данных, $N \to \infty$.

дисперсии — центрального параметра динамики цены финансового актива. Следует отметить, что под качеством ОИД должна пониматься состоятельность RV. Качество ОИД представлено двумя фундаментальными для способности оценки характеристиками: скоростью, с которой RV стремится к IV, а также законом распределения ошибки оценивания IV посредством RV.

2. МЕТОДЫ ОЦЕНИВАНИЯ ИНТЕГРИРОВАННОЙ ВОЛАТИЛЬНОСТИ

Для анализа мы используем данные достаточно высокой частоты, которые распределены равномерно.

Существует несколько практических ограничений для предположения равномерности. Например, они характерны для высокочастотных временных рядов и подтверждают их эмпирические факты, указывающие на неправомерность предположения равномерности в ее полной мере. Одно из наиболее частых явлений — микроструктурный шум, источником которого могут быть такие скачки, как разница цен «bid» и «ask», а также кластеризация данных, возникающая в определенные периоды времени, или же устоявшиеся типы поведения в распределении данных (например, более высокая волатильность в начале и в конце дня, так называемая U-образная волатильность). Это сказывается на стабильности измеряемого параметра и представляет отдельную область исследования, приобретающую популярность с ростом доступности больших данных, увеличивающейся вычислительной мощности.

Изложим кратко еще раз задачу, стоящую перед нами с введением обозначений согласно замечанию 4. Пусть оценка $RV = \hat{C}\left(\Delta_n\right)_t$ определяется на некотором временном промежутке $[0,\ T]$, состоящем из интервалов разбиения $\Delta_n \to 0$ при $n \to \infty$. Посредством RV мы стремимся оценить $QV = C_t$, — при том что центральным для нашей оценки является непосредственно интегрированная дисперсия, $\int_0^t \sigma_s^2 ds$ — параметр, описывающий динамику изменчивости процесса. Поэтому при наличии скачков в основополагающем процессе X_t предстоит обособить $\int_0^t \sigma_s^2 ds$ от компоненты скачков $\sum_{i=1}^{\left[T/\Delta_n\right]} \left(\Delta_i^n X\right)^2$ (см. (8)), что равносильно достижению устойчивости оценки к скачкам.

Рассмотрим пример. Пусть процесс имеет форму $X_t = X_0 + \int_0^t \sigma_s dW_s + Y_t$, с несложным компонентом Y_t, описывающим активность скачков. Разделим промежуток $[0, T]$ на интервалы $\left((i-1)\Delta_n, i\Delta_n\right]$. Если данный интервал включает скачок размера J, то $\Delta_i^n X$ из этого интервала будет близок к J, отличен от нуля и не зависеть от n. Предполагая конечное число скачков, например N_T на промежутке $[0, T]$ — для достаточно большого n среди всех $\left((i-1)\Delta_n, i\Delta_n\right]$. И тогда именно N_T число разбиений будут содержать скачки J, а все остальные интервалы из $[0,\ T]$ будут свободны от скачков. Для выявления скачков и выделения их из оценки (и тем самым, обособляя их эффект) с целью состоятельного оценивания интегрированной дисперсии определим последовательность u_n, стремящуюся к нулю, и тем самым исключим приращения, превышающие порог u_n. Таким образом, наша оценка RV имеет вид

$$\hat{C}\left(\Delta_n, u_n\right)_t = \sum_{i=1}^{\left[T/\Delta_n\right]} \left(\Delta_i^n X\right)^2 1_{\left\{\left|\Delta_i^n X\right| \le u_n\right\}}. \tag{9}$$

Выбор u_n должен быть достаточно осторожным, т.е. скорость, с которой u_n приближается к 0, не должна исключать приращения, не включающего скачки. Данная идея представляет основу метода порогового усечения (truncated (threshold) realised variance) как одного из классов оценки RV, который будет обсужден в следующих разделах.

Таким образом, при $\int_0^t \sigma_s^2 ds = C_t$ и, принимая во внимание процесс $\hat{C}\left(\Delta_n, u_n\right)_t$, предельное вероятностное распределение ошибки ОИД посредством оценки из класса пороговых вариаций вида

$$\left(\hat{C}\left(\Delta_n, u_n\right)_t - C_t\right) / \sqrt{\Delta_n}, \tag{10}$$

будет гауссовским распределением с дисперсией распределения ошибки, имеющей наиболее простой вид в случае конечной активности скачков.

Замечание 7. $\mathbb{E}\left(\left(\left(\hat{C}\left(\Delta_n, u_n\right)_t - C_t\right)\right)^2 / \sqrt{\Delta_n} \mid \mathcal{F}\right) = 2\int_0^t \sigma_s^4 ds$, и поэтому

$$\mathcal{L}\left(\left(\hat{C}\left(\Delta_n, u_n\right)_t - C_t\right) / \left\{\sqrt{\Delta_n}\sqrt{2\int_0^t \sigma_s^4 ds}\right\} \middle| \mathcal{F}\right) \to \mathcal{N}(0,\ 1).$$

Нормальное распределение скачков будет иметь более сложный вид в случае бесконечной активности скачков, что и является фокусом анализа сходимости оценки. Конечно, помимо

активности скачков, на предельное распределение ошибки будут также влиять и другие факторы (например, поведение дисперсии исследуемого процесса, зависимость дисперсии по отношению к броуновскому движению и др.).

Описав суть задачи, представим два основных класса оценок реализованной вариации.

2.1. Класс многостепенных вариаций

Наиболее популярным классом оценок интегрированной дисперсии является класс многостепенных вариаций (multipower variation, *MPV*). Асимптотическая теория для данного класса оценок *RV* была разработана группой ученых под руководством Оле Барндорфф-Нелсона (Ole Barndorff-Nielsen). Наиболее фундаментальными в развитии асимптотической теории для данного класса оценок являются работы (Barndorff-Nielsen, Shephard, Winkel, 2006; Barndorff-Nielsen et al., 2006), наиболее цитируемыми работами, где исследован этот класс оценок, — (Barndorff-Nielsen, Shephard, 2002, 2004). Значительный вклад в развитие предельных теорем для стохастических процессов внесла работа выдающихся ученых в области теории вероятностей (Jacod, Shiryaev, 2003).

Определим многостепенную вариацию общего вида

$$MPV_N(m;r) = d_{m,r}\left(\frac{N}{N-m+1}\right)N^{0,5r-1}\sum_{i=1}^{N-m+1}\left|\Delta X_i\right|^{r/m}\ldots\left|\Delta X_{i+m-1}\right|^{r/m}, \tag{11}$$

где ΔX_i — гауссовские независимые одинаково распределенные случайные величины; $d_{m,r}$ — константа, зависящая от параметров m и r; $\left(N/(N-m+1)\right)N^{0,5r-1}$ — корректирующий фактор, необходимый в силу конечности выборки данных. Таким образом, $MPV_N(m;r)$ как оценка сходится к интегрированной дисперсии в случае конечной активности скачков:

$$MPV(m;r) \xrightarrow{u.c.p.} \int_0^1 \sigma_u^r du. \tag{12}$$

Так, например, $MPV_N(1;\ 2) = RV_N$ (реализованная вариация — realised variation), $MPV_N(2;\ 2) = BV_N$ (двухстепенная вариация — bipower variation), $MPV_N(3;\ 2) = TPV_N$ (трехстепенная вариация — tripower variation) и т.д.

Далее на примере BV_N отметим определенные особенности данной оценки как частного случая многостепенных вариаций и тем самым определим вектор потенциального направления для исследования состоятельности ОИД этого класса:

$$BV_N = 0,5\pi\left(\frac{N}{N-1}\right)\sum_{i=1}^{N-1}\left|\Delta X_i\right|\left|\Delta X_{i+1}\right|. \tag{13}$$

Замечание 8. $\Delta X_i,\ \Delta X_{i+1} \sim \text{iid}\,\mathcal{N}(0,\sigma^2/N)$ и поэтому $\mathbb{E}\left[\left|\Delta X_i\right|\left|\Delta X_{i+1}\right|\right] = 2\sigma^2/\pi N$. См. также (Barndorff-Nielsen, Shephard, 2006).

Для случая конечной активности скачков оценка BV_N является устойчивой к скачкам (т.е. состоятельной) — поскольку мы предполагаем бесконечно делимые приращения, у каждых двух смежных таких приращений может быть только один скачок (в силу предположения конечной активности скачков!), который будет нейтрализован в силу перемножения приращения, содержащего скачок, и смежного приращения (диффузии), не имеющего скачка, порядка $1/\sqrt{N}$. При $N \to \infty$ эффект скачка будет асимптотически устранен. На практике, однако, эти приращения представляют некий фиксированный промежуток и поэтому размер такого промежутка имеет определенный предел. По этой причине приращения не могут достаточно быстро приближаться к нулю (так как предпосылка $N \to \infty$ является теоретической), что является причиной чаще всего завышенной оценки BV_N. Вследствие этого для определения оптимального размера приращения обычно руководствуются общепринятыми на практике установками, связанными с ликвидностью и особенностями микроструктурного шума. Более того, нейтрализация *эффекта скачков* за счет стремления к нулю со скоростью $1/\sqrt{N}$ будет недостаточной для применения центральной предельной теоремы в случае непрерывного процесса X_t, содержащего скачки даже конечной активности (Andersen, Dobrev, Schaumburg, 2012, p. 77). Недостаточность асимптотической теории, основанной на применении предельной теоремы для непрерывного процесса, содержащего скачки различного типа, является поводом для развития и применения иных многостепенных вариаций.

Даже в случае конечной активности скачков RV_N уже не будет состоятельной ОИД, тогда как BV_N является состоятельной оценкой интегрированной дисперсии в случае конечной активности скачков. Однако BV_N не предоставляет возможности применять предельную теорему в случае как конечной, так и бесконечной активности скачков. Наименьшую предельную вариацию в данном

классе оценок имеет TPV_N, что позволяет ей более гибко оперировать асимптотической теорией в случае наличия определенных типов активности скачков.

2.2. Класс пороговых вариаций[5]

В начале разд. 2 был приведен пример нейтрализации эффекта скачков с использованием метода пороговых вариаций. Далее, обобщим определение данного класса оценок реализованной вариации (TV) для многомерного процесса X_t, где $j,l=1,\ldots,m$:

$$\hat{C}\left(\Delta_n u_n\right)_T^{jl} = \sum_{i=1}^{\lceil T/\Delta_n \rceil} \Delta_i^n X^j \Delta_i^n X^l 1_{\left\{|\Delta_i^n X| \le u_n\right\}}. \tag{15}$$

Как было отмечено раньше, важным для данного класса оценок является выбор стремящейся к нулю последовательности u_n так, чтобы непрерывная часть приращений была сохранена тогда, как скачки должны быть исключены (усечены) при соблюдении определенных условий.

Замечание 9. Одним из таких условий станет выбор порогового значения $u_n \asymp \Delta_n^{\omega}$, где $\omega \in \left(0;0{,}5\right)$ такого, что $u_n / \sqrt{\Delta_n \log\left(1/\Delta_n\right)} \to \infty$ и $u_n \to 0$ — как условия непрерывности согласно модулю непрерывности Леви.

Для иллюстрации оценок данного класса приведем оценки, предложенные в (Andersen, Dobrev, Schaumburg, 2012, p. 78)[6]. Авторы предлагают две оценки интегрированной дисперсии.

1. $MinRV$ включает два смежных наблюдения, которые в предельном случае никогда не могут содержать два скачка — инструмент для минимизации эффекта скачка посредством умножения компонента, содержащего скачок (например, $|\Delta X_i|$), на компонент, содержащий диффузию, $|\Delta X_{i+1}|$ для определенного значения i:

$$MinRV = \frac{\pi}{\pi - 2}\left(\frac{N}{N-1}\right)\sum_{i=1}^{N-1} \min\left(|\Delta X_i|, |\Delta X_{i+1}|\right)^2. \tag{16}$$

2. $MedRV$ состоит из трех смежных наблюдений, посредством чего авторы стремятся уменьшить вариацию, предоставляемую TPV_N — как оценки с наименьшей вариацией в классе многостепенных вариаций[7]:

$$MedRV = \frac{\pi}{6 - 4\sqrt{3} + \pi}\left(\frac{N}{N-2}\right)\sum_{i=2}^{N-1} \mathrm{med}\left(|\Delta X_i|, |\Delta X_{i+1}|, |\Delta X_{i+2}|\right)^2. \tag{17}$$

Так, исключение скачков конечной активности происходит посредством $MinRV$, тогда как минимальная вариация достигается с помощью $MedRV$. Авторы назвали данный метод усечением ближайшей окрестности (nearest neighbour truncation). Важно отметить, что активность скачков в данном случае предполагается конечной.

Сравнивая состоятельность различных оценок реализованной вариации, следует отметить, что краеугольным является достижение оценкой компромисса между двумя противоречащими друг другу результатами. Так, при достижении оценкой лучшей эффективности, необходимо учесть, что такое достижение постоянно находится в определенном конфликте со степенью устойчивости данной оценки к скачкам. Именно баланс между двумя этими характерностями и определяет уровень гибкости асимптотической теории, подразумеваемой той или иной оценкой.

3. СКАЧКИ КАК ВЕКТОР РАЗВИТИЯ АНАЛИЗА СОСТОЯТЕЛЬНОСТИ ОЦЕНКИ

Рассмотрим процессы, состоящие из двух компонентов — диффузионного и скачкообразного. Ранее было введено понятие «*состоятельность оценки*» для интегрированной дисперсии данного процесса. Именно скачки являются фактором, обуславливающим состоятельность оценки, точнее, — скорости ее сходимости и предельного закона распределения ошибки. Поэтому состоятельная ОИД должна пониматься как оценка, устойчивая к скачкам. Насколько она устойчива

---

[5] Класс пороговых вариаций также называют классом усечений, так как усечение происходит посредством установленного порога.

[6] Иногда в литературе данный метод приводится как отдельный от класса пороговых вариаций, наряду с оценками Фурье, оценками, основанными на ранжировании и иными. В своем классическом виде метод пороговых вариаций предполагает непосредственно анализ последовательности u_n — как правила для усечения скачков.

[7] Выражения перед корректирующими факторами в случаях (15) и (16) необходимы для несмещенности предлагаемых авторами оценок.

к скачкам, т.е. каково влияние компонента скачков на скорость сходимости оценки и распределение ее ошибки, исследуется с помощью асимптотической теории, главным инструментом которой являются предельные теоремы.

Несмотря на огромную работу, проделанную различными авторами в отношении развития асимптотической теории для ряда оценок интегрированной дисперсии, можно привести некоторые соображения для мотивации дальнейшего развития анализа устойчивости оценки интегрированной дисперсии.

Так, в работе (Aït-Sahalia, Jacod, 2014, p. 200), посвященной высокочастотной финансовой эконометрике (high frequency financial econometrics), авторы уделяют много внимания анализу квадратической вариации и ее оценке посредством реализованной вариации, делая акцент на практической стороне работы с использованием данных высокой частоты. Описав особенности обоих классов ОИД (многостепенные и пороговые вариации) и применяя метод усечения ближайшей окрестности, описанный выше, авторы делают заключение: «Оценивая интегрированную дисперсию менее точно, чем другие методы, метод усечения ближайшей окрестности достаточно мало теряет в точности оценивании интегрированной дисперсии. Несмотря на это, результат использования данного метода может оказаться потенциально лучшим для процессов с бесконечной активностью скачков, которые являются *основным ограничением* применимости многостепенных и пороговых вариаций».

Под лучшим результатом подразумевается устойчивость оценки к различной активности скачков, включая бесконечную, с чем мы связываем высший уровень гибкости, т.е. лучшую устойчивость оценки интегрированной дисперсии.

В работе (Barndorff-Nielsen, Shephard, 2007, p. 39) отмечается, что согласно (Barndorff-Nielsen, Shephard, Winkel, 2006) даже конечная активность скачков влияет на сходимость BV_N к интегрированной дисперсии, т.е. скачки некоторым образом воздействуют на скорость сходимости оценки, что, в свою очередь, ограничивает применение асимптотической теории в случае скачков, тогда как такое воздействие отсутствует для сходимости многостепенных вариаций высшего порядка, в частности, когда $m \geq 3$ для $MPV(m; r)$. Таким образом, этот результат открывает определенную перспективу получения новых результатов о сходимости многостепенных вариаций высшего порядка при наличии скачков различной активности. Интересно, что в дополнение к результатам (Barndorff-Nielsen, Shephard, Winkel, 2006) в работе (Woerner, 2004) доказывается, что свойства предела по вероятности для BV_N не меняются в некоторых случаях бесконечной активности скачков. Авторы этих работ подчеркивают необходимость дополнительных усилий для получения окончательных результатов.

В (Eberlein, 2010), описывая особенности и потенциал использования диффузионных процессов, автор утверждает, что диффузионные процессы сами по себе неспособны дать достаточно адекватной картины для некоторых эмпирически установленных фактов, если рассматривать свойства законов распределения этих процессов без использования скачков — одной из причин растущей роли скачков во многих областях финансов (ibid., p. 1894). Автор (Eberlein, 2010) считает, что растущей роли скачков способствуют развитие теории семимартингалов и растущая вычислительная мощь. Начиная со стандартного процесса Пуассона, он вводит меру Леви и заканчивает обсуждение перечислением возможностей и вариантов использования процессов Леви для определения скачков и их включения в семимартингальный процесс. Таким образом, именно добавление скачков в основополагающий диффузионный процесс должно улучшить описательную функцию диффузионных процессов. Значимость теории семимартингалов для современной теории финансов также подчеркивает (Shiryaev, 1999, p. 294–313).

На рис. 1–2 представлены иллюстрации скачкообразных процессов с бесконечной активностью и конечной вариацией, а также с бесконечной активностью и бесконечной вариацией, смоделированные как процессы Леви.

Как следует из эмпирических наблюдений (Christensen, 2014, p. 2), самих по себе диффузионных процессов недостаточно, в частности, для описания цен финансовых активов. Согласно гипотезе эффективного рынка новости должны мгновенно отражаться в изменениях цен финансовых активов. Поэтому скачки являются естественным и привлекательным дополнительным компонентом для моделирования эффекта таких новостей.

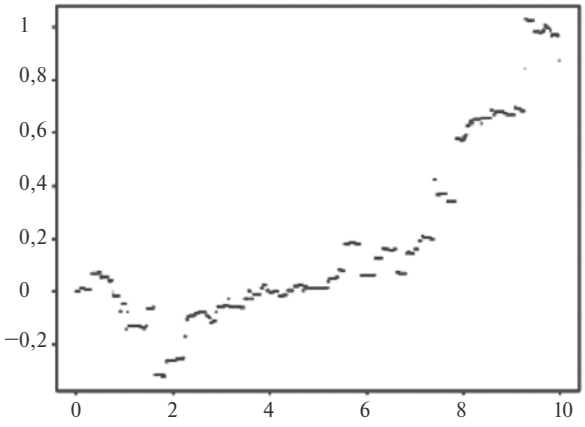

Рис. 1. Скачкообразный процесс с бесконечной активностью и конечной вариацией (вариация гамма)

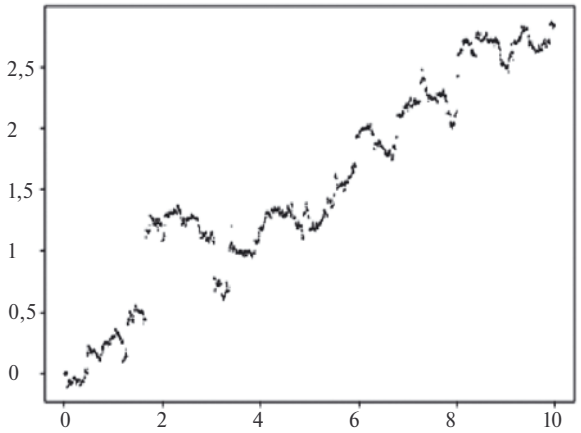

Рис. 2. Скачкообразный процесс с бесконечной активностью и бесконечной вариацией (нормальный обратно гауссовский процесс)

На рис. 1–2 оба процесса представляют собой предельный случай семейства гиперболических функций. Симуляция произведена в программном пакете R.

Для класса пороговых вариаций[8] в работе (Mancini, 2009, p. 271–276) рассматриваются случаи конечной и бесконечной активности скачков (моделируется посредством процесса Леви). Сравнивая результаты с оценками из класса многостепенных вариаций, автор утверждает, полагаясь на результаты симуляций, что пороговые оценки, развитые ею, не менее эффективны, а в случае когда частота доступных данных ограничена, — даже более эффективны. Более того, пороговая оценка является эффективной даже при неравноудаленных (по времени) эмпирических данных, а также в случае меняющегося порога — вне зависимости от динамики дисперсии. В работе (Mancini, 2012, p. 444) в отношении оценки интегрированной дисперсии обосновывается необходимость дополнительных исследований, посвященных скорости сходимости оценки в случае бесконечной активности скачков. Существуют LM-тесты. Отсутствуют результаты применимости данных тестов локально (то есть не предельные случаи). Более того, необходимо развить непараметрические тесты для обнаружения скачков для спот-дисперсии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Все большая доступность больших данных, растущие возможности их обработки, новые результаты теории семимартингалов расширяют горизонты развития непараметрических методов, каким и является метод оценивания интегрированной дисперсии на основе диффузионно-скачкообразных процессов. ОИД должна пониматься как один из важнейших параметров прогноза динамики цены финансового актива, в частности сложного финансового инструмента, деривативa.

В своей описательной функции диффузионные процессы имеют ряд ограничений. Причина, по которой в процесс включен дополнительный компонент — скачки, приобретающие в силу новых практических возможностей и теоретических усовершенствований все большую роль в финансовой математике. Так, именно *устойчивость* оценки интегрированной дисперсии к скачкам и определяет степень ее состоятельности. Данная степень устойчивости показывает, насколько применима асимптотическая теория, где ее главными условиями являются скорость сходимости оценки и предельный закон распределения ошибки оценки.

В настоящей работе приведен ряд доводов в пользу необходимости дальнейших исследований влияния активности скачков на состоятельность ОИД. Данные доводы имеют в большей степени теоретический характер. Результаты, достигнутые асимптотической теорией для конечной активности скачков и для некоторых типов бесконечной активности скачков, позволяют очертить контуры необходимого исследования и наметить направление развития анализа асимптотической теории для оценок интегрированной дисперсии.

[8] Теоретическая основа данного класса была заложена в (Mancini, 2001).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

Andersen T.G., Dobrev D., Schaumburg E. (2012). Jump robust volatility estimation using nearest neighbour truncation. *Journal of Econometrics,* 169, 75–93.

Aït-Sahalia Y., Jacod J. (2014). *High frequency financial econometrics*. Princeton: Princeton University Press.

Barndorff-Nielsen O.E., Graversen S.E., Jacod J., Podolskij M., Shephard N. (2006). A central limit theorem for realized power and bipower variations of continuous semimartingales. In: *From stochastic calculus to mathematical finance: The Shiryaev festschrift*. Y. Kabanov, R. Lipster (eds.), 33–68. Berlin, Heidelberg: Springer–Verlag.

Barndorff-Nielsen O.E., Shephard N. (2002). Econometric analysis of realized volatility and its use in estimating stochastic volatility models. Part 2. *Journal of the Royal Statistical Society Series B — Statistical Methodology*, 64, 253–280.

Barndorff-Nielsen O.E., Shephard N. (2004). Power and bipower variation with stochastic volatility and jumps. *Journal of Financial Econometrics*, 2, 1, 1–37.

Barndorff-Nielsen O.E., Shephard N. (2006). Econometrics of testing for jumps in financial economics using bipower variation. *Journal of Financial Econometrics,* 4, 1, 1–30.

Barndorff-Nielsen O.E., Shephard N. (2007). Variation, jumps, market frictions and high frequency data in financial econometrics. In: R. Blundell, T. Persson, W. Newey (eds.). *Advances in Economics and Econometrics. Theory and Applications*. Ninth World Congress. Cambridge: Cambridge University Press.

Barndorff-Nielsen O.E., Shephard N., Winkel M. (2006). Limit theorems for multipower variation in the presence of jumps in financial econometrics. *Stochastic Processes and their Applications,* 116, 796–806.

Christensen K. (2016). High frequency data econometrics. PhD course, Aarhus University. Available at: https://econ.au.dk/fileadmin/site_files/filer_oekonomi/subsites/creates/Diverse_2016/PhD_High-Frequency/Slides_day_2.pdf

Eberlein E. (2010). Jump processes. In: *Encyclopaedia of quantitative finance by Rama Cont.* In 4 vols., 1850–1869. Chichester: John Wiley & Sons.

Jacod J., Shiryaev A.N. (2003). *Limit theorems for stochastic processes*. 2nd ed. N.Y.: Springer-Verlag.

Mancini C. (2001). Disentangling the jumps of the diffusion in a geometric jumping Brownian motion. *Giornale dell'Istituto Italiano degli Attuari*, 64, 19–47.

Mancini C. (2009). Non parametric threshold estimation for models with stochastic diffusion coefficient and jumps. *Scandinavian Journal of Statistics*, 36, 270–296.

Mancini C. (2012). Jumps. *Handbook of volatility models and their applications*. L. Bauwens, C. Hafner, S. Laurent (eds.). New Jersey: Wiley and Sons, 403–445.

Protter P. (2004). *Stochastic integration and differential equations*. N.Y.: Springer–Verlag.

Shiryaev A.N. (1999). *Essential of stochastic finance: Facts, models and theory*. Singapore: World Scientific.

Shiryaev A.N. (1999). *Essential of stochastic finance: Facts, models, theory*. Advanced Series on Statistical Science & Applied Probability. 1st ed. Singapore: Scientific Pub. Co Inc.

Woerner H.C.J. (2004). Power and multipower variance: Inference for high frequency data. In: Shiryaev Al. *Handbook of Stochastic Finance*. Chapter 12, 343–364. N.Y.: Springer–Verlag.

Methods for estimating integrated variance: Jump robustness issues in high frequency time series

© 2024 Z.O. Kosymov

Z.O. Kosymov,
Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; e-mail: zohirsho1@gmail.com

Received 13.02.2024

The author is grateful to his supervisors — Lukas E.H. and Gushchin A.A — for their notes and valuable comments for the text of this article. It is aslo worth noting the importance of advice by Kartaev F.S. while preparing the article for publication.

Abstract. Integrated variance is a volatility measure of a process in continuous time, which is applicable in financial mathematics as a means to optimize a portfolio, project dynamics of a price of a financial asset. The consistency of an estimator for integrated variance of a random process is at the core of this article. A fundamental diffusion process is extended by adding a jump component as a means of improving the descriptive function of the process. It is activity of jumps that is a factor subject to which is the consistency of the estimator for integrated variance. Due to this fact, consistency is defined as an extent to which the estimator at hand is jump robust. Two main methods for estimating integrated variance are considered and the capacity of corresponding estimators to withstand the effect of jumps while converging is briefly analyzed. The arguments indicating a necessity for further research of the effect of jumps with reference to works of the authors who have established a ground for analysis of integrated variance and those works containing main asymptotic results for consistency of integrated variance estimators are elaborated. Based on this, avenue for further research and development of asymptotic theory for consistency of an estimator for integrated variance is identified.

Keywords: integrated variance, diffusion process, consistency, jumps, jump robustness, asymptotic theory.

JEL Classification: C02, C32, C53, C65.

UDC: 519.214.

For reference: **Kosymov Z.O.** (2024). Methods for estimating integrated variance: Jump robustness issues in high frequency time series. *Economics and Mathematical Methods*, 60, 3, 107–117. DOI: 10.31857/S0424738824030095 (in Russian).

ЭКОНОМИКА И МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ, 2024, том 60, № 3, с. 118–128

МАТЕМАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЭКОНОМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

Деформация кривых волатильности российского фондового рынка на примере маржируемых опционов на фьючерсные контракты на индекс РТС

© 2024 г. К.Н. Муляев, С.А. Переход

К.Н. Муляев,
Сбербанк КИБ, Москва; e-mail: mulyaevkostya@mail.ru

С.А. Переход,
Финансовый университет при Правительстве РФ, Москва; e-mail: sperekhod@yandex.ru

Поступила в редакцию 14.08.2023

Авторы выражают благодарность руководителю кафедры финансовых рынков и финансового инжиниринга Финансового университета при Правительстве РФ Елене Николаевне Алифановой и анонимному рецензенту за ценные рекомендации, которые были использованы при подготовке статьи.

Аннотация. Актуальность исследования связана с необходимостью переоценки российского фондового рынка в части соотношения параметров риска с доходностью активов в связи с глобальными структурными изменениями, произошедшими в 2022 г. Предметом данного исследования выступают кривые волатильности, рассчитанные по котировкам биржевых опционов на фьючерсы индекса РТС. Цель исследования — проанализировать соотношения кривых волатильности с распределением доходности индекса широкого рынка акций РТС в 2015–2022 гг.; оценить изменения структуры такого соотношения в шоковом 2022 г. по сравнению с предыдущими периодами; рассмотреть возможности применять модели прогнозирования будущей волатильности GARCH в 2022 г. и хеджировать стратегии на российском фондовом рынке. Вопрос интерпретации динамики кривых волатильности является дискуссионным, однако достаточно теоретически разработанным в теории оценки производных финансовых инструментов. В результате исследования найдены не взаимосвязанные структуры распределения доходностей и кривых волатильности на сводный индекс РТС на всем рассматриваемом периоде, независимо от наличия внешних шоков. Сделан вывод о том, что на российском фондовом рынке инвесторы предпочитают защитные опционы, а не спекулятивные, несмотря на отрицательную асимметрию распределения доходности индекса РТС во всех рассматриваемых периодах. И, несмотря на больший вес положительных доходностей в распределении доходности индекса РТС на каждом рассматриваемом периоде в силу технических особенностей функционирования показателей доходности. Кроме того, обнаружено, что отрицательная асимметрия распределения доходности не обязательно должна соотноситься с растущими кривыми волатильности.

Ключевые слова: GARCH; подразумеваемая волатильность; оценка стоимости опционов; фьючерсы на индекс РТС; фондовый рынок.

Классификация JEL: C52, C53, C58.

УДК: 336.7.

Для цитирования: **Муляев К.Н., Переход С.А.** (2024). Деформация кривых волатильности российского фондового рынка на примере маржируемых опционов на фьючерсные контракты на индекс РТС // *Экономика и математические методы*. Т. 60. № 2. С. 118–128. DOI: 10.31857/S0424738824030104

1. ВВЕДЕНИЕ

Финансовый шок 2022 г. дополнил антиколлекцию ряда российских кризисов за последние 30 лет. Поведение инвесторов в результате начала Специальной военной операции (СВО) на Украине повлекло за собой масштабные сдвиги в оценке инвесторами риска биржевых активов, в том числе опционов на фьючерсы российских акций. Кривые волатильности являются показателями прогноза (оценки) инвесторами будущей волатильности и выполняют важную роль в оценке производных финансовых активов, риск-менеджменте и управлении инвестиционным портфелем. Однако они являются текущим показателем, подверженным общему настроению инвесторов, которое, вследствие нового этапа санкций и оттока иностранных инвестиций, радикально изменило

отношение к риску. Новые условия функционирования российского финансового рынка привели к экстремально высокой волатильности цен акций, что затруднило оценку стоимости производных финансовых инструментов (ПФИ) и требует анализа того, как инвесторы оценивают будущую волатильность и какую премию они готовы заплатить за защитные и спекулятивные опционы в новых условиях.

Наш научный вклад в существующие работы экономистов на данную тему связан с исследованием кривых волатильности и подразумеваемой волатильности на каждом страйке исполнения опционов на российском фондовом рынке. Несмотря на относительно высокую степень разработанности темы в иностранных источниках, российские ученые уделяли меньше внимания данной тематике, хотя шоки на российском финансовом рынке актуализировали данную проблематику. В связи с этим мы продолжаем дискуссию, с одной стороны — о методах справедливой оценки производных финансовых инструментов (ПФИ), а с другой — о поведенческих паттернах инвесторов во время финансового стресса на примере России.

Под исследуемым нами стандартным опционом понимают контракт, согласно которому покупатель приобретает право, а продавец берет на себя обязанность купить (продать) актив по определенной цене (страйку) или выплатить денежную сумму в определенный момент времени (Шелемех, 2017, с. 78). Под подразумеваемой волатильностью (англ.: implied volatility) понимается такое значение волатильности, которое приводит теоретическую цену опциона к его рыночной стоимости. Подразумеваемая волатильность отражает текущие ожидания инвесторов будущей реализованной волатильности (англ.: realized volatility). Предполагается, что более точная оценка риска повышает эффективность рынка и подразумеваемую волатильность торгуемых опционов (Смирнов, Кузнецов, Сливинский, 2021, с. 77).

Обвал цен на активы позволил предположить возникновение условия для арбитражных стратегий. Для исследования рациональности оценки биржевых опционов инвесторами на фоне уникальных экономических и политических условий развития российского фондового рынка мы хотим ответить на следующие вопросы. Как соотносятся значения подразумеваемой волатильности при разных уровнях цены исполнения опциона на фьючерс РТС? Какая существует взаимосвязь между кривыми волатильности фьючерса РТС с распределениями доходности по индексу РТС? Изменилась ли структура кривой волатильности фьючерса РТС за 2022 г. по сравнению с периодом 2015–2021 гг.? Изменилась ли взаимосвязь между кривой волатильности фьючерса РТС за 2022 г. с распределением доходности по индексу РТС по сравнению с периодом 2015–2021 гг.? Насколько применима модель прогнозирования будущей волатильности GARCH с учетом влияния финансового шока на российском финансовом рынке?

Практическая значимость исследования состоит в анализе показателей волатильности биржевых опционов за 2022 г. и их сравнении с историческими отклонениями в период 2015–2021 гг., что позволило дополнить общее понимание взаимосвязи кривой волатильности с распределением доходности акций, представленное дальше, в условиях российской экономики, а также оценить возможности управления рисками портфеля с помощью биржевых опционов.

2. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Теоретической основой и практическим фундаментом для анализа волатильности как основного фактора в оценке опционов являются статьи (Black, Scholes, 1973; Merton, 1973a, 1973b). Последующие экономисты пришли к выводу, что оценка ПФИ происходит на основе риск-нейтрального распределения доходности базового актива за вычетом премии за риск инструмента. В свою очередь, на основе исторических наблюдений оценивается реальное распределение — связь между ними может быть относительно произвольной, хотя в последних исследованиях (Ross, 2015) было показано наличие факторов, определяющих разброс этих значений. Различие же между риск-нейтральным и реальным распределением обусловлено несклонностью к риску рыночных агентов, что приводит к возникновению «премии за риск». В существующих исследованиях анализируют ее изменение под влиянием внешних событий (к примеру, что делает инвесторов «рискофобами» или «рискофилами»), однако сложность оценки состоит в отделении объективной рыночной премии за риск от реальной оценки будущего распределения доходности инвесторам.

Возвращаясь к моделям, анализирующим волатильность, отметим, что важным открытием стала модель авторегрессионной условной гетероскедастичности (Generalized AutoRegressive Conditional

Heteroskedasticity, GARCH). Модель была разработана в 1986 г. (Bollerslev, 1986) и представляла собой статистическое моделирование для прогнозирования волатильности доходности финансовых активов. С тех пор она, а именно ее конфигурация GARCH (1,1), активно используется для прогноза будущей волатильности. В работе (Hansen, Lunde, 2005) на примере 330 эконометрических моделей волатильности было доказано, что именно GARCH (1,1) генерирует наилучшие прогнозы. Дополнила метод GARCH разработанная в 2009 г. Фульвио Корси (Corsi, 2009) модель Heterogeneous Autoregressive model of the Realized Volatility (HAR-RV), а также Autoregressive fractionally integrated moving average (ARFIMA), основанная на анализе временных рядов, которые обобщают модель ARIMA (авторегрессионное интегрированное скользящее среднее), допуская нецелочисленные значения разностного параметра.

Высокая волатильность российского финансового рынка также привлекает исследователей. В 2017 г. опубликована работа, в которой было проведено сравнение прогнозной силы 88 GARCH-моделей, 10 HAR-RV и 4 ARFIMA для прогнозирования волатильности на 1 день 10 биржевых активов на Московской бирже (Аганин, 2017, с. 81). Автор сделал вывод о более высокой прогнозной силе моделей из семейства HAR-RV по сравнению с GARCH в результате оценки волатильности по ценам закрытия торговых дней. Ранее также изучалась стохастическая волатильность опционов на акции Газпрома и индекса S&P 500 (Крицкий, Лисок, 2007), где авторы с помощью асимптотического уравнения Фоккера–Планка–Колмогорова продемонстрировали ее прогнозную силу при долгосрочном инвестировании.

Последней значимой оценкой волатильности стало исследование (Баженов, Фантаццини, 2019) наиболее ликвидных российских акций, где эконометрическими моделями GARCH, ARFIMA и HAR-RV с дополнительными регрессорами — подразумеваемой опционной волатильностью и числом интернет-запросов в поисковой системе Google — анализировалась подразумеваемая волатильность опционов. Авторы сделали вывод, что вмененная волатильность серьезно влияет на реализованную волатильность исследуемых акций, а Google Trends не имеет такого существенного влияния.

Для нахождения новых факторов, влияющих на будущую реализованную волатильность, помимо подразумеваемой, были проведены исследования, в которых предлагалось использовать число интернет-запросов в качестве квазипоказателя заинтересованности инвесторов на рынке нефти (Campos, Cortazar, Reyes, 2017). В более ранних работах (Donaldson, Kamstra, 2005) другими квазипоказателями заинтересованности инвесторов в активе предлагалось брать число новостей и объем торгов, но был сделан вывод о незначимости этих показателей в прогнозировании будущей реализованной волатильности.

Таким образом, высокая частота шоков российского финансового рынка требует актуализации оценки волатильности. Ранее опубликованные работы использовали данные предыдущих кризисов, теперь же необходим анализ последствий санкций 2022 г. В свою очередь, иностранные работы выступают методологической базой исследования, но они не затрагивают российской специфики.

3. МЕТОДОЛОГИЯ

Оценка всех производных финансовых инструментов основана на следующем уравнении имени Блэка–Шоулза:

$$\frac{\partial V}{\partial t} + S^2\sigma^2 \frac{1}{2}\frac{\partial^2 V}{\partial S^2} + rS\frac{\partial V}{\partial S} = rV, \tag{1}$$

где V — стоимость производного финансового инструмента; S — стоимость базового актива; σ — волатильность базового актива; t — показатель времени; r — безрисковая ставка процента.

С учетом ограничений и особенностей выплаты по опционам в случае их исполнения примем: $\max(S-K)$ — для колл-опциона; $\max(K-S)$ — для пут-опциона, S — стоимость базового актива в момент исполнения; K — цена исполнения (страйк), а также с учетом особенностей опционов на фьючерсы. Зависимость между спот-ценой акции и фьючерсной ценой определяется как

$$F = S\,\mathrm{e}^{(r-d)T}, \tag{2}$$

где F — фьючерсная цена акции; S — спот-цена акции; r — безрисковая ставка процента; d — дивидендная доходность; T — срок обращения фьючерса.

Дифференциальное уравнение преобразуется в одну из разновидностей модели Блэка–Шоулза — модель оценки опционов на фьючерсы Блэка (также известная как модель Блэка-76):

– расчетная стоимость европейского колл-опциона на фьючерс $C = F\,\mathrm{e}^{-rT} N\left(d_1\right) - K\,\mathrm{e}^{-rT} N\left(d_2\right)$;

– расчетная стоимость европейского пут-опциона на фьючерс $P = K\,\mathrm{e}^{-rT} N\left(-d_2\right) - F\,\mathrm{e}^{-rT} N\left(-d_1\right)$,

где

$$d_1 = \left(\ln\left(F / K\right) + 0{,}5\sigma^2 T\right) / \left(\sigma\sqrt{T}\right), \tag{3}$$

$$d_2 = \left(\ln\ln\left(F / K\right) - 0{,}5\sigma^2 T\right) / \left(\sigma\sqrt{T}\right) = d_1 - \sigma\sqrt{T}, \tag{4}$$

$N(x)$ — кумулятивная функция нормального распределения.

В данной работе для расчетов были использованы маржируемые опционы на фьючерс индекса РТС. Из-за слабой ликвидности срочного рынка Московской биржи мы используем расчетную цену опционов и теоретическую волатильность, рассчитываемую по правилам Московской биржи[1]. Согласно методологии используются цены активных безадресных заявок на покупку и продажу опционов соответствующей серии, а если лучшая цена покупки или продажи на некотором страйке отсутствует, то соответствующая подразумеваемая волатильность принимается равной нулю. Расчеты по таким опционам происходят путем ежедневного перечисления вариационной маржи. Теоретическая стоимость таких опционов рассчитывается без учета изменения стоимости денег во времени.

Расчетная стоимость маржируемого колл-опциона на фьючерс

$$C = FN\left(d_1\right) - KN\left(d_2\right) \tag{5}$$

и пут-опциона на фьючерс —

$$P = KN\left(-d_2\right) - FN\left(-d_1\right). \tag{6}$$

Таким образом, единственным параметром, необходимым для оценки маржируемого опциона, который нельзя напрямую получить из рыночной информации, является будущая волатильность базового актива.

Именно ее оценка определяет значение премии опциона. Если расчетную стоимость приравнять к рыночной премии и решить уравнение для волатильности, то результирующее значение будет называться «подразумеваемая волатильность». Кривые волатильности — кривая всех значений подразумеваемой волатильности в зависимости от отношения цены исполнения (K) к цене базового актива (S_0).

В условиях нормального функционирования фондового рынка кривая волатильности опционов на фьючерсы/акции публичных компаний должна принять экспоненциальный вид (рис. 1).

Такая динамика используемой инвесторами волатильности для оценки опционов связана со следующим эмпирическим наблюдением: на развитых (ликвидных) фондовых рынках существует отрицательная корреляция между ценой акций и волатильностью (Cao, Chen, Hull, 2020). Таким образом, при экономических кризисах, когда акции с положительным бэта-коэффициентом падают в цене, повышается как волатильность, так и вероятность дальнейшего снижения цены. В то же время при экономическом буме волатильность снижается, и дальнейший рост акций становится менее вероятным.

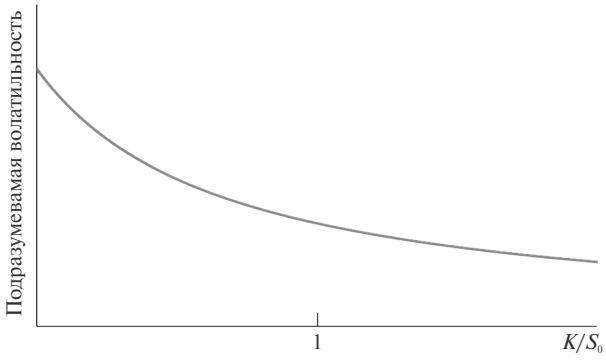

Рис. 1. Кривая волатильности на развитых фондовых рынках

Соответственно такая динамика подразумеваемой волатильности в зависимости от K/S_0 связана со следующим историческим распределением доходностей по акциям: вес доходностей левее значения K_1 больше, чем подразумевает нормальное распределение и соответственно модель Блэка–Шоулза, а вес доходностей правее

[1] Методика определения НКО «Национальный клиринговый центр» (НКЦ, АО) риск-параметров срочного рынка ПАО Московская биржа (https://www.nationalclearingcentre.ru/catalog/0302/296).

значения K_2 меньше соответствующих теоретических значений (Hull, 2018, p. 462) (рис. 2).

Таким образом, вероятность реализации опционов с ценой исполнения меньше текущей рыночной цены акции выше, чем предполагает теоретическая модель, и такие опционы торгуются с премией к опционам с высокой ценой исполнения, что и отражается в нисходящей кривой волатильности на рынке акций. Поэтому при анализе кривых волатильности необходимо рассмотреть распределения доходностей соответствующего базового актива и соотнести структуру распределения доходностей с кривыми волатильности. В случае их несоответствия создается *квазиарбитражная ситуация*.

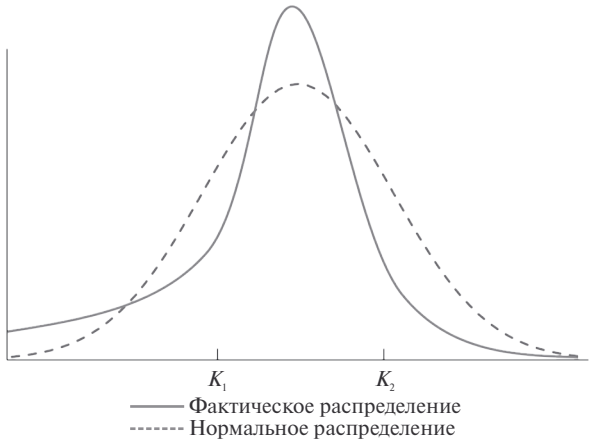

Рис. 2. Распределение доходности на развитых фондовых рынках

Для интерпретации уровня подразумеваемой волатильности в 2022 г. сравним его с прогнозируемой волатильностью по классической модели анализа временных рядов GARCH (1, 1). Она очень хорошо зарекомендовала себя на практике и многими экономистами используется как образец для сравнения. Она определяется уравнением

$$\sigma_n^2 = \gamma V_L + \alpha u_{n-1}^2 + \beta \sigma_{n-1}^2, \tag{7}$$

где σ_n — волатильность текущего периода; σ_{n-1} — волатильность предыдущего периода; V_L — долгосрочная средняя дисперсия; u_{n-1} — доходность предыдущего периода; γ, α, β — веса соответствующих параметров модели. Модель также позволяет использовать дополнительные регрессоры для оценки волатильности.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

4.1. Анализ распределения доходности индекса РТС (RTSI)

Из-за общего недостатка ликвидности на российском фондовом рынке биржевые финансовые активы могут торговаться со значительным дисконтом. Поэтому в рамках исследования используются данные торгов на самый торгуемый композитный индекс — индекс РТС.

Прежде чем исследовать кривые волатильности и их динамику на рынке маржируемых фьючерсных опционов на индекс РТС, необходимо определить их ожидаемую структуру, исходя из исторического распределения доходностей. Таким образом, проверяемая гипотеза формулируется следующим образом: прямая взаимосвязь между распределением доходности и кривой волатильности (которая обычно наблюдается на развитых финансовых рынках) стала обратной в 2022 г. на российском рынке из-за снижения ликвидности и/или нерациональной оценки опционов на фоне финансового шока, что может открыть возможности для использования квазиарбитражных стратегий на российском фондовом рынке.

Рассмотрим распределение доходностей по трем различным периодам исследования индекса РТС (RTSI): 2015–2019 гг., 2020–2021 гг., 2022 г. Для сравнения использовались данные котировок на закрытия ежедневных торговых сессий[2].

Первый период представляет собой постсанкционный период развития российской экономики (после 2014 г.), однако в относительно стабильной бизнес-среде, где наиболее крупные и ликвидные эмитенты имели многочисленные возможности работать на финансовом рынке. Как видно из представленного графика (рис. 3),

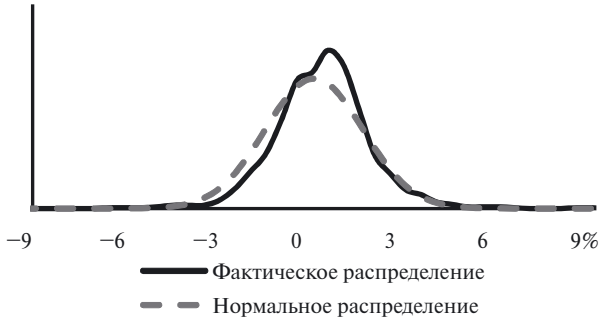

Рис. 3. Распределение дневных доходностей RTSI (2015–2019 гг.)

Источник: рассчитано на основе данных Мосбиржи.

[2] Данные получены с сайта Московской биржи (https://www.moex.com).

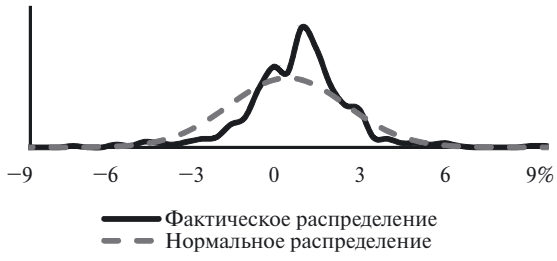

Рис. 4. Распределение дневных доходностей RTSI (2020–2021 гг.)

Источник: рассчитано на основе данных Мосбиржи.

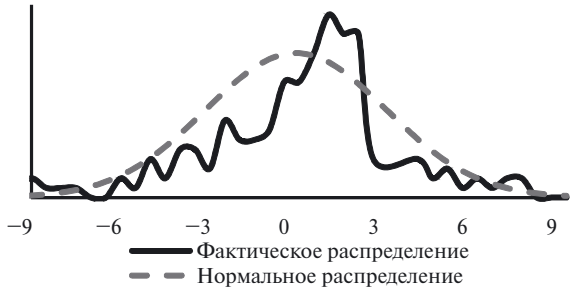

Рис. 5. Распределение дневных доходностей RTSI (2022 г.)

Источник: рассчитано на основе данных Мосбиржи.

в этот период распределение дневных доходностей наиболее близко напоминает нормальное. Это связано с большим числом наблюдений, кроме того, в этот период индекс РТС был в растущем тренде, что присуще развивающейся экономике.

Стоит заметить, что в отличие от типичного распределения доходностей в развитых экономиках индекс РТС на этом периоде характеризуются отрицательной асимметрией (−0,1)[3] и относительно высоким коэффициентом эксцесса (5,1)[4].

Таким образом в среднем, на промежутке 2015–2019 гг. дневные доходности были выше ожидаемых средних, поэтому во взаимосвязи с таким распределением кривая волатильности должна быть восходящей.

Второй рассматриваемый период (2020–2021 гг.) связан с пандемией Covid-19, соответствующим снижением деловой активности и падением фондового рынка с последующим активным ростом. Данное распределение (рис. 4) характеризуется более высоким коэффициентом эксцесса (9,4) и большей отрицательной асимметрией (−1,3). С повышенным коэффициентом эксцесса все опционы, которые находятся глубоко «вне денег», будут оцениваться дороже, чем предполагает модель Блэка–Шоулза, так как экстремальные значения доходности более вероятны, чем предполагает нормальное распределение. Поэтому на этом периоде ожидаются в целом более высокие уровни подразумеваемой волатильности, а более отрицательное значение коэффициента асимметрии свидетельствует о еще большем перекосе в сторону положительных значений доходности, и, соответственно, опционы с большей ценой исполнения должны оцениваться с премией относительно опционов с низким страйком исполнения.

Третий рассматриваемый период (2022 г.) связан с масштабной трансформацией финансового рынка и всей экономики России (рис. 5). Так как именно иностранные инвесторы представляли наибольшую часть инвесторов на Московской бирже, их уход из российских активов и в целом пессимизм относительно перспектив развития российской экономики стали причиной резкой потери ликвидности всего фондового рынка. Для целей исследования из наблюдений этого периода были исключены показатели доходности на 24 и 25 февраля. Коэффициент эксцесса — наименьший среди всех рассматриваемых периодов (2,6), а коэффициент асимметрии распределения доходностей отрицательный, значительно меньший по сравнению с периодом 2020–2021 гг. (−0,8). Таким образом, так как коэффициент эксцесса за данный период меньше, чем у нормального распределения (3,0), то теоретически это свидетельствует о том, что вес «хвостов» у такого распределения меньше, чем у нормального. Таком образом, опционы с низкими и высокими страйками исполнения должны торговаться с дисконтом относительно теоретической цены, что отразится на их низкой подразумеваемой волатильности.

4.2. Анализ кривых волатильности индекса РТС (RTSI)

С учетом проведенного анализа распределений доходности по индексу РТС, который показывает, что на всех рассмотренных периодах, где условный вес положительных исходов (положительная

[3] Коэффициент асимметрии — в теории вероятностей величина, характеризующая асимметрию распределения данной случайной величины. Нормальное распределение характеризуется симметричным распределением, коэффициент асимметрии у такого распределения равен 0.

[4] Коэффициент эксцесса в теории вероятностей — мера остроты пика распределения случайной величины. В нормальном распределении коэффициент эксцесса равен 3.

доходность) превышает вес негативных исходов, стоит ожидать, что опционы «на повышение» будут стоить дороже, что должно выражаться в растущей кривой волатильности. Поэтому стоит рассмотреть фактические кривые волатильности за этот период и их взаимосвязь с соответствующими распределениями доходности.

По всем дням торговли в соответствующие периоды с использованием расчетных цен маржируемых опционов и фьючерсов на соответствующие даты методом проб и ошибок (trial and error) были рассчитаны значения подразумеваемой волатильности на разные уровни цен исполнения, на которые Московская биржа предоставляет информацию о расчетных ценах опционов.

Также в силу особенностей методики расчетных цен опционов, определенных Московской биржей, в калькулировании значений подразумеваемой волатильности брались только те даты, в которых расчетная цена опциона с самой высокой ценой исполнения больше минимальной (равной 10), так как в ином случае подразумеваемая волатильность таких опционов значительно завышена. Таким образом, в результате анализа были получены кривые волатильности по исследуемым периодам (см. рис. П в Приложении).

Кривая волатильности в зависимости от цены исполнения маржируемого колл-опциона во всех исследуемых периодах представляет собой нисходящую функцию. Это значит, что колл-опционы — глубоко в деньгах, а пут-опционы глубоко вне денег торгуются с премией к остальным опционам. Такие кривые волатильности соответствуют распределению доходностей с положительной асимметрией, где вес отрицательных доходностей больше, чем в нормальном распределении. Однако с учетом проведенного анализа распределения доходностей индекса РТС, где во всех исследуемых периодах распределение доходности характеризовалось отрицательной асимметрией, кривые волатильности, рассчитанные по данным Московской биржи, не являются взаимосвязанными, т.е. их структура не соответствует распределению доходностей по базовому активу. Этот анализ опровергает сформулированную гипотезу, так как отсутствие прямого соотношения между кривыми волатильности и распределением доходности характерно не только для шокового 2022 г.

4.3. Соотношение прогноза волатильности в соответствии с моделью GARCH (1, 1) и подразумеваемой волатильностью индекса РТС

В связи с низкой ликвидностью российский рынок во многих своих аспектах можно считать неэффективным, а рыночные значения ожидаемой будущей волатильности, выраженной в оценке биржевых опционов, неприменимыми. В таком случае приведенный анализ становится бессмысленным, так как используются фактические распределения доходности и ожидаемая волатильности на неэффективном рынке, которая во многом может объясняться нерациональным поведением инвестором.

Однако настолько ли неэффективен российский рынок? Мы проведем сравнительный анализ того, насколько применима GARCH (1, 1) в современных реалиях и насколько все-таки эффективен анализ кривых волатильности как показатель рыночного риска. Исследуемый период для модели GARCH (1, 1): 05.01.2015–30.11.2022 (рис. 6), который включает как шоковые, так и спокойные периоды. Контрольный период для сверки прогнозной и подразумеваемой волатильности — 01.12.2022–14.12.2022.

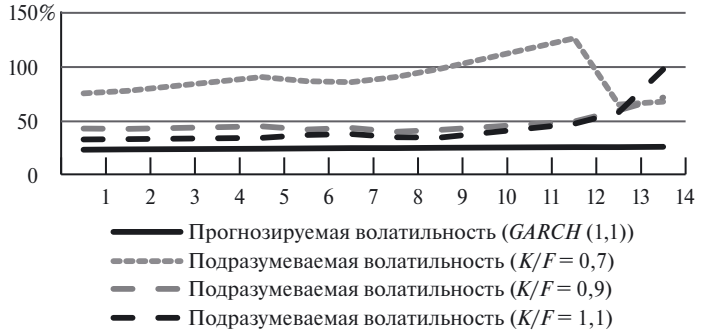

Рис. 6. Сравнение прогнозируемой волатильности (GARCH) и подразумеваемой волатильности на разных уровнях цен исполнения опционов (с 1 по 14 декабря)

Источник: рассчитано на основе данных Мосбиржи.

Полученные коэффициенты модели: $\gamma V_L = \omega = 0{,}00000596$, $\alpha = 0{,}11213775$, $\beta = 0{,}87755189$.

5. ИНТЕРПРЕТАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ

Подразумеваемая годовая волатильность на каждом уровне цены исполнения опционов, расчетная цена которых на представленные даты была больше минимальной, оказалась намного выше прогноза модели GARCH (1, 1). Такие результаты говорят о несостоятельности модели при прогнозировании волатильности в текущей, в основном диктуемой нерыночными факторами, экономической ситуации. Однако стоит заметить, что в связи с особенностью калькулирования расчетной цены маржируемых опционов их подразумеваемая волатильность к концу года вырастает на 50–125% по сравнению со среднегодовыми значениями. Прогноз долгосрочной волатильности на уровне 38% выглядит правдоподобно с учетом уровня закрытия индекса волатильности российского рынка на 40% (30.11.2022). Также стоит учесть, что подразумеваемая волатильность опционов с уровнями $K/F = 0{,}9$; 1,1 находится примерно на том же уровне, исключая последние дни обращения опциона, в отличие от $K/F = 0{,}7$.

Таким образом, подразумеваемая волатильность является наилучшим рыночным показателем для оценки риска инвесторами. Модели, которые используют исторические данные, не применимы в уникальных условиях развития российского фондового рынка.

В совокупности с проведенным анализом распределения доходности и кривых волатильности можно сделать вывод о невозможности использовать модель GARCH для построения новых инвестиционных и хедж-стратегий на фоне финансового стресса, в условиях которого функционирует российский фондовый рынок.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Прежде чем приступить к анализу кривых волатильности, было проведено исследование распределения доходности по самому ликвидному индексу российского фондового рынка — индексу РТС. В результате сравнения фактического распределения с нормальным было установлено, что в три рассматриваемых периода (2015–2019, 2020–2021, 2022 г.) фактическое распределение имело отрицательную асимметрию. Вместе с тем кривые волатильности за восемь последних лет имели отрицательный наклон, что противоречит ожидаемой связи с фактическим распределением доходности. Такой результат свидетельствует о том, что, несмотря на распределение доходности, которое показывает, что колл-опционы «вне денег» должны торговаться с премией, т.е. с более высокой подразумеваемой волатильностью, инвесторы на рынке биржевых опционов предпочитают использовать данные инструменты для защиты от падения базового актива, а не для спекуляций в ожидании его повышения. Такой результат может также объясняться тем, что график распределения доходности не учитывает следующего эффекта: в случае если цена базового актива снизится на 10%, то для «отыгрыша» она должна вырасти на 11,11%. А если цена базового актива вырастет на 10%, то она должна снизиться только на 9,09%, чтобы сравняться с начальным значением. Таким образом, положительные и отрицательные доходности не являются равнозначными и поэтому, несмотря на отрицательную асимметрию их распределения, инвесторы отдают предпочтение опционам на понижение.

Отвечая на вопросы исследования, были сделаны следующие выводы.

1. Значения подразумеваемой волатильности тем выше, чем ниже цена исполнения по сравнению с ценой базисного актива, — и тем ниже, чем выше цена исполнения.

2. Прямой взаимосвязи между кривыми волатильности и распределением доходности индекса широкого рынка на российском рынке найти не удалось. При изменении коэффициентов асимметрии и эксцесса распределений доходности кривые волатильности оставались неизменно нисходящими — в зависимости от цены исполнения.

3. Структура кривой волатильности фьючерса РТС за 2022 г. по сравнению с периодом 2015–2021 гг. не изменилась.

4. Взаимосвязь, а точнее ее отсутствие, между кривой волатильности фьючерса РТС за 2022 г. с распределением доходности по индексу РТС по сравнению с периодом 2015–2021 гг. также не изменилась.

5. В результате построения модели GARCH (1, 1) было обнаружено, что подразумеваемый уровень волатильности является лучшим показателем для прогноза стоимости опционов и оценки настроения инвесторов.

Таким образом, несмотря на уникальную ситуацию на российском финансовом рынке, которая продолжалась на протяжении всего исследуемого периода, в 2022 г. не было выявлено аномалий в оценке опционов с разными страйками исполнения. Никаких квазиарбитражных возможностей для инвестирования на основе структуры кривых волатильности в 2022 г. не наблюдалось.

ПРИЛОЖЕНИЕ

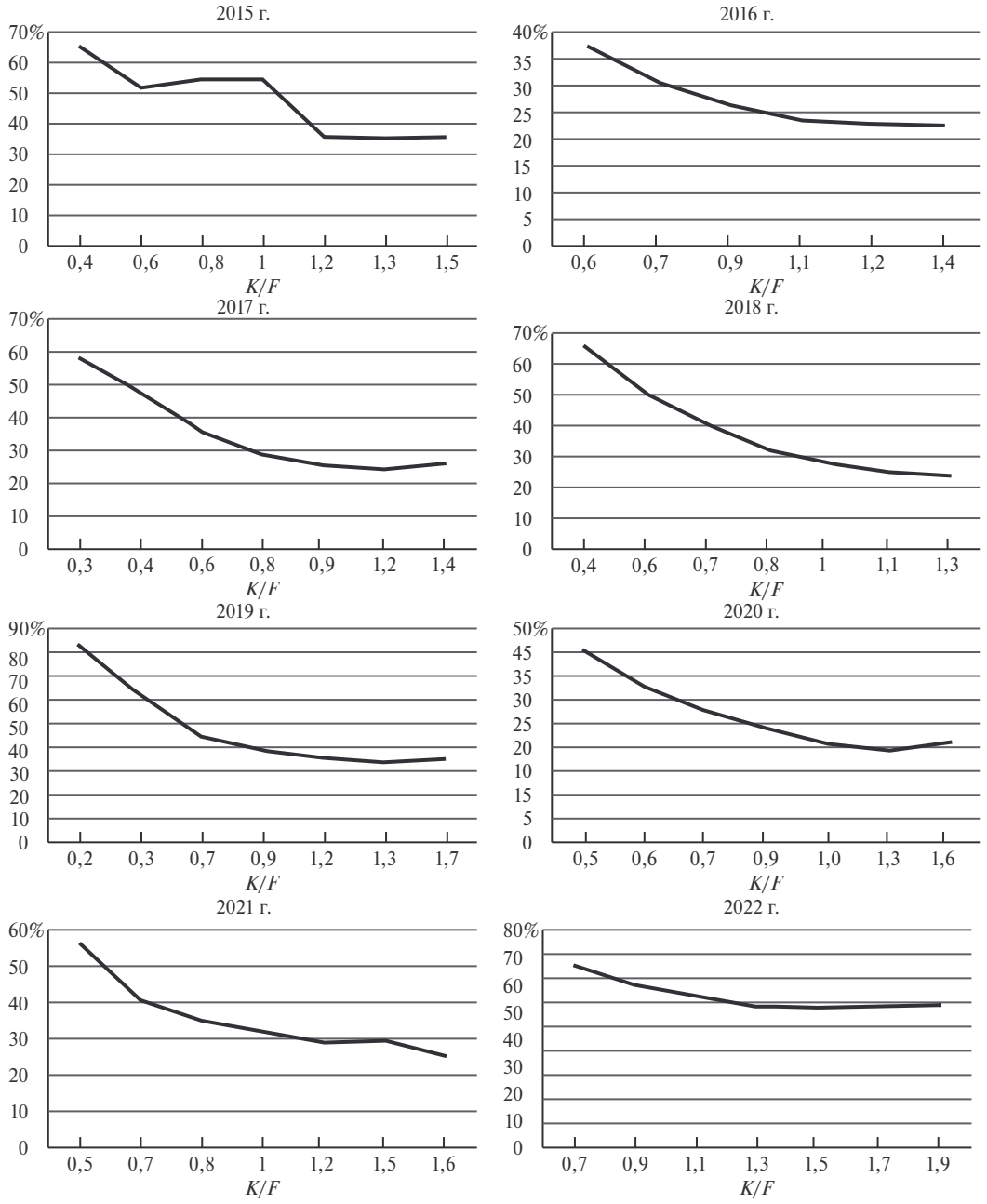

Рис. П. Кривая волатильности индекса РТС (2015–2022 гг.)

Источник: рассчитано авторами на основе данных Московской биржи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

Аганин А.Д. (2017). Сравнение GARCH и HAR-RV моделей для прогноза реализованной волатильности на российском рынке // *Прикладная эконометрика*. Т. 48. С. 63–84. [**Aganin A.** (2017). Forecast comparison of volatility models on the Russian stock market. *Applied Econometrics*, 48, 63–84 (in Russian).]

Баженов Т.И., Фантаццини Д. (2019). Прогнозирование реализованной волатильности котируемых российских акций с помощью инструмента Google Trends и вмененной волатильности // *Экономика промышленности*. № 12 (1). P. 79–88. DOI: 10.17073/2072-1633-2019-1-79-88 [**Bazhenov T., Fantazzini D.** (2019). Forecasting realized volatility of russian stocks using Google Trends and implied volatility. *Russian Journal of Industrial Economics*, 12 (1), 79–88. DOI: 10.17073/2072-1633-2019-1-79-88 (in Russian).]

Крицкий О.Л., Лисок Е.С. (2007). Асимптотическое оценивание коэффициентов модели стохастической волатильности // *Прикладная эконометрика*. № 2. С. 3–12. [**Krickij O.L., Lisok E.S.** (2007). Asymptotic estimation of coefficients of stochastic volatility models. *Applied Econometrics*, 2, 3–12 (in Russian).]

Смирнов С.Н., Кузнецов В.А., Сливинский В.А. (2021). Гарантированный детерминистский подход к маржированию на срочном рынке: численный эксперимент // *Экономика и математические методы*. Т. 57. № 4. С. 76–87. DOI: 10.31857/S042473880017501-0 [**Smirnov S.N., Kuznecov V.A., Slivinskij V.A.** (2021). Guaranteed deterministic margining in the derivatives market: A numerical experiment. *Economics and Mathematical Methods*, 57, 4, 76–87. DOI: 10.31857/S042473880017501-0 (in Russian).]

Шелемех Е.А. (2017). Расчет экзотических опционов на неполных рынках // Экономика и математические методы. Т. 53. № 3. С. 78–92. [**Shelemekh E.A.** (2017). Calculation of exotic options in incomplete markets. *Economics and Mathematical Methods*, 53, 3, 78–92 (in Russian).]

Black F., Scholes M. (1973). The pricing of options and corporate liabilities. *Journal of Political Economy*, 81, 3, 637–654.

Bollerslev T. (1986). Generalized autoregressive conditional heteroskedasticity. *Journal of Econometrics*, 31, 307–327.

Cao J., Chen J., Hull J. (2020). A neural network approach to understanding implied volatility movements. *Quantitative Finance*, 20 (9), 1405–1413. DOI: 10.1080/14697688.2020.1750679

Campos I., Cortazar G., Reyes T. (2017). Modeling and predicting oil VIX: Internet search, versus traditional variables. *Energy Economics*, 66, 194–204.

Corsi F. (2009). A simple approximate long-memory model of realized volatility. *Journal of Financial Econometrics*, 7, 2, 174–196.

Donaldson R.G., Kamstra M.J. (2005). Volatility forecasts, trading, and the arch versus option-implied volatility tradeoff. *Journal of Financial Research*, 28, 4, 519–538.

Hull J.C. (2018). *Options, futures and other derivatives*. London: Pearson.

Hansen P., Lunde A. (2005). A forecast comparison of volatility models: Does anything beat a GARCH (1, 1)? *Journal of Applied Econometrics*, 20, 7, 873–889.

Merton R.C. (1973a). Theory of rational option pricing. *The Bell Journal of Economics and Management Science*, 4, 1 (Spring), 141–183.

Merton R.C. (1973b). The relationship between put and call prices: Comment. *Journal of Finance*, 28 (March), 183–84.

Ross S. (2015). The recovery theorem. *The Journal of Finance*, LXX, 2, 615–648.

Deformation of volatility curves of the Russian stock market on the example of margined options on futures contracts on the RTS index

© 2024 K.N. Mulyaev, S.A. Perekhod

K.N. Mulyaev,
Sberbank CIB, Moscow, Russia; e-mail: mulyaevkostya@mail.ru

S.A. Perekhod,
Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, Russia; e-mail: sperekhod@yandex.ru

Received 14.08.2023

The authors express their gratitude to the head of the Department of Financial Markets and Financial Engineering of the Financial University under the Government of the Russian Federation, Elena Nikolaevna Alifanova, and the anonymous reviewer for the valuable comments that were used in preparing the article.

Abstract. We reassess the Russian stock market behavior in terms of the relationship between risk parameters and return on assets in connection with global structural changes in 2022. The subject of this study is volatility curves calculated from quotes of exchange options on RTS index futures. The purpose of the study is to analyze the relationship between volatility curves and the distribution of returns in 2015–2022, to analyze changes in the structure of this relationship in 2022, to assess the applicability of the GARCH model and to develop new investment and hedge strategies on the Russian stock market. The issue of interpreting the dynamics of volatility curves is disputable however, it was theoretically developed in the theory of valuation of derivative financial instruments. As a result of the study, unrelated structures of the distribution of returns and volatility curves for the RTS composite index were found throughout the entire period concerned, regardless of the presence of external shocks. It is concluded that in the Russian stock market, investors prefer protective options rather than speculative ones, despite the negative asymmetry of the distribution of RTS index returns. And despite the greater weight of positive returns in their distribution in each period under consideration, due to the technical features of the functioning of return indicators, the negative asymmetry of the return distribution does not necessarily correlate with growing volatility curves.

Keywords: GARCH; implied volatility; valuation of options, futures on the RTS index, stock market.

JEL Classification: C52, C53, C58.

UDC: 336.7.

For reference: **Mulyaev K.N., Perekhod S.A.** (2024). Deformation of volatility curves of the Russian stock market on the example of margined options on futures contracts on the RTS index. *Economics and Mathematical Methods*, 60, 3, 118–128. DOI: 10.31857/S0424738824030104 (in Russian).