



ЭКОНОМИКА И МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ



НАУКА

— 1727 —

Российская академия наук

ЭКОНОМИКА И МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ

Том 60 № 2 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. Зилькарнай, 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

СОДЕРЖАНИЕ

Том 60, № 2, 2024

Теоретические и методологические проблемы

- Рубинштейн А.Я., Чуковская Е.Э.** Наука, знание и интеллектуальная собственность: десять лет спустя. Часть 2 5
- Лосик И.В., Сидоренко С.В., Сидоренко М.Ю., Бахтизин А.Р.** Информационные войны современности и моделирование распространения новостей 14
- Дементьев В.Е.** Парадокс капиталоемкости 27

Мировая экономика

- Кудрявцева О.В., Чернявский С.В., Уткина А.В.** Экономический рост в развитых и развивающихся странах при переходе к возобновляемым источникам энергии 40

Народнохозяйственные проблемы

- Со С., Костырин Е.В.** Моделирование пенсионных доходов и расходов на основе уравнения Ферхюльста и полиномиальной регрессии с демографическими прогнозами 50
- Удод В.А., Касачева О.В.** Прогнозирование доходов и расходов Социального фонда России по обязательному социальному страхованию на случай временной нетрудоспособности и в связи с материнством 67

Региональные проблемы

- Гайнанов Д.А., Гатауллин Р.Ф., Аслаева С.Ш.** Перспективы развития обрабатывающих производств в Республике Башкортостан в новых экономических условиях 80

Отраслевые проблемы

- Урюпин И.В., Власенко А.О.** Оценка прямых эксплуатационных расходов для перспективных воздушных судов с альтернативными типами силовых установок 92

Математический анализ экономических моделей

- Бекларян Л.А., Бекларян Г.Л., Акопов А.С., Хачатрян Н.К.** Динамические и агентные модели интеллектуальных транспортных систем 105
- Теплова Т.В., Соколова Т.В., Ханиев А.** Портфельные построения на рынке акций на основе методов оболочечного анализа и стохастической границы 123
- Панов П.А.** О местоположении геометрических медиан треугольников 139

Russian Academy of Sciences

ECONOMICS AND MATHEMATICAL METHODS

Volume 60 No. 2 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

CONTENTS

Volume 60, no. 2, 2024

Theoretical and methodological problems

- Rubinshtein A.Ya., Chukovskaya E.E.** Science, knowledge, and intellectual property: Ten years later. Part 2 5
- Losik I.V., Sidorenko S.V., Sidorenko M.Yu., Bakhtizin A.R.** Information wars in the contemporary world and simulation of news dissemination 14
- Dementiev V.E.** The paradox of capital intensity 27

World economy

- Kudryavtseva O.V., Chernyavskiy S.V., Utkina A.V.** Economic growth in developed and developing countries in the context of the transition to renewable energy sources 40

Problems of national economy

- Suo S., Kostyrin E.V.** (2024). Modeling of pension income and expenditures based on the Verhulst equation and polynomial regression with demographic projections 50
- Udod V.A., Kasacheva O.V.** Forecasting income and expenses of the Social Fund of Russia on compulsory social insurance in case of temporary disability and in connection with motherhood 67

Regional problems

- Gainanov D.A., Gataullin R.F., Aslaeva S.Sh.** Prospects for the development of manufacturing industries in the Republic of Bashkortostan under the new economic conditions 80

Industrial problems

- Uryupin I.V., Vlasenko A.O.** Method of estimating direct operating costs for prospective aircraft with alternative propulsion systems 92

Mathematical analysis of economic models

- Beklaryan L.A., Beklaryan G.L., Akopov A.S., Khachatryan N.K.** Dynamic and agent-based models of intelligent transportation systems 105
- Teplova T.V., Sokolova T.V., Haniev A.I.** Portfolio constructions in the stock market based on Data Envelopment Analysis and Stochastic Frontier Analysis 123
- Panov P.A.** On the location of geometrical medians of triangles 139

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ

Наука, знание и интеллектуальная собственность:
десять лет спустя. Часть 2

© 2024 г. А.Я. Рубинштейн, Е.Э. Чуковская

А.Я. Рубинштейн,

Институт экономики РАН, Москва; e-mail: arubin@aha.ru

Е.Э. Чуковская,

*Научно-образовательный центр интеллектуальной собственности и цифровой экономики, Москва;
e-mail: echukovskaya@yandex.ru*

Поступила в редакцию 06.09.2023

Аннотация. Вторая часть статьи посвящена некоторым экономическим аспектам деятельности академических институтов, участвующих не только в производстве знания, но в его распространении. Ведущая роль в этом процессе принадлежит научным журналам, которые представляют главный канал распространения знания. Дано обоснование особого вида затрат таких журналов, связанных с выплатой гонораров в качестве платы за получение прав печатать и распространять авторские тексты в виде журнальных статей, а также известной части издержек издателя, обусловленных оплатой труда рецензентов, который является важнейшим элементом журнального производства. Показано, что в сложившихся условиях журналы, как правило, не имеют средств на оплату рецензирования и выплату авторских гонораров. Постепенно «бесплатная» уступка авторских прав стала нормой в системе распространения знания, с негативными последствиями появления журналов, взимающих с авторов плату за публикацию их текстов. С учетом этого рассмотрены особенности финансирования производства знания, выступающего в качестве общественного блага, а также распространения знания в виде журнальных публикаций, требующего государственного финансирования в форме мериторных бюджетных субсидий. Предложенные рекомендации относятся не только к государственному финансированию производства и распространения знаний, но и к проведению необходимых институциональных преобразований, обеспечивающих восстановление Российской академии наук статуса самоуправляемой организации гражданского общества с возвращением в ее лоно всех научных институтов.

Ключевые слова: государство, наука, знание, научные журналы, авторский гонорар, оплата рецензентов, мериторные субсидии.

УДК: 001.891.3.

Классификация JEL: A1, D73, H41, O3, Z18.

Для цитирования: **Рубинштейн А.Я., Чуковская Е.Э.** (2024). Наука, знание и интеллектуальная собственность: десять лет спустя. Часть 2 // *Экономика и математические методы*. Т. 60. № 2. С. 5–13. DOI: 10.31857/S0424738824020017

Основное внимание в данной работе уделено ряду теоретических и методологических аспектов научной деятельности, обеспечивающей производство знания и его распространение. В центре исследования второй части работы — деятельность академических институтов, осуществляющих весь процесс производства, распространения, воспроизводства и сохранения знания. С учетом этого рассмотрены особенности финансирования производства знания, выступающего в качестве общественного блага, а также распространения знания в виде публикаций, требующего государственного финансирования в форме мериторных бюджетных субсидий.

III. ЖУРНАЛЫ В СИСТЕМЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЗНАНИЯ

Наверное, не будет большим преувеличением утверждать, что научные журналы представляют главный канал распространения знания, и в этом процессе им принадлежит ведущая роль. Но это не означает, однако, что журнал участвует в его производстве: «Не признаются авторами результата интеллектуальной деятельности граждане, не внесшие личного творческого вклада в создание

такого результата, в том числе оказавшие его автору только техническое, консультационное, организационное или материальное содействие или помощь либо только способствовавшие оформлению прав на такой результат или его использованию, а также граждане, осуществлявшие контроль за выполнением соответствующих работ» (п. 1 статьи 1229 ГК РФ). Используя данную терминологию, можно утверждать, что журнал оказывает «только техническое, консультационное, организационное или материальное содействие».

Подчеркнем, не участвуя в производстве знания, журнал предоставляет услуги его распространения. И только в этом смысле, включая организацию рецензирования и редактирование статей, он же способствует повышению качества *данной услуги*. Ни рецензенты, ни редакторы журнала не могут претендовать на соавторство. Исключительное право на результат интеллектуальной деятельности, созданный творческим трудом, исходно возникает только у его автора (п. 3. статьи 1229 ГК РФ). Поэтому журнал ни в какой мере не может считаться производителем знания. Любые, даже самые важные и полезные рекомендации рецензентов, остаются только советами, которые принимает или не принимает податель статьи — ее единственный автор.

Разделяя общее мнение о значении квалифицированных и честных рецензентов, способствующих повышению качества публикаций и авторитета журнала, подчеркнем, что эффект их деятельности проявляется *не в приросте знания*, а в *увеличении добавленной стоимости* предоставляемых журналом услуг его распространения. Данный тезис, в том числе, служит аргументом для оплаты труда рецензентов. При этом в основе журнальных услуг лежит произведенное знание в виде научных текстов, предоставляемых их авторами на возмездной основе с учетом договорных отношений, устанавливающих условия передачи авторских прав, включая возможность или обязательство выплаты авторского гонорара.

К сожалению, в сложившихся условиях журналы, как правило, не тратят средств на рецензирование и не выплачивают авторских гонораров. Постепенно «бесплатная» уступка авторских прав стала нормой в системе распространения знания и появились научные журналы, взимающие с авторов плату за публикацию их текстов¹. Оставляя в стороне вопросы качества подобных публикаций и уровень таких журналов, где рецензирование утрачивает смысл, заметим, что это шаг по «дурной дороге» обесценения интеллектуальной собственности. Представляется, что подобные факты в большей степени свидетельствуют о плохой экономике и неудовлетворительном состоянии всей системы распространения знания, адаптирующейся к такой экономике.

Здесь возникает и чисто теоретический вопрос. Можно ли вообще индивидуальную плату авторов за журнальную публикацию своих научных текстов рассматривать в качестве легального дохода издателей. Этот вопрос выглядит так: если существует спрос на журнальную продукцию со стороны читателей, то имеет ли смысл понятие «спрос» автора на распространение произведенного им знания, которое составляет основу журнальной продукции. Ответ на этот вопрос не такой простой, как кажется.

В принципе любую добровольную рыночную сделку, включая согласие на оплату журнальной публикации, с точки зрения ее участников, можно признать оправданной. Но далеко не все такие сделки могут соответствовать запросам общества. Поэтому ответ на поставленный вопрос требует исследования институциональных условий научной деятельности и публикационной активности. С учетом этого рассмотрим недавно предложенное понятие — «*авторский капитал*» — в качестве одного из аргументов в пользу введения платы за журнальную публикацию (Полтерович, 2023, с. 138–158).

3.1. Авторский капитал

С учетом этого рассмотрим недавно предложенное понятие — «авторский капитал» (Полтерович, 2023, с. 138–158)². После Майкла Гроссмана и Пьера Бурдьё, которые ввели в научный оборот понятия «*капитал здоровья*» (Grossman, 1972) и «*культурный капитал*» (Bourdieu, 2011), ряд авторов стали рассматривать и другие составляющие человеческого капитала, включая социальный (Portes, 1998), интеллектуальный (Макаров, 2022) и предпринимательский капитал (Chen, Chang, Chiang, 2017) и т.п. Вероятно, полезной может оказаться и новая категория «*авторский капитал*».

¹ В качестве примера приведем такое объявление: «Международный научно-исследовательский журнал, включенный в список ВАК (категории К1), приглашает к публикации. Стоимость публикации 750 рублей за каждые 1500 знаков, включая пробелы. Графические материалы/таблицы оплачиваются отдельно» (<https://research-journal.org/fee>).

² При всем интересе к этой новации, мне кажется, что она несет в себе определенные риски ее использования в качестве одного из аргументов введения платы за журнальные публикации.

И хотя на интуитивном уровне содержание *авторского капитала* кажется понятным, следует все же задать ряд весьма важных вопросов. Например, можно ли считать, что вводимая категория обладает известными свойствами капитала, связанными с механизмами его амортизации и восстановления, и что надо рассматривать в качестве *«инвестиций»* в авторский капитал? Остается неясным, как он измеряется. Немного добавляют в этом смысле и приведенные В. Полтеровичем характеристики авторского капитала: «Для его измерения на практике используют ряд показателей: наличие той или иной научной степени и премий за научные разработки, число публикаций, их цитируемость, качество журналов, где они опубликованы, индекс Хирша, членство в академиях наук, результаты опросов и т.п. Авторский капитал непосредственно влияет на общественную оценку ученого, его престиж» (Полтерович, 2023, с. 140).

Во-первых, такой практики просто нет, поскольку само понятие было *впервые введено* в рассматриваемой статье. Во-вторых, довольно сложно согласиться с тем, что авторский капитал может измеряться наличием ученых степеней и званий, членством в академиях наук, которые скорее свидетельствуют о его отдаче, а не о самом капитале. Да и практика приобретения ученых степеней и званий обусловлена часто не авторским, а социальным капиталом. В-третьих, та же цитируемость: получается, что в определенные годы наибольший «авторский капитал» был у Л. Брежнева. И в современном мире мотивы цитирования, как отмечает сам В. Полтерович, далеко не всегда обусловлены качеством цитируемой работы (Полтерович, 2023, с. 147). Часто они связаны лишь с высоким служебным положением цитируемого автора. Сомнительно, что приведенный перечень может служить определением *«авторского капитала»*.

Измерение авторского капитала — задача крайне сложная и, пожалуй, труднее оценки качества публикаций. В любом случае названными характеристиками обойтись невозможно. Иначе придется вводить еще ряд допущений сомнительного свойства. Например, считать, что если ученый на каком-то отрезке времени снизил публикационную активность из-за погружения в решение сложной научной проблемы, то получается, что у него амортизируется его авторский капитал. Здесь возникает и другой вопрос, нужно ли вообще в число его характеристик включать наличие высокой должности в науке, образовании или государственном управлении, которые в разных ситуациях бывает совсем не связаны с творческой деятельностью и авторством³.

В этом смысле важным остается вопрос об инвестициях в авторский капитал. Пр процитируем и здесь В. Полтеровича: «При достаточно высокой ценности увеличения авторского капитала автор готов не только отказаться от гонорара, но и заплатить за публикацию» (Полтерович, 2023, с. 149). Нам кажется эта дилемма ложной. Подобная постановка вопроса означает, что в качестве инвестиций в авторский капитал рассматривается не сама статья, отражающая прирост знания, а денежные вложения в ее публикацию⁴.

С этой, кажется, еще не доминирующей тенденцией можно дойти до того, что для работы в академических институтах или престижных университетах недостаточно будет иметь необходимые качества, нужен *«ресурс»*, которым оплачивается такая возможность. К сожалению, в середине 1990-х годов нищая Московская консерватория предоставляла свои залы за большие деньги даже непрофессиональным пианистам. Да и в нынешние времена некоторые олигархи оплачивают выступление своих жен и дочерей на самых престижных концертных площадках. Не секрет, что нечто подобное наблюдается и в академической среде.

Безусловно, не это имелось в виду при введении категории *«авторский капитал»*, которая, по-видимому, нуждается в более строгом определении. И прежде всего следует установить содержательное наполнение этой важной категории: речь идет о *накоплении знания*, созданного автором, или о некоторых *внешних признаках* авторского капитала, которые могут выступать лишь в виде «прокси-показателей». Сами по себе они, как и во всех других случаях, не имеют прямого отношения к изучаемому процессу, но служат вместо ненаблюдаемой переменной ее своеобразным «заменителем».

³ Возможно, в данном случае больше подходит понятие *«репутация»*, а не авторский капитал (Полтерович, 2023, с. 140; Franck, 2002, p. 19). Однако проблема определения *«репутации»*, *«авторитета»* и других плохо измеряемых характеристик творческих людей, занятых интеллектуальной деятельностью, — еще более трудная задача, которая, по утверждению ряда специалистов, не имеет количественного решения.

⁴ К сожалению, в реальном мире такие случаи встречаются не только в мусорных, но и в ведущих журналах, когда в качестве «инвестиционной платы» используются денежные взносы и/или «служебное положение» автора, что, на наш взгляд, свидетельствует о необходимости реформировать существующую систему публикационной активности и управления наукой в целом.

3.2. Институциональная среда

Все дело — в условиях, в которых функционируют авторы научных текстов, в тех нормах и стимулах, которые устанавливает патерналистское государство в отношении научной деятельности, а главное — насколько они отражают реальные интересы общества в сфере производства и распространения знания. И вот здесь, как нам кажется, нынешняя политика управления наукой в ее министерское десятилетие, ориентированная на публикационную активность, не отвечает интересам развития самой науки. «Государство должно стимулировать не столько рост числа научных статей фундаментального характера, сколько поисковые исследования, которые не сразу и не всегда завершаются публикациями» (Дементьев, 2023, с. 136).

Ситуация еще больше осложнилась, когда патерналистское государство присвоило «знак качества» *любым* статьям российских авторов в зарубежных журналах, зарегистрированных в Web of Science и Scopus. В этой ситуации многие из них сочли за благо оплачивать свои зарубежные публикации, не слишком заботясь об их реальном качестве. Заметим при этом, что большая часть платных публикаций россиян в подобных журналах оказалась связана с издательством MDPI, которое контролируется китайским бизнесом и пользуется дурной репутацией⁵. Прочитав А.Р. Хохлова, который пишет, что такие статьи «оплачиваются авторами из своих грантов либо организациями, где они работают. В конечном счете, это — бюджетные деньги. Зная соответствующие расценки, нетрудно оценить, что за публикацию 7 тыс. статей в 2020 г. зарубежным издательствам было выплачено никак не меньше 10 млн долл. <...> это более чем в пять раз превышает расходы государственного бюджета на все журналы РАН»⁶. Наверное, нормальным такое положение назвать никак нельзя.

Используя авторские научные тексты, в которых «выражено и записано» знание (Foray, 2004, p. 9), и обеспечивая выход в свет соответствующих статей, журналы участвуют в процессе распространения знания и формировании рынка научных публикаций двумя способами. С одной стороны, они предъявляют спрос на промежуточный продукт — оригинальные научные тексты; с другой стороны, их деятельность направлена на удовлетворение спроса читателей в результатах производства и распространения журнальной продукции. Не повторяя результатов исследования прежних лет (Рубинштейн, 2022), сформулируем характерные черты рынка научных публикаций, причем исключительно с теоретической точки зрения, имея в виду производство и потребление мериторных благ, обладающих индивидуальной и социальной полезностью.

Во-первых, в расходах издателя следует выделить особый вид затрат, связанный с выплатой гонораров в качестве платы за получение прав печатать и распространять авторские тексты в виде журнальных статей. Во-вторых, известная часть издержек издателя может быть связана с оплатой труда рецензентов, который является важнейшим элементом журнального производства. В-третьих, основным элементом доходов издателей являются рыночные продажи журналов, цена которых соответствует их индивидуальной полезности. В-четвертых, с учетом заинтересованности государства в распространении знания и обеспечения доступности журнальных статей для научных работников, аспирантов и студентов высшей школы, следует рассматривать еще одну составляющую дохода издателей — государственное финансирование в виде мериторных субсидий, отражающих социальную полезность журнальной продукции.

IV. О РЕФОРМЕ ФИНАНСИРОВАНИЯ АКАДЕМИЧЕСКОЙ НАУКИ

Продолжая дискуссию, поднятую на страницах журнала «Вопросы экономики» (Рубинштейн, 2022; Дементьев, 2023; Полтерович, 2023), мы хотим рассмотреть проблемы финансирования научных центров и институтов Российской академии наук, осуществляющих весь комплекс производства и распространения знания в экономической науке. Речь идет о 15 научных центрах и институтах РАН, издающих 24 научных журнала. При этом следует обратить внимание на известную теоретическую особенность производства и распространения знаний. Дело в том, что создаваемые блага имеют разную экономическую природу, требуют адекватных механизмов финансирования.

⁵ Так, например, см. <https://publication-ethics.ru/2021/08/difficult-situation-with-mdpi/>

⁶ См.: <https://nauka.tass.ru/nauka/13598939>. Можно предположить также, что существуют авторы, которые для выполнения норм, установленных в университетах и научных организациях, оплачивают подобные публикации из собственного кармана, надеясь на возвращение этих трат из стимулирующих надбавок.

Начнем с фундаментальных научных исследований, которые ведутся в указанных институтах, производящих знание в форме *общественного блага*, имеющего социальную полезность, которое лишь в результате и после процесса его проявления — экстерииоризации, т.е. вывода благодаря научному дискурсу из неявного в явное состояние, превращаются в научный текст, где знание «записано» и возникает *возможность закрепления права интеллектуальной собственности за автором*. В этом случае основной финансовый механизм, согласно теории, предполагает полное государственное возмещение всех издержек производителей знания (общественного блага), осуществляющих фундаментальные исследования, и его компенсацию за счет бюджетных средств.

Однако из-за отсутствия объективного механизма выявления социальной полезности таких благ размер финансирования производства знания является исключительно нормативной величиной, зависящей от политических целей и интересов патерналистского государства, его ресурсных возможностей. Применительно же к научным центрам и институтам РАН это означает, что в соответствии с государственными программами научных исследований каждому из них доводится государственное задание и определяется адекватный объем бюджетного финансирования. Никак не комментируя фактические объемы финансирования академических институтов, — это особая тема — обратим внимание на порядок выделения бюджетных средств и отчетность о выполнении государственного задания. Дело в том, что начиная с момента подчинения академических институтов Минобрнауки, изменился, как мы уже отмечали, и сам характер государственных заданий, которые, кроме содержательного определения исследовательской тематики, включают теперь контрольные цифры о числе публикаций по каждой теме, которые и стали фактически обязательными для исполнения нормами.

Такой способ финансирования, строго говоря, противоречит природе общественных благ и как следствие приводит к негативным результатам — появлению большого числа малосодержательных публикаций и обилию мусорных журналов. Не повторяя прежних работ (Рубинштейн, 2022; Гуманитарный сектор ..., 2023), отметим, что сложившееся положение дел беспокоит многих ученых, указывающих на отрицательные последствия избыточной ориентации Минобрнауки на публикационную активность и его увлеченности цифровыми результатами в ущерб фундаментальным исследованиям, создающим знание (Дементьев, 2023, с. 136).

При этом уже не только вышестоящие органы, но и сами институты, транслируя «цифровой интерес» властей, используют систему надбавок к заработной плате сотрудников в зависимости от числа публикаций. И можно согласиться с констатацией В. Полтеровича, который пишет, что «в России гонорар фактически выплачивается научным учреждением, где работает автор, в форме надбавок к зарплате за публикации» (Полтерович, 2023, с. 150). Трудно понять только, почему такое положение дел, где с большой вероятностью присутствуют ненаучные мотивы, кажется нормальным. На наш взгляд, более естественной является ситуация, когда гонорар за статью выплачивает журнал, где она опубликована.

Рассмотрим в связи с этим процесс распространения знания, которым, в том числе, занимаются 15 институтов РАН, издающих 24 научных журнала в виде комплексов статей, написанных на основе указанных выше научных текстов. В этом случае мы имеем дело уже с частными благами, находящимися в собственности авторов. С учетом же заинтересованности государства в распространении знаний и расширении их доступности для читателей, продукты издательской деятельности — журнальные выпуски, попадают в *класс мериторных благ*, обладающих индивидуальной и социальной полезностью.

С учетом этого и в соответствии с моделью равновесия Викселя–Линдаля для мериторных благ (Lindahl, 1919, p. 91; Рубинштейн, 2018, с. 188–193), экономические результаты издательской деятельности, связанной с распространением знания, имеют вид консолидированного дохода — суммы доходов от продажи журналов и бюджетной субсидии, отражающей социальную полезность журнальных публикаций (Рубинштейн, 2023, с. 29–36). Речь, таким образом, идет о государственном финансировании журналов в форме мериторных субсидий, направленной на расширение аудитории читателей (см. рисунок).

Следует отметить, что ничего необычного в этом нет. Вслед за В.Е. Дементьевым повторим, что еще 1994 г. Э. Шаффнер указала на социальную полезность журналов, обратив внимание на то, что *журналы обеспечивают создание коллективной базы знаний*, общение между учеными, работающими в определенной области, доведение научной информации до широкой аудитории (Schaffner, 1994). По мнению же В.Е. Дементьева: «Государственное финансирование академических журналов оправдано уже в силу реализации ими важных для общества и государства функций» (Дементьев, 2023, с. 136).

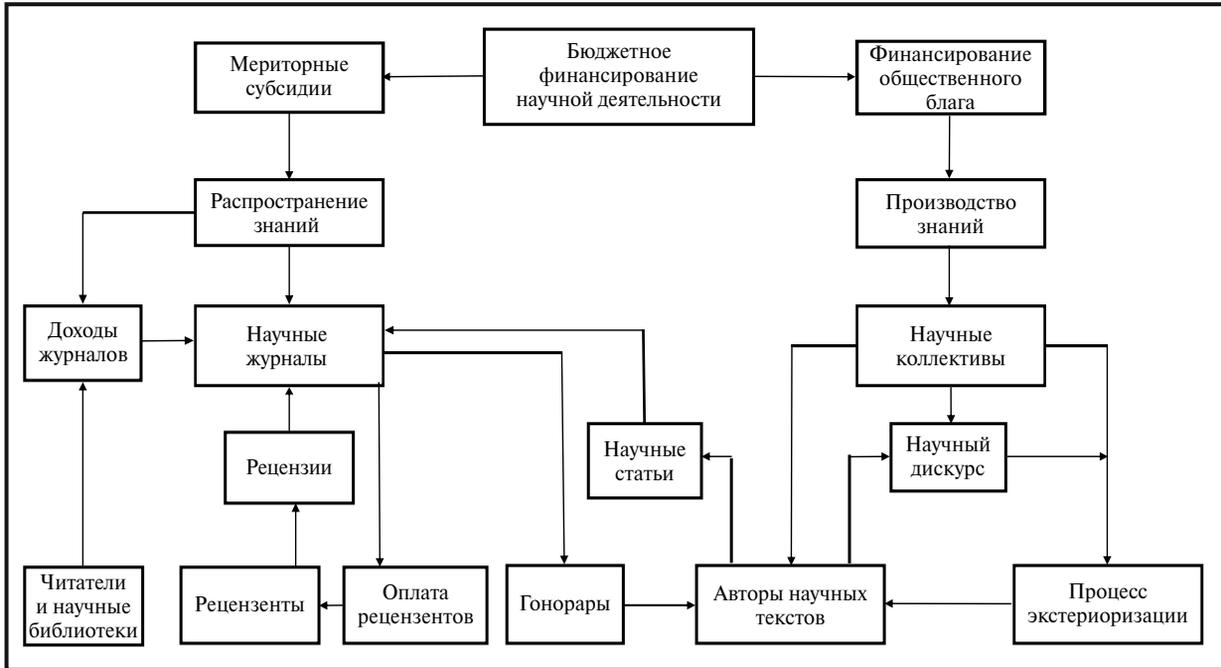


Рисунок. Финансирование научной деятельности институтов РАН: принципиальная схема

Необычным является другое: финансируют журналы, созданные академическими институтами, как правило, *сами институты*, расходуя средства, выделяемые им *не на распространение знания, а на его производство*. И если данный факт сопоставить с государственным заданием, требующим от института увеличения публикаций, то трудно упрекать журнал, когда он не предъявляет необходимых требований к рецензированию статей, и в нем публикуются в основном тексты сотрудников института, финансирующего этот журнал.

Нормальным такое положение назвать нельзя. Финансирование распространения знания (издательская деятельность) как его производства (фундаментальные исследования) должны осуществляться на основе *разных* по своему содержанию видов государственного финансирования с использованием и разных расчетных счетов института.

Ошибочность же объединения в «одном кошельке» финансирования производства знания и его распространения стала особенно заметной, когда государственные задания стали включать число опубликованных журнальных статей. Финансирование распространения знания — отдельное направление деятельности институтов, требующее мериторных субсидий, направляемых на их специальные счета (см. рисунок).

В качестве решения проблемы можно предложить другой механизм. Речь идет о перераспределении средств, которые получают сотрудники институтов в виде надбавок за публикации, причем сумма этих надбавок соответствует дополнительному финансированию институтов с целью стимулировать публикационную активность его сотрудников. Поэтому логичным будет указанные средства перенаправить в виде субсидий журналам, а свои надбавки сотрудники в этом случае будут получать не из общего котла «из рук руководства института», а в виде персональных гонораров, выплачиваемых научными журналами. В сравнении с нынешней ситуацией издержки журналов после реализации этого направления реформы увеличиваются только на сумму гонораров и оплаты труда рецензентов.

Следует специально отметить, что такие расходы обуславливает только та часть бюджетной субсидии, которая обусловлена распространением знания, созданного сотрудниками академического института, издающего соответствующий журнал. При этом публикация статей в данном журнале, представленных внешними авторами, предполагает необходимость второй части бюджетной субсидии журналам, целью которой является достижение определенного уровня доступности журнальных публикаций.

ВМЕСТО ЗАКЛЮЧЕНИЯ

Прошло десять непростых лет с момента передачи в министерское подчинение академических институтов и фактической утраты Российской академией наук статуса самоуправляемой организации гражданского общества. Понятно, что подобные действия патерналистского государства не могли не отразиться на авторитете РАН, о падении которого свидетельствуют ответы респондентов на вопрос, заданный экспертам в рамках уже упоминавшегося социологического исследования. Рассмотрим в связи с этим приведенную ниже таблицу, в которой представлены ответы экспертов на вопрос, какие организации адекватно выражают интересы своих членов (табл. 1).

Результаты экспертного опроса указывают на то, что Российская академия наук, занимавшая до упомянутого Федерального закона первую позицию в таблице о рангах, уступила свое место Новой экономической ассоциации: 38,1% респондентов выбрали НЭА, 29,3% — РАН и 20,5% — Вольное экономическое общество. При этом и члены НЭА, и участники «РЭК 23» продемонстрировали практически одинаковое отношение к организациям, выражающим их интересы.

Учитывая же, что «смена лидера» проходила в течение последних десяти лет после принятия указанного Федерального закона, интересно понять, как меняется эта ситуация при рассмотрении различных возрастных групп респондентов, каждая из которых стала на десять лет старше. Расчеты показывают, что доли респондентов, указавших на лидерство РАН в возрастных группах от 35 до 49 лет и от 50 до 69 лет, остались практически неизменными: 23,2 и 23,5% соответственно. При этом в этих же возрастных группах респондентов доля НЭА, созданной в 2009 г., т.е. за четыре года до упоминавшегося Федерального закона, выросла на 6,0, и почти на 10% увеличилась доля Вольного экономического общества (табл. 2).

Можно предположить, что немалая часть этих 16% — суммарного увеличения веса НЭА и ВЭО — относится к потерям Российской академии наук в результате фактической утраты ею статуса *организации гражданского общества*. Если основанная не научном авторитете активность ВЭО будет возрастать, а РАН продолжит свое зависимое и мало ресурсное существование, то можно ожидать, к сожалению, еще большее падение авторитета РАН.

Таблица 1. Какие организации адекватно выражают интересы своих членов?

Варианты ответов на вопрос анкеты (в %)	I волна	II волна	Всего
	НЭА	РЭК 23 ⁷	
Новая экономическая ассоциация (НЭА)	37,2	39,9	38,1
Российская академия наук (РАН)	28,3	31,2	29,3
Вольное экономическое общество (ВЭО)	21,6	18,5	20,5
Российское профессорское собрание	4,9	3,2	4,3
Другие организации	8,0	7,2	7,7
Всего	100,0	100,0	100,0

Таблица 2. Какие организации адекватно выражают интересы своих членов в разрезе возрастных групп? (%)

Варианты ответов на вопрос анкеты	Возрастные группы						Нет ответа
	младше 35 лет	35–49 лет	50–65 лет	66–75 лет	старше 75 лет	всего	
Новая экономическая ассоциация (НЭА)	10,8	21,3	27,3	17,1	8,4	100,0	15,2
Российская академия наук (РАН)	10,2	23,2	23,5	17,1	8,5	100,0	17,4
Вольное экономическое общество (ВЭО)	10,2	19,0	28,8	13,7	11,2	100,0	17,1
Российское профессорское собрание	7,0	27,9	20,9	11,6	16,3	100,0	16,3
Другие организации	10,4	18,2	22,1	27,3	6,5	100,0	15,6
Всего	10,3	21,4	25,8	16,9	9,2	100,0	16,3

Вывод напрашивается сам собой: речь идет о необходимости реформировать управление отечественной наукой. Причем не только в области государственного финансирования производства и распространения знаний, но и — обратим на это особое внимание — в части проведения необходимых институциональных преобразований, обеспечивающих восстановление у Российской академии наук статуса самоуправляемой организации гражданского общества с возвращением в ее лоно всех научных институтов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

- Дементьев В.Е.** (2023). Предоставление научными журналами общественно полезных услуг должно финансироваться государством // *Вопросы экономики*. № 4. С. 135–150. [**Dementiev V.E.** (2023). Provision of socially useful services by scientific journals should be financed by the state. *Voprosy Ekonomiki*, 4, 135–150 (in Russian).]
- Макаров П.Ю.** (2022). Интеллектуальный капитал в понятийно-категориальном аппарате экономической науки: критическое осмысление и систематизация // *Вопросы экономики*. № 4. С. 5–25. [**Makarov P. Yu.** (2022). Intellectual capital in the conceptual and categorical apparatus of economic science: Critical comprehension and systematization. *Voprosy Ekonomiki*, 4, 5–25 (in Russian).]
- Полтерович В.М.** (2023). Авторский капитал и реформирование российской публикационной системы // *Вопросы экономики*. № 6. С. 138–158. [**Polterovich V.M.** (2023). Author's capital and reforming of the Russian publication system. *Voprosy Ekonomiki*, 6, 138–158 (in Russian).]
- Рубинштейн А.Я.** (2018). Теория опекаемых благ: учебник. СПб.: Алетейя. 304 с. [**Rubinstein A.Ya.** (2018). *The theory of patronized goods: Tutorial*. Saint Petersburg: Aletheia. 304 p. (in Russian).]
- Рубинштейн А.Я.** (2022). Патерналистское государство, академическая наука и научные журналы: теоретические заметки // *Вопросы экономики*. № 9. С. 139–157. [**Rubinstein A.Ya.** (2022). Paternalistic state, academic science and scientific journals: Theoretical notes. *Voprosy Ekonomiki*, 9, 139–157 (in Russian).]
- Гуманитарный сектор патерналистского государства (2023). Под ред. А.Я. Рубинштейна. СПб.: Алетейя. 300 с. [*Humanitarian sector of the paternalistic state* (2023). A.Ya. Rubinstein (ed.). Saint Petersburg: Aletheia. 300 p. (in Russian).]
- Bourdieu P.** (2011). Capital cultural, secular y espacio social. *Siglo*, XXI, 84.
- Chen M.-H., Chang Y.-Y., Chiang M.-T.** (2017). Human capital and career success of creative entrepreneurs: Is guanxi network a missing link. *Journal of Small Business and Entrepreneurship*, 29, 4, 313–331.
- Foray D.** (2004). *The economics of knowledge*. Cambridge: The MIT Press.
- Franck G.** (2002). The scientific economy of attention: A novel approach to the collective rationality of science. *Scientometrics*, 55, 3–26. Available at: <https://link.springer.com/article/10.1023/A:1016059402618>
- Grossman M.** (1972). On the concept of health capital and the demand for health. *Journal of Political Economy*, 80, 2, 223–255.
- Lindahl von E.** (1919). *Die Gerechtigkeit der Besteuerung. Eine Analyse der Steuerprinzipien auf Grundlage der Grenznutzentheorie*. Transl. by E. Henderson as: “Just taxation — a positive solution”. In: Musgrave R.A., Peacock A.T. (eds.). *Classics in the theory of public finance*. London: MacMillan, 1958, 4th Impression; 1967, 168–176.
- Portes A.** (1998). Social capital: Its origins and applications. *Annual Review of Sociology*, 24, 1–24. Available at: <https://www.jstor.org/stable/i211067>
- Schaffner A.C.** (1994). The future of scientific journals: Lessons from the past. (Discussion of the future of electronic scientific journals). *Information Technology and Libraries*, 13, 4, 239–247. Available at: <https://faculty.washington.edu/jwj/lis520/schaffner.html>

Science, knowledge, and intellectual property: Ten years later. Part 2

© 2024 A.Ya. Rubinstein, E.E. Chukovskaya

A.Ya. Rubinstein,*Institute of Economics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia; e-mail: arubin@aha.ru***E.E. Chukovskaya,***Scientific and Educational Center for Intellectual Property and Digital Economy, Moscow, Russia; e-mail: echukovskaya@yandex.ru*

Received 06.09.2023

Abstract. The second part of the article is devoted to some economic aspects of the activity of academic institutions involved not only in the production of knowledge, but also in its proliferation. The leading role in this process belongs to scientific journals, which represent the main channel of knowledge dissemination. The article substantiates the special type of costs of such journals, related to the payment of royalties as a fee for obtaining the rights to print and distribute the author's texts in the form of journal articles, as well as a known part of the publisher's costs due to the payment for reviewers' labor, which is the most important element of journal production. It is shown that under the current conditions, journals, as a rule, do not have funds to pay for reviewing and royalties. Gradually, "free" assignment of copyright became the norm in the system of knowledge dissemination, with the negative consequences of the appearance of journals that charge authors for the publication of their texts. Taking this into account, the peculiarities of financing the production of knowledge, which acts as a public good, as well as the dissemination of knowledge in the form of journal publications, which requires public funding in the form of meritorious budget subsidies, are considered. The proposed recommendations apply not only to the state financing of production and dissemination of knowledge, but also to the implementation of the necessary institutional reforms to restore the status of the Russian Academy of Sciences as a self-governing organization of civil society with the return of all scientific institutions to its fold.

Keywords: state, science, knowledge, intellectual property, copyright, journals, scientometrics, royalties, subsidies.

JEL Classification: A1, D73, H41, O3, Z18.

UDC: 001.891.3.

For reference: **Rubinstein A.Ya., Chukovskaya E.E.** (2024). Science, knowledge, and intellectual property: Ten years later. Part 2. *Economics and Mathematical Methods*, 60, 2, 5–13. DOI: 10.31857/S0424738824020017 (in Russian).

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ

**Информационные войны современности
и моделирование распространения новостей**

© 2024 г. И.В. Лосик, С.В. Сидоренко, М.Ю. Сидоренко, А.Р. Бахтизин

И.В. Лосик,

ведущая вечерних новостей «Итоги дня» телерадиокомпании ВС РФ «Звезда», Фонд сохранения культурно-исторической памяти героев войны «Наследники Победителей», аспирант факультета ВШГА МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва; e-mail: iralosiknews@mail.ru

С.В. Сидоренко,

Управление научно-методического руководства и экспертной деятельности Российской академии наук, Москва; e-mail: sidor@presidium.ras.ru

М.Ю. Сидоренко,

Управление научно-информационной деятельности РАН и взаимодействия с научно-образовательным сообществом, Научно-издательский совет Российской академии наук, Москва; e-mail: myusidorenko@pran.ru

А.Р. Бахтизин,

член-корреспондент РАН, ЦЭМИ РАН, МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва; e-mail: albert.bakhtizin@gmail.com

Поступила в редакцию 08.09.2023

Работа выполнена в рамках проекта «Разработка программно-аналитического комплекса социально-экономических мультиагентных моделей на основе суперкомпьютерных технологий для внедрения в ситуационных центрах страны с целью противодействия внешним угрозам и обеспечения национального суверенитета России».

Аннотация. В работе рассматриваются информационные войны, являющиеся частью современных гибридных конфликтов. Их анализ проведен средствами компьютерных моделей, имитирующих процесс распространения информации в социальных сообществах. Типология наиболее релевантных и цитируемых инструментов позволила определить эффективный алгоритм для создания авторской агент-ориентированной модели, учитывающей индивидуальные особенности людей и позволяющей давать дифференцированную оценку влияния информационных сообщений на определенную группу. В рамках вычислительных экспериментов оценивалась скорость распространения информации в построенном цифровом двойнике социальной сети в зависимости от изменения числа лидеров мнений и изначально информированных агентов, а также от снижения среднего уровня репутации агентов сети. Построенный инструмент может использоваться самостоятельно, но также и в составе более сложных моделей, включающих демографическую и экономическую составляющие.

Ключевые слова: агент-ориентированные модели, моделирование распространения информации, гибридные войны.

УДК: 330.47.

Классификация JEL: C63, D91.

Для цитирования: Лосик И.В., Сидоренко С.В., Сидоренко М.Ю., Бахтизин А.Р. (2024). Информационные войны современности и моделирование распространения новостей // *Экономика и математические методы*. Т. 60. № 2. С. 14–26. DOI: 10.31857/S0424738824020028

ВВЕДЕНИЕ

Большинство заметных событий в мире (экономических, политических, военных и т.д.) с различным уровнем информационной поддержки проходят через социальные сети и/или традиционные средства массовой информации (СМИ). Оба этих вида информационных ресурсов могут взаимодействовать, дополняя друг друга как в параллельном режиме, освещая конкретную новость, так и в асинхронном — когда социальные сети выступают в качестве первичного поставщика

информации, в дальнейшем развиваемой традиционными СМИ (или наоборот), а также противодействовать друг другу с целью блокирования распространения нежелательного контента.

Согласно отчету «Global Digital Report» от апреля 2023 г. в настоящее время Интернетом пользуются примерно 5,2 млрд человек, что составляет 64,6% населения планеты¹. Число аккаунтов в социальных сетях достигло 4,8 млрд учетных записей (хранилищ), но при этом отмечается, что эта цифра не отражает числа уникальных пользователей, поскольку содержит дублирующие учетные записи и фальшивые аккаунты. В среднем пользователь Интернета за счет подключенных к сети приложений, установленных на компьютере и/или смартфоне, проводит в сети 6 часов 35 минут. Для сравнения — среднее время просмотра телевизора составляет 3 часа 12 минут. В отчете также отмечается, что скорость интернет-соединений постоянно растет, а пропускная способность мобильной сети в среднем по миру за последний год возросла на треть.

Влияние социальных сетей на общественное мнение только растет в силу их распространения и возрастающих технических возможностей. Дэвид Шавалариас, директор известного проекта «Политоскоп» и автор книги «Токсичные данные», на наглядных примерах продемонстрировал, как социальные сети используются в качестве эффективного инструмента для манипуляции общественным мнением на примере выборов во Франции. Так, было выявлено массовое распространение ложных сообщений в пользу Ж.-Л. Меланшону, в реальности написанных членами радикальных группировок США (часть членов были активны на imageboard4chan (imageboard — тип веб-форума, поддерживающий анонимное общение)²). В этой связи такие большие сети, как Facebook с 2,9 млрд пользователей, представляются мощным инструментом формирования нужных заказчикам настроений в обществе. Неслучайно «Forbes» определил СВО России как «Первую войну в социальных сетях» (First social media war), и в каком-то смысле эта операция стала серьезной вехой в информационных войнах, как в свое время, согласно тому же «Forbes», конфликт во Вьетнаме заработал репутацию «Первой телевизионной войны» (First television war)³.

В связи с вышесказанным большую актуальность приобретают исследования способов распространения информации в социальных сетях и ее влияния на социально-экономические процессы. В исследовании будут рассмотрены известные *модели распространения информации*, а также *предложен разработанный нами инструмент*, основанный на агент-ориентированном подходе. Также мы рассмотрим *наиболее эффективные способы повышения скорости распространения информации*, оцениваемые посредством вычислительных экспериментов.

КРАТКИЙ ОБЗОР РЕЛЕВАНТНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Начнем с краткого обзора наиболее цитируемых исследований в этой области. Так, статья (Razaque et al., 2022) является сравнительным исследованием⁴ большого числа аналитических работ (около 150 статей), посвященных апробации различных известных моделей (Изинга, Шнайда, SIR, CODA, SNSM) для имитации распространения информации в социальных сетях, причем достоинства и недостатки рассматриваемых методов представлены в виде таблиц, что позволяет оценивать сильные и слабые стороны. Основной же вывод заключается в том, что выделить наиболее адекватную среди них модель затруднительно, поскольку реалистичность получаемых результатов сильно зависит от конкретной задачи, характеристик социальной сети, доступных данных и т.д.

В другой обзорной статье (Li et al., 2017), рассматривающей более 80 наиболее релевантных исследований о распространении информации в социальных сетях, соответствующие модели разделяются на две категории — объяснительные и прогностические, большинство из которых методологически базируются на *моделях эпидемий*⁵.

В исследовании специалистов Министерства обороны Индии (Kumar, Sinha, 2021) показано, что скорость распространения информации сильно зависит от топологии социальной сети, а также от механизма ввода в модель информации для ее дальнейшей передачи. Так, элементы сети

¹ По материалам Global Digital Report (<https://datareportal.com/reports/digital-2023-april-global-statshot>).

² <https://news.cnrs.fr/articles/how-social-networks-manipulate-public-opinion>

³ <https://www.forbes.com/sites/petersuciu/2022/03/01/is-russias-invasion-of-ukraine-the-first-social-media-war/?sh=1c39239b1c5c>

⁴ Подробнее см. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S131915781930388X>

⁵ Компарментные модели — общий метод моделирования, часто применяется для математического моделирования инфекционных заболеваний.

с наибольшим числом контактов могут заметно ускорить процесс распространения новостей. Для апробации модели полученные с ее помощью данные были сопоставлены со статистикой передачи информации в одном из сегментов социальной сети Facebook, состоящем из 4039 узлов и 88 234 ребер, средняя степень связности которого составляет 22 контакта. Результаты работы модели показали высокую прогностическую способность распространения информации в социальных сетях, а также инфекционных заболеваний в обществе (Kumar, Sinha, 2021).

В работе (Rand et al., 2015) рассматриваются две модели распространения информации в виртуальных социальных сетях в сравнении со скоростью реакций пользователей социальной сети Twitter на ряд событий: 1) уничтожение Усамы бен Ладена; 2) ураган «Айрин»; 3) ураган «Сэнди»; 4) президентские выборы в США в 2012 г. Первая модель является модифицированной версией модели диффузии Басса, изначально предложенной в 1969 г. (Bass, 1969), но впоследствии многократно повторенной средствами агент-ориентированного подхода с учетом особенностей индивидуумов, теснотой связей между ними и т.д. (к примеру, (Rand, Rust, 2011)). Вторая модель определена авторами как *независимая каскадная*, поскольку информация в ней распространяется поэтапно: агент получает ее только от своих соседей в социальной сети и только после того, как они воспримут ее на предыдущем шаге.

Для сбора данных использовался интерфейс Streaming API, позволивший собирать все твиты по определенным темам. Был сформирован массив данных о 15 000 пользователей, не являющихся знаменитостями, и их связях. Принцип отбора заключался в достаточной активности аккаунтов — публикация не менее 1 твита в день за последние 100 дней. Результаты расчетов обеих моделей показали высокую реалистичность имитации распространения информации, особенно данных об ураганах. Различия между агентной версией модели Басса и каскадной модели оказались незначительными, их прогностические возможности несколько различались — в зависимости от имитируемого события, поэтому однозначно определить «лучшую» модель трудно (Rand et al., 2015).

Исследователи Оборонного научно-технического университета Народно-освободительной армии Китая разработали стохастическую модель для отображения поведения пользователей социальных сетей, которые создают, пересылают, просматривают и игнорируют сообщения. Для тестирования модели оценивалось поведение 5 млн пользователей крупнейшей социальной сети Китая — WeChat, обменивающихся ссылками на веб-страницы (более 220 тыс.) в течение 45 дней. Помимо оценки скорости распространения информации, было выявлено, что вероятность просмотра сообщений пользователями с большим числом друзей в среднем ниже, в чем у остальных (Liu et al., 2018).

Другой подход к моделированию распространения информации предложен в работе (Kumar et al., 2021), где используется модифицированная модель лесных пожаров. «Пользователи» в модели социальной сети схожи с отдельными деревьями, которые отличаются размером, огнестойкостью и т.д., также различаются значениями параметров. Для тестирования модели использовались данные сети Twitter, генерированные во время следующих событий: пандемия коронавируса, Чемпионат мира по футболу 2018 г. в России, Финал NBA 2018 г., выход последнего сезона сериала «Игра престолов» в 2019 г. и фестиваль музыки и искусств в долине Коачелла в 2019 г. По заверениям авторов, предложенная ими модель воспроизвела процесс распространения информации обо всех перечисленных выше событиях лучше других, в частности построенной на базе модели эпидемий (Kumar et al., 2021).

В работе (Wang, Li, 2018) анализируется процесс распространения информации, учитывающий когнитивные способности отдельных людей, а также механизмы стадного мышления, суперпозиции памяти, рассеивания внимания и др. Один из результатов расчетов заключается в том, что уровень познания индивидуумов об их окружении влияет на скорость распространения информации (Wang, Li, 2018).

В статье (Qiang, Pasiliao, Zheng, 2019) рассматриваются две модели распространения информации: 1) линейная пороговая, согласно которой индивидуум активизируется, в случае если поступающие к нему суммарные веса связанных с ним пользователей превышают задаваемое число; 2) модель случайного блуждания, предусматривающая возможность диффузионного влияния не только непосредственных контактов. Для настройки параметров моделей использовались многослойные нейронные сети, позволившие достичь высокой точности компьютерной симуляции для тестовой социальной сети, содержащей 42 259 пользователей.

В исследовании (Agguda et al., 2022) предложена модель, в которой агенты формируют мнение относительно получаемой от друзей информации и в зависимости от ее содержания могут корректировать свое отношение к отправителю новости. В отдельных случаях с определенной вероятностью агенты модели перестраивают сеть своих контактов, удаляя нежелательных пользователей. Для тестирования

модели использовались данные Twitter, которые отображали события, усилившие поляризацию американского общества, — закон о защите пациентов и доступном здравоохранении Obamacare (8703 сетевых узлов) и закон о легализации аборт (7401 узел). Полученные с помощью модели результаты в целом показали сильное сходство с реальной социальной сетью (Arguda et al., 2022).

Исследование (Pond et al., 2020) посвящено вопросам влияния различных топологий социальных сетей на характеристики информационных потоков. К примеру, эмпирически было выявлено, что повышенная плотность социальной сети тормозит информационные потоки, а увеличивающаяся кластеризация социума снижает их мощность.

В работе (Мачуева, Ажмухамедов, 2018) подчеркивается важность применения мультиагентного подхода при моделировании процесса передачи информации, поскольку в этом случае можно отразить такие важные характеристики коммуницирующих агентов, как уровень общительности, степень консерватизма, эмоциональное отношение к информации и др. Кроме того, в модели, помимо статистических методов, используется аппарат нечетких множеств и нечеткого когнитивного моделирования. Один из результатов заключается в том, что повышение восприимчивости агентов к чужому мнению является определяющим фактором, влияющим на скорость распространения информации в социуме.

В фундаментальной работе (Губанов, 2021) разработан комплекс математических моделей динамики мнений агентов в сетевых структурах с учетом информационного давления связанных членов, их репутации и доверия к поступающей информации. Кроме того, автор применил модель информационного противоборства в рамках социальной сети и исследовал вопросы кооперации с учетом рефлексии агентов.

Исследование (Röchert, Cargnino, Neubaum, 2022) посвящено влиянию лидеров общественного мнения на распространение информации в социальных сетях, возможностям изменения мнения большинства их обычных участников за счет дискредитации противоположных точек зрения. Результаты, полученные с помощью соответствующей агент-ориентированной модели показали, что среди двух сообществ, придерживающихся противоположных взглядов на одну тему, в конечном счете, лидирует то, где в числе единомышленников — больше лидеров мнений. Интересен также результат, показывающий, что, даже при отсутствии лидеров мнений, со временем в социуме образуется большинство агентов, склоняющихся к единому мнению, хотя этот процесс и значительно растянут по времени (Röchert, Cargnino, Neubaum, 2022).

В работе (Kumar, 2019) анализируется влияние трех факторов, которые, по мнению авторов, в наибольшей мере влияют на процесс распространения информации в социальной сети: 1) число активных пользователей в текущий момент; 2) время после размещения публикации; 3) ее содержание. Полученная исследователями оценка новостной ленты Facebook за период с апреля 2012 г. по декабрь 2016 г. показала, что «время жизни» контента весьма ограничено — несколько часов, причем 50% реакций на новость поступает в первые четыре часа. Если информация публикуется в то время, когда потенциальная аудитория по большей части не в сети, то размещенные посты не получают необходимого числа реакций и проигрывают в конкуренции с другими новостями. Построенная авторами модель показала точность прогноза распространения информации около 80%.

В ряде исследований доказано, что **распространение информации** на определенную тему (в основном через СМИ) способно **существенно повлиять на экономическую ситуацию**.

Так, исследователи Банка Норвегии (Norges Bank — центрального банка Норвегии) и Норвежской школы бизнеса (Handelshøyskolen BI) изучили инфляционные ожидания населения, обусловленные новостями информационных агентств, опубликовав соответствующие расчеты в работе (Larsen, Thorsrud, Zhulanova, 2021). Они составили большую базу материалов (около 5 млн единиц за период 1990–2016 гг.), опираясь преимущественно на новостные статьи из архива одного из ведущих мировых агентств финансовой информации Dow Jones Newswires Archive, и обработали ее средствами текстовой маркировки относительно возможного повышения цен. Учитывались статьи, содержащие любой намек на возможное увеличение расходов домашних хозяйств (на медицинские услуги в результате сезонного повышения спроса, авиаперелеты и т.д.). *Результаты, полученные с использованием построенной модели, показали статистически значимую зависимость между частотой подаваемой новостными агентствами информации, формирующей у людей ожидания роста цен, и фактическими значениями инфляции* (Larsen, Thorsrud, Zhulanova, 2021).

Группа ученых из Корнеллского университета (США), Китайской академии наук (Академия наук КНР), Центрального финансово-экономического университета (Пекин) и Пекинского университета

разработала компьютерную модель, с помощью которой были проанализированы 880 000 статей из “Wall Street Journal” за период с 1984 по 2021 г. Построенный инструмент продемонстрировал, что *экономические нарративы* позволяют более точно предсказывать инфляцию, чем традиционные модели, особенно хорошо проявляя себя в периоды рецессии. По мнению авторов, одна из причин такой большей точности заключается в том, что в статьях часто содержится важная информация о ценах на конкретные товары и предположениях их изменений, исходящая непосредственно от производителей и покупателей (Hong et al., 2022). Кроме того, была выявлена следующая закономерность: *чем чаще в СМИ обсуждается конкретная тема, тем выше вероятность ее влияния на экономическую ситуацию.*

Исследователи из Грайфсвальдского и Ростокского университетов (Германия) с помощью разработанной модели проанализировали 700 тыс. газетных статей, опубликованных в изданиях “The New York Times” и “Washington Post” за период с 1980 по 2018 г. Результаты показали сильное влияние информационных сообщений на доходность акций (тестировались акции, включенные в S&P 500), причем наиболее сильно воздействуют статьи, содержащие новости, связанные с геополитикой, чем с экономикой (Adämmer, Schüssler, 2019).

Ученые из Школы бизнеса Колумбийского университета и Национального бюро экономических исследований (США) разработали подход к обработке новостей, который был апробирован на массиве данных 51 страны за период с 1998 по 2015 г. Результаты показали влияния информации на доходность фондового рынка, причем она заметно варьирует в зависимости от конкретной страны и интервала времени (Calomiris, Mamaysky, 2019).

Интересное исследование по анализу распространения информации в социальных сетях провели в Сианьском университете Цзяотун (Китай). В нем показано, что *эмоциональная окраска новости заметно влияет на интенсивность ее рассылки.* Также отмечается, что целенаправленный контроль над содержанием сообщений позволяет *стабилизировать общественное мнение и снизить негативное влияние неблагоприятных событий.* Скорость распространения информации существенно зависит от участия в этом процессе *пользователей с большим числом подписчиков.* Участие таких участников социальной сети позволяет снижать тревожные настроения населения (Cai et al., 2022).

В статье (Beklaryan, Beklaryan, Akorov, 2022) выполнено компьютерное моделирование известной агентной модели Деффюанта, используемой для изучения динамики мнений в зависимости от вовлеченности агентов и влияния агентов — распространителей информации. А в работе (Акопов, Бекларян, Бекларян, 2021) предложена *новая агентная модель ограниченного соседства*, разработанная на основе модели сегрегации Шеллинга. Подобные модели интересны прежде всего тем, что они изучают коллективное поведение агентов под воздействием внешней информации, в том числе формируемой в условиях ограниченного соседства и распространяемой через социальные сети. Существенное значение при этом имеет принадлежность агентов — потребителей информации к определенной группе и их антагонистичность по отношению друг к другу.

Таким образом, на основе анализа перечисленных выше исследований можно сформировать *концептуальную схему*, содержащую информацию об основных типах используемых моделей и способах их численного разрешения (рис. 1).

Отметим, что большая часть разработанных моделей социальных сетей направлена на исследование следующих процессов:

- определение скорости распространения информации (в зависимости от топологий социальных сетей, их плотности, а также числа кластеров, влияющих на мощность информационных потоков, и механизма ввода информации);
- поиск наиболее эффективных способов распространения информации — линейные пороговые, случайного блуждания (диффузионное влияние) и др.;
- расчет количества внедренных лидеров мнений, необходимого для дискредитации противоположных точек зрения и поляризации общественного мнения;
- расчет точного времени для повышения эффективности оглашения информации.

Важным моментом является *содержание распространяемой информации.* Так, исследование, проведенное в Массачусетском технологическом институте, показало, что *ложные новости на 70% пересылаются чаще, чем достоверная информация.* Этот вывод был количественно подтвержден после анализа 126 тыс. историй, которыми поделились около 3 млн пользователей сети Twitter за период с 2006 по 2017 г. По словам исследователей, ложные истории распространяются во всех информационных

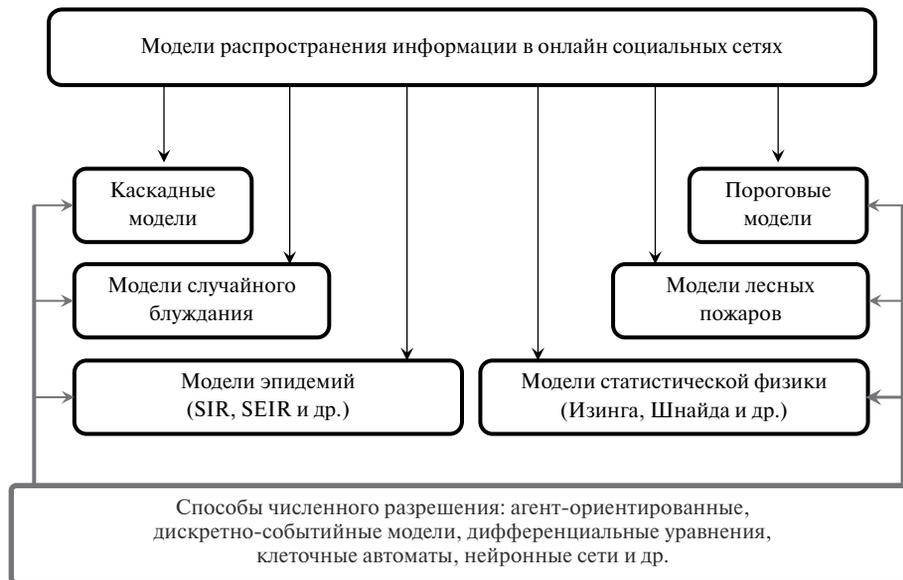


Рис. 1. Типологизация моделей распространения информации

сферах, но чаще всего это касается политических новостей, чем при описании стихийных бедствий или научных достижений. Так, рост ложных сообщений особенно отмечался во время президентских выборов 2012 и 2016 г. в США⁶.

По мнению руководителя проекта Сорюша Восуги⁷, это связано с тем, что «ложная информация зачастую идет вразрез с ожиданиями и поэтому люди, находясь под впечатлением от нее, с большей вероятностью перешлют ее дальше». Также он отмечает, что для охвата аудитории, например из 1500 человек, достоверной информации требуется в шесть раз больше времени, чем ложной⁸.

АГЕНТ-ОРИЕНТИРОВАННАЯ МОДЕЛЬ

Для своего исследования мы будем использовать агент-ориентированный подход, поскольку он, помимо прочего, позволяет учитывать индивидуальные особенности людей и проводить дифференцированную оценку влияния информационных сообщений только на определенную группу (возрастную или проживающую в конкретном регионе и т.д.). Ниже приведено краткое описание построенной нами модели, рассматривающей процесс распространения информации в социальной сети.

Характеристики агентов

1. Пол. Эта характеристика важна, поскольку статистика показывает, что женщины более активно используют социальные сети. В табл. 1 по состоянию на май 2023 г. представлена информация о половой принадлежности авторов сообщений.

Таблица 1. Распределение авторов сообщений основных социальных сетей по признаку пола, %⁹

Социальная сеть	Женщины	Мужчины
Вконтакте	61	39
Facebook	64	36
Instagram	82	18

⁶ <https://www.reuters.com/article/us-usa-cyber-twitter/false-news-70-percent-more-likely-to-spread-on-twitter-study-idUSKCN1GK2QQ>

⁷ Создание Rumor Gauge (автоматического алгоритма обнаружения фальшивых новостей) (https://ru.fwiki.wiki/wiki/Th%C3%A9orie_du_complot).

⁸ <https://news.mit.edu/2018/study-twitter-false-news-travels-faster-true-stories-0308> (March, 2018). См. также (Vosoughi, Roy, Aral, 2018).

⁹ <https://br-analytics.ru/statistics/author/vk/202305/20>

Таблица 2. Источники получения информации, %

Источник	Возрастная группа			
	18–30 лет	31–45 лет	46–60 лет	Старше 60 лет
Телевидение	32	51	69	87
Форумы, блоги, сайты социальных сетей	44	27	20	7

Таблица 3. Источники, вызывающие наибольшее доверие, %

Источник	Возрастная группа			
	18–30 лет	31–45 лет	46–60 лет	Старше 60 лет
Телевидение	24	34	44	63
Форумы, блоги, сайты социальных сетей	27	15	10	3

2. Возраст. Многочисленные исследования показывают, что число контактов у участников онлайн-сообществ заметно снижается в зависимости от увеличения возраста. Причем этот процесс характерен для всех стран и социальных сетей (Bruine de Bruin, Parker, Strough, 2020).

В табл. 2 и 3 приведена статистика организации Фонда «Общественное мнение» от 14 февраля 2023 г. относительно источников получения информации и доверия к ним¹⁰. Примерно такие же результаты, но с меньшим разбросом, ранее были опубликованы АНО «Левада-Центр»^{11,12}.

3. Регион проживания имеет значение, поскольку, согласно последним доступным данным Росстата за 2021 г., использование информационных технологий по регионам значительно варьирует. Так, удельный вес домашних хозяйств, имевших широкополосный доступ к сети Интернет в Ямало-Ненецком автономном округе, составляет 98,4%, а в Новгородской области значительно меньше — 69,5% (для сравнения — в Москве 94,4%). В свою очередь, доля населения, использовавшая сеть Интернет каждый день, в Тверской области составляет 66,5, а в Москве — 93%.

4. Тип поселения (сельское/городское) также влияет на доступность интернет-соединений.

5. Уровень коммуникабельности агента определяет число контактов в социальной сети и интенсивность их отправки. Для большинства агентов в модели установлено ограничение (некое максимально возможное число контактов) в 150 контактов — в соответствии с теорией Данбара о возможностях среднестатистического человека поддерживать социальные связи (Gonçalves, Pezza, Vespignani, 2011). Причем в зависимости от увеличения возраста число контактов снижается. Однако для некоторых агентов такого ограничения нет, и число контактов в модели для них неограниченно и может значительно превышать этот барьер. Это — варьируемый параметр, который вводит в цифровой социум различное число «лидеров мнений».

6. Уровень репутации агента влияет на степень доверия к получаемой от него информации.

7. Уровень восприятия информации (своего рода порог, для того чтобы новость была воспринята). В модель вводятся поправочные коэффициенты, корректирующие уровень восприятия информации в зависимости от возраста.

Ниже приведена функция, определяющая силу сигнала, поступающего к конкретному агенту в момент времени t :

$$f(t) = \left(e^{x(t-1)} - e^{-x(t-1)} \right) / \left(e^{x(t-1)} + e^{-x(t-1)} \right),$$

где $x(t) = (a(t)/r)(s_i/S)$ — соотношение контактов конкретного агента с их средним по социуму числом r , скорректированным на уровень распространения информационных технологий s_i в регионе i , в котором проживает агент; S — средний по стране уровень развития информационных технологий.

Мы тестировали несколько функций, лучшей из которых оказалась сигмоидальная, принимающая значение между 0 и 1. Вообще приведенное выше соотношение является гиперболическим тангенсом, результат которого варьирует от -1 до 1 . Но, учитывая, что аргумент функции всегда больше 0, то получаемое значение — также всегда положительное.

¹⁰ <https://fom.ru/SMI-i-internet/14835>

¹¹ Компания признана в России иностранным агентом.

¹² <https://www.levada.ru/2022/08/16/vospriyatye-novostnoj-informatsii-sredi-rossiyan-otnoshenie-k-presledovaniyu-v-internete/>



Рис. 2. Концептуальная схема работы модели

На рис. 2 приведена концептуальная схема работы модели, включающая несколько этапов.

Разберем эти этапы подробнее.

1. На этапе 1 происходит считывание информации из базы данных, инициализация программных конструкций модели (переменных, массивов, классов и т.д.).

2. На этапе 2 воспроизводится искусственное общество путем создания необходимого количества агентов — экземпляров программных классов, а также происходит присвоение конкретных значений перечисленным выше свойствам для каждого индивидуума. Этот процесс неоднозначный, поскольку требует подбора вероятностных функций, чтобы в конечном счете реализованный цифровой социум воспроизводил реальный в части половозрастной и региональной структур, а также соответствовал закладываемым предположениям по другим характеристикам (коммуникабельность, восприимчивость и др.).

3. На этапе 3 между агентами модели создаются социальные связи с учетом пола, возраста и уровня их коммуникабельности.

После процедур инициализации модели для пользователя выводится рабочее окно с возможностью изменения управляющих параметров, определяющих, кто из агентов получит новую информацию первым. Часть параметров может меняться и после этапа создания цифрового социума — к примеру, уровень коммуникации, репутации и восприятия информации для различных групп агентов, а также число и распределение лидеров мнений.

4. На каждом отрезке времени происходит расчет числа агентов, обладающих новой информацией. И в зависимости от уровня их коммуникабельности они передают ее дальше, среди своих еще неосведомленных контактов.

5. Для каждого агента, в том случае если он еще не получил новой информации, происходит расчет приведенной выше логистической функции с учетом интенсивности поступающего сигнала и уровня распространения информационных технологий в регионе проживания.

6. С учетом уровня восприятия, задаваемым в виде порогового значения, агент с определенной вероятностью усваивает новую информацию и в зависимости от уровня коммуникабельности становится участником процесса ее дальнейшего распространения.

7. Следующий этап является техническим и нужен для сбора статистики по всем агентам модели с последующей ее обработкой и пересчетом коллекций программ.

8. После завершения всех перечисленных выше процедур на экран выводятся результаты расчетов и система входит в режим ожидания дальнейших действий пользователя.



Рис. 3. Темп прироста информированных агентов: базовый вариант и сценарий 1 (ось абсцисс — такты модельного времени, ось ординат — темп прироста, %)

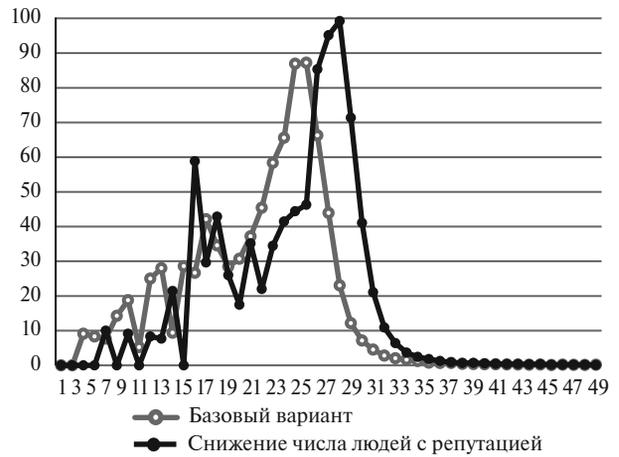


Рис. 4. Темп прироста информированных агентов: базовый вариант и сценарий 2 (ось абсцисс — такты модельного времени, ось ординат — темп прироста, %)

Вычислительные эксперименты

В качестве вычислительных экспериментов оценим скорость распространения информации в построенном нами цифровом двойнике социальной сети в зависимости от следующих сценариев расчетов:

- 1) увеличение числа *лидеров мнений* — участников социальной сети с числом контактов, на порядок превышающих их среднее число в моделируемом социуме;
- 2) снижение среднего уровня репутации агентов сети (за счет этого снижается уровень доверия к получаемой от агентов информации и снижается вероятность ее восприятия);
- 3) увеличение числа информированных агентов (таким образом, запускаемая в общество информация изначально имеет больший охват).

Для оценки будем рассматривать темп прироста информированных агентов (a), рассчитываемый следующим образом: $((a_t - a_{t-1}) / a_{t-1}) \times 100\%$. Полученные нами результаты приведены на рис. 3–5. Как видно, с точки зрения скорости распространения информации самым действенным сценарием является первоначальный охват целевой аудитории. Если сравнивать первый

и второй варианты ускорения рассматриваемого процесса, то вовлечение «лидеров мнений» является более эффективным механизмом, чем повышение уровня репутации агентов.



Рис. 5. Темп прироста информированных агентов: базовый вариант и сценарий 3 (ось абсцисс — такты модельного времени, ось ординат — темп прироста, %)

В 2023 г. в одном из самых цитируемых в мире журналов, «Scientific Reports», вышла статья авторского коллектива из Франции и Аргентины (Schawe et al., 2023), в которой рассматривается процесс распространения информации в различных социальных сетях (преимущественно Twitter) о наиболее заметных мировых событиях с января 2020 г. Авторы анализировали частоту использования участниками сети хэштэгов, имеющих отношение к восьми темам с наибольшим охватом (пандемия коронавируса, выборы в США, движение BLM и др.). Был обработан репрезентативный участок Twitter, включающий около 8 млн пользователей, опубликовавших около полумиллиарда твитов. Можно отметить, что характер процесса

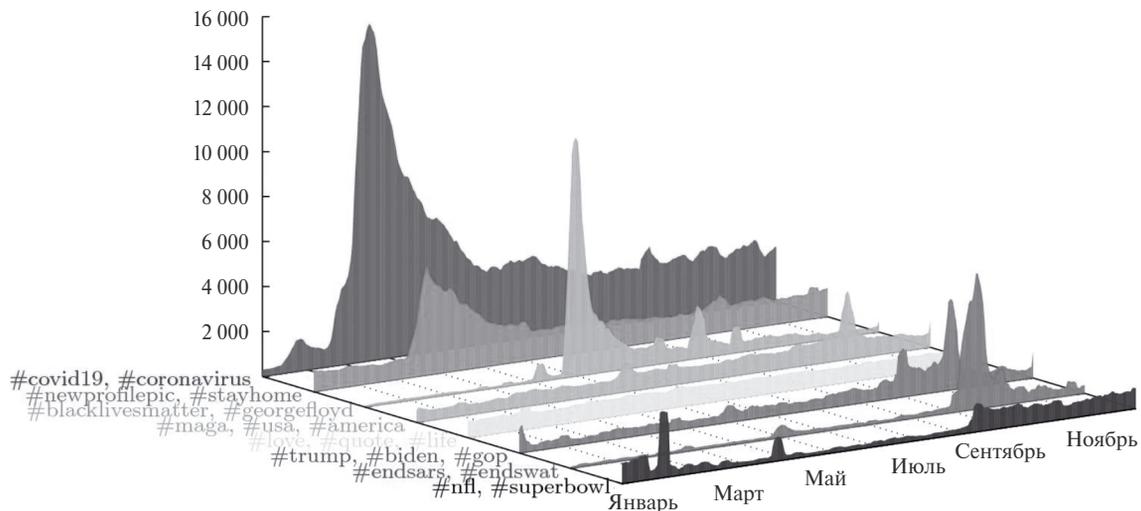


Рис. 6. Результаты исследования сети Twitter в части анализа динамики обсуждения наиболее занимающих внимание общественных процессов 2020–2021 гг. (вертикальная ось — число уникальных участников сети, использующих соответствующие хэштеги, отложенные по одной из горизонтальных осей)

Источник: Schawe et al., 2023.

распространения информации в реальной сети (рис. 6) весьма схож с искусственным аналогом построенного нами цифрового двойника.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Построенная нами агент-ориентированная модель достаточно хорошо воспроизводит процесс распространения информации в сравнении с реальными данными, полученными в ходе анализа наиболее популярных социальных сетей.

Этому способствует эмпирически подобранная функция, определяющая силу сигнала, поступающего к конкретному агенту, а также используемая для компьютерной реализации парадигма имитационного моделирования. Выше уже отмечалось, что большинство аналогов используют механизм реализованных в моделях эпидемий. Однако, как правило, технически это разрешается путем применения дифференциальных уравнений. В свою очередь, мы рассматривали социум на уровне отдельных индивидуумов, что позволило получить более реалистичного цифрового двойника.

Дополнительные преимущества разработанного инструмента, на наш взгляд, следующие: 1) учет региональной специфики, определяющий уровень распространения информационных технологий, влияющий на возможность охвата проживающего в соответствующем ареале (районе) населения; 2) анализ половозрастных характеристик агентов; 3) учет личностных особенностей — коммуникабельность, восприимчивость и др., также влияющих на процесс распространения информации.

Вычислительные эксперименты показали, что на скорость распространения информации в наибольшей мере влияет первоначальный охват целевой аудитории и вовлечение в этот процесс «лидеров мнений» с большим числом контактов.

Тем не менее, многие вопросы нуждаются в дальнейшей проработке. К примеру, необходимы ответы на следующие вопросы.

1. Почему некоторые новости распространяются быстрее и охватывают большую аудиторию?

2. С чем связана возможная задержка в восприятии отдельной информации? Иными словами, почему информация может долгое время быть доступной, но не распространяться, а ее активное продвижение происходит случайным образом?

И другие вопросы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

- Акопов А.С., Бекларян Л.А., Бекларян А.Л.** (2021). Мультисекторная модель ограниченного соседства: сегрегация агентов и оптимизация характеристик среды // *Математическое моделирование*. Т. 33. № 11. С. 95–114. DOI: 10.20948/mm-2021-11-06 [Акопов А.С., Бекларян Л.А., Бекларян А.Л. (2021). Multisector bounded-neighborhood model: Agent segregation and optimization of environment's characteristics. *Matematicheskoe Modelirovanie*, 33, 11, 95–114. DOI: 10.20948/mm-2021-11-06 (in Russian); Акопов А.С., Бекларян Л.А., Бекларян А.Л. (2022). Multisector bounded-neighborhood model: Agent segregation and optimization of environment's characteristics. *Mathematical Models and Computer Simulations*, 14, 3, 503–515. DOI: 10.1134/S2070048222030024 (in English).]
- Губанов Д.А.** (2021). Модели и методы информационного влияния и управления в активных сетевых структурах. Дис. ... уч. степ. докт. техн. наук. М.: ИПУ РАН. 307 с. [Gubanov D.A. (2021). *Models and methods of information influence and management in active network structures*. Dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences Moscow: Institute of Control Sciences RAS. 307 p. (in Russian).]
- Мачуева Д.А., Ажмухамедов И.М.** (2018). Моделирование процесса информационного взаимодействия в социальных системах // *Системы управления, связи и безопасности*. № 2. С. 18–39. Режим доступа: <http://sccs.intelgr.com/archive/2018-02/02-Machueva.pdf> [Machueva D.A., Azhmuhamedov I.M. (2018). Modeling the information interaction process social systems. *Systems of Control, Communication and Security*, 2, 18–39. Available at: <http://sccs.intelgr.com/archive/2018-02/02-Machueva.pdf> (in Russian).]
- Adämmer P., Schüssler R.A.** (2019). Forecasting the equity premium: Mind the news. *Review of Finance. Forthcoming*. SSRN: 3370424. DOI: 10.2139/ssrn.3370424
- Arruda H.F., Cardoso F.M., Arruda G.F., Hernandez A.R., Costa L.D., Moreno Y.** (2022). Modelling how social network algorithms can influence opinion polarization. *Information Sciences*, 588, 265–278. ISSN: 0020-0255. DOI: 10.1016/j.ins.2021.12.069
- Bass F.** (1969). A new product growth for model consumer durables. *Management Science*, 15 (5), 215–227. DOI: 10.1287/mnsc.15.5.215
- Beklaryan A.L., Beklaryan L.A., Akopov A.S.** (2022). Implementation of the deffuant model within the FLAME GPU framework. *Advances in Systems Science and Applications*, 21, 4, 87–99. DOI: 10.25728/assa.2021.21.4.1161
- Bruine de Bruin W., Parker A.M., Strough J.** (2020). Age differences in reported social networks and well-being. *Psychology and Aging*, March, 35 (2), 159–168. DOI: 10.1037/pag0000415
- Cai M., Luo H., Meng X.** et al. (2022). Influence of information attributes on information dissemination in public health emergencies. *Humanities Social Sciences Communications*, 9, 257. DOI: 10.1057/s41599-022-01278-2
- Calomiris C.W., Mamaysky H.** (2019). How news and its context drive risk and returns around the world. *Journal of Financial Economics*, 133, 2, 299–336. DOI: 10.1016/j.jfineco.2018.11.009
- Gonçalves B., Perra N., Vespignani A.** (2011). Modeling users' activity on twitter networks: Validation of Dunbar's number. *PLoS One*, 6 (8), e22656. DOI: 10.1371/journal.pone.0022656 Available at: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3149601>
- Hong Y., Jiang F., Meng L., Xue B.** (2022). *Forecasting inflation with economic narratives and machine learning*. SSRN: <https://ssrn.com/abstract=4175749> or DOI: 10.2139/ssrn.4175749
- Kumar N.** (2019). *Information diffusion and summarization in social networks*. A thesis submitted to Indian institute of technology Hyderabad in partial fulfillment of the requirements for the degree of doctor of philosophy. Hyderabad: Indian Institute of Technology. Available at: <https://core.ac.uk/reader/224956800>
- Kumar P., Sinha A.** (2021). Information diffusion modeling and analysis for socially interacting networks. *Social Network Analysis and Mining*, 11, 1. DOI: 10.1007/s13278-020-00719-7
- Kumar S., Saini M., Goel M.** et al. (2021). Modeling information diffusion in online social networks using a modified forest-fire model. *Journal of Intelligent Information Systems*, 56, 355–377. DOI: 10.1007/s10844-020-00623-8
- Larsen V.H., Thorsrud L.A., Zhulanova J.** (2021). News-driven inflation expectations and information rigidities. *Journal of Monetary Economics*, 117, 507–520. DOI: 10.1016/j.jmoneco.2020.03.004
- Li M., Wang X., Gao K., Zhang S.** (2017). A survey on information diffusion in online social networks: Models and methods. *Information*, 8, 118. DOI: 10.3390/info8040118
- Liu L., Qu B., Chen B., Hanjalic A., Wang H.** (2018). Modeling of information diffusion on social networks with applications to WeChat. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 496, 318–329. DOI: 10.1016/j.physa.2017.12.026
- Pond T., Magsarjav S., South T., Mitchell L., Bagrow J.P.** (2020). Complex contagion features without social reinforcement in a model of social information flow. *Entropy*, 22 (3), 265.

- Qiang Z., Pasiliao E.L., Zheng Q.P.** (2019). Model-based learning of information diffusion in social media networks. *Applied Network Science*, 4. Article number: 111. DOI: 10.1007/s41109-019-0215-3
- Rand W., Herrmann J., Schein B., Vodopivec N.** (2015). An agent-based model of urgent diffusion in social media. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 18 (2), 1. DOI: 10.18564/jasss.2616 or Available at: <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/18/2/1.html>
- Rand W., Rust R.T.** (2011). Agent-based modeling in marketing: Guidelines for rigor. *International Journal of Research in Marketing*, 28 (3), 181–193. DOI: 10.1016/j.ijresmar.2011.04.002
- Razaque A., Rizvi S., Khan M.J., Almiani M., Rahayfeh A.A.** (2022). State-of-art review of information diffusion models and their impact on social network vulnerabilities. *Journal of King Saud University — Computer and Information Sciences*, 34, 1, 1275–1294. ISSN: 1319–1578. DOI: 10.1016/j.jksuci.2019.08.008 or Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S131915781930388X>
- Röcherth D., Cargnino M., Neubaum G.** (2022). Two sides of the same leader: An agent-based model to analyze the effect of ambivalent opinion leaders in social networks. *Journal of Computational Social Science*, 5, 1159–1205. DOI: 10.1007/s42001-022-00161-z
- Schawe H., Beiró M.G., Alvarez-Hamelin J.I.** et al. (2023). Understanding who talks about what: Comparison between the information treatment in traditional media and online discussions. *Sci. Reports*, 13, 3809. DOI: 10.1038/s41598-023-30367-8
- Vosoughi S., Roy D., Aral S.** (2018). The spread of true and false news online. *Science*, Mar, 359, 6380, 1146–1151. DOI: 10.1126/science.aap9559
- Wang Y., Li G.** (2018). The spreading of information in online social networks through cellular automata. *Complexity*, 1–9. DOI: 10.1155/2018/1890643

Information wars in the contemporary world and simulation of news dissemination

© 2024 I.V. Losik, S.V. Sidorenko, M. Yu. Sidorenko, A.R. Bakhtizin

I.V. Losik,

*presenter of evening news “Itogi Dnya” (“Results of the Day”) of “Zvezda” (“The Star”) TV and Radio Company of the Armed Forces of the Russian Federation; President of “Heirs of the Winners” Fund for the Preservation of the Cultural and Historical Memory of War Heroes; graduate student of the Higher School of Public Audit, Faculty of Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia;
e-mail: iralosiknews@mail.ru*

S.V. Sidorenko,

Department of Scientific & Methodological Supervision and Expert Activity, the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia; e-mail: sidor@presidium.ras.ru

M.Yu. Sidorenko,

*Department of Scientific & Information Activity of the RAS and Interaction with the Scientific & Educational Community; Scientific & Publishing Council of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia;
e-mail: myusidorenko@pran.ru*

A.R. Bakhtizin,

*Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences; Central Economics and Mathematics Institute, Russian Academy of Sciences; Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia;
e-mail: albert.bakhtizin@gmail.com*

Received 08.09.2023

The work was carried out within the framework of the project “Software Development and analytical complex of socio-economic multi-agent models based on supercomputer technologies for implementation in situation centers of the country aiming to counter external threats and ensure national sovereignty of Russia”.

Abstract. The paper considers information wars that are part of modern hybrid conflicts. They were analyzed using computer models that implement the process of information dissemination in social communities. The typology of the most relevant and cited tools made possible to find an effective algorithm for implementing the authors’ agent-oriented model that takes into account individual characteristics of people and allows differentiated assessment of the impact of information messages only on a certain group. Within the framework of computational experiments, the speed of information dissemination in the constructed digital twin of a social network was estimated depending on the change in the number of opinion leaders and the number of initially informed agents, as well as on the decrease in the average level of reputation of network agents. The instrument designed may be used separately, as well as along within the complex models, including demographic and economic components.

Keywords: agent-oriented models, simulation of information dissemination, hybrid wars.

JEL Classification: C63, D91.

UDC: 330.47.

For reference: **Losik I.V., Sidorenko S.V., Sidorenko M.Yu., Bakhtizin A.R.** (2024). Information wars in the contemporary world and simulation of news dissemination. *Economics and Mathematical Methods*, 60, 2, 14–26. DOI: 10.31857/S0424738824020028 (in Russian).

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ

Парадокс капиталоемкости

© 2024 г. В.Е. Дементьев

В.Е. Дементьев,

чл.-корр. РАН, ЦЭМИ РАН, Москва, e-mail: vedementev@rambler.ru

Поступила в редакцию 22.03.2024

Аннотация. Снижение капиталоемкости производства позволяет поддерживать экономический рост при низкой норме накопления капитала. Однако связь между развитием экономики знаний и динамикой капиталоемкости имеет сложный характер. В отдельные периоды времени она положительная, в другие — отрицательная. Допустимо рассуждать о существовании парадокса капиталоемкости по аналогии с парадоксом производительности (парадокс Солоу). Для выявления того, как может формироваться парадокс капиталоемкости, в статье строится математическая модель обновления технологической базы производства. Особенностью модели является как ее многофазный характер, так и разграничение инвестиций в текущее производство, фундаментальные исследования и прикладные разработки. При описании сферы фундаментальных исследований и сферы производства используются логистические функции. Они позволяют учесть существование положительного эффекта масштаба в этих сферах и то, что он сохраняется лишь до некоторого объема используемых ресурсов. В модели представлено не только чередование длинных волны технологического развития, но и наложение волн друг на друга. Важное свойство этой модели состоит в том, что смена фаз развития основывается на определенной экономической логике, а не задается экзогенно. Выполнен иллюстративный расчет по модели, в результате которого получена траектория изменения капиталоемкости производства. Конфигурация этой траектории близка к тому, как реально менялась капиталоемкость производства в экономике США в период 1960–2022 гг. Предложенная модель демонстрирует связь парадокса капиталоемкости с периодическим обновлением технологий широкого назначения, с порождаемыми этими обновлениями волнами Кондратьева.

Ключевые слова: капиталоемкость производства, накопление капитала, инвестиции в человеческий капитал, инвестиции в исследования и разработки, технологии широкого назначения, волны Кондратьева.

Классификация JEL: C63, E22, O11, O51.

УДК: 330.32.

Для цитирования: Дементьев В.Е. (2024). Парадокс капиталоемкости // *Экономика и математические методы*. Т. 60. № 2. С. 27–39. DOI: 10.31857/S0424738824020037

ВВЕДЕНИЕ

В исследовании института МакКинзи «Продуктивность капитала», выполненного с участием Р. Солоу как консультанта, в качестве парадокса показано, что США могут создавать много нового богатства и относительно мало средств направлять на сбережения (Capital productivity, 1996, р. 1). Объяснение этого парадокса содержится в теории экономического роста М. Калецкого (Kalecki, 1954). Разработанная им модель экономической динамики помогает понять, почему рост ВВП в некоторых странах достигается при низкой норме накопления капитала. Ключевую роль в этом играет приростная капиталоемкость производства. Ее низкий уровень способен компенсировать то, что приростные инвестиции в основной капитал составляют относительно малую долю в ВВП. Поддерживать такой характер экономического роста помогает структурная политика, ставка на развитие менее капиталоемких отраслей, высокая доля инвестиций в человеческий капитал и в экономику знаний, что позволяет рассчитывать на снижение приростной капиталоемкости в качестве результатов таких инвестиций. С этой точки зрения важным ориентиром перевода экономики России на путь инновационного развития является повышение общего удельного веса инвестиций в ВВП — в основной и человеческий капиталы — эти две главные движущие силы социально-экономического роста (Аганбегян, 2023).



Рис. 1. Доля инвестиций в знания и человеческий капитал (левая шкала) в ВВП США (левая шкала, %) и капиталоемкость производства в США (правая шкала, %)

Источник: капиталоемкость производства рассчитана по данным Бюро экономического анализа США (Bureau of Economic Analysis, USA).

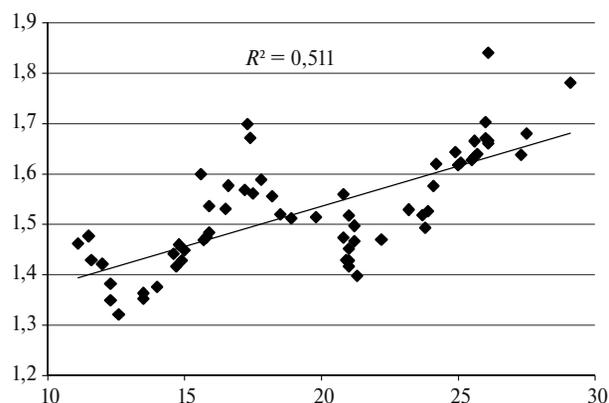


Рис. 2. Связь между капиталоемкостью производства (ось Y) и долей инвестиций в человеческий капитал и знания (ось X) в экономике США, %

Показателен уровень инвестиций в человеческий капитал и знания в экономике такой инновационной страны, как США. Доля в ВВП расходов на здравоохранение с 5% в 1960 г. выросла до 17% в 2009 г. и с тех пор не опускалась ниже этого уровня¹. Доля расходов на образование с 3,56% в 1960 г. выросла до 5,2% в 1970 г. и держится около этого уровня, временами приближаясь к 6%². Доля расходов на исследования и разработки в 1960 г. составляла 2,53%, однако после роста до 2,79% в 1964 г. она снизилась до 2,07% в 1978 г. и далее она колебалась около 2,5% в период 1982–2007 гг., но к 2023 г. выросла до 3,4%³. В целом совокупная доля инвестиций в человеческий капитал и знания в ВВП США выросла с 11,1% в 1960 г. до 27,5% в 2022 г.

На этом фоне обращает на себя внимание динамика капиталоемкости производства США. Как видно из графика на рис. 1, за наращиванием вложений в человеческий капитал и знания не обязательно следует повышение капиталоемкости (снижения капиталоемкости). В долгосрочном плане преобладает положительная связь между рассматриваемыми параметрами (рис. 2). При этом можно выделить периоды, в течение которых эта связь имеет отрицательный характер.

Ситуация напоминает ту, о которой Р. Солоу выразился следующим образом: «Компьютерный век можно увидеть везде, кроме статистики производительности» (Solow, 1987). В 1980-е годы в экономике США наблюдалось снижение производительности труда при ежегодном росте затрат на информационные технологии. Подобно тому, как эту ситуацию называют парадоксом производительности (парадоксом Солоу), можно рассуждать о парадоксе капиталоемкости. В течение длительных периодов может наблюдаться ее повышение, несмотря на рост инвестиций в развитие человеческого капитала и сферы знаний.

В статье предлагается объяснение этого парадокса с помощью теоретической модели технологического обновления производства. Иллюстративные расчеты демонстрируют возможность формирования такой траектории капиталоемкости, которая по конфигурации близка к наблюдаемой в реальности. Показано, что волнообразная динамика капиталоемкости связана с процессом смены доминирующих технологий широкого назначения.

¹ <https://www.cms.gov/data-research/statistics-trends-and-reports/national-health-expenditure-data/historical>

² https://www.usgovernmentspending.com/education_spending

³ <https://nces.gov/pubs/nfs24318/assets/data-tables/tables/nfs24318-tab001.pdf>

МЕСТО АНАЛИЗА КАПИТАЛОЕМКОСТИ В СОВРЕМЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

Как указывается в (Маевский, Рубинштейн, 2023), абстрагирование от волновой динамики капиталоемкости способно исказить результаты макроэкономических расчетов и ухудшать качество прогнозов. Отмечается, что существует реальная возможность учета изменений уровня капиталоемкости в гетеродоксальной модели переключающегося режима воспроизводства. Значения показателей капиталоемкости вводятся в эту модель на основе данных статистики США за период 1946–2019 гг. Волнообразный характер изменения капиталоемкости В.И. Маевский и А.А. Рубинштейн рассматривают как одно из проявлений больших циклов конъюнктуры Н.Д. Кондратьева. Однако механизм такой динамики капиталоемкости остается за рамками анализа переключающегося режима воспроизводства.

Резкая смена тенденций в динамике капиталоемкости практически обойдена вниманием в макроэкономических исследованиях. Это может быть следствием того, что анализ волн Кондратьева не включен в основной круг современных макроэкономических исследований. В литературе довольно часто обсуждение капиталоемкости сводится к тому, что не корректно сопоставлять рост экономики только с нормой накопления, игнорируя показатель приростной капиталоемкости. В (Лавровский, Чуваев, 2022) показано, что для развивающихся стран влияние нормы накопления на макроэкономическую динамику сопоставимо с влиянием прироста капиталоемкости. В группе развитых стран норма накопления если и воздействует положительно, то крайне незначительно, и доминантой здесь выступает отдача от капитала, а не его (относительный) объем.

Исследование влияния уровня капиталоемкости экономики на темпы экономического роста на основе статистических данных по экономикам Великобритании и Германии представлено в (Derkacz, 2020). Анализ подтвердил, что жизненно важными для динамики ВВП в этих странах являются не только потребление и инвестиции. Большое значение имеет капиталоемкость прироста выпуска.

На возможность немонотонного роста экономики в условиях технологического развития обращено внимание в исследованиях технологий широкого назначения. Исследования (Helpman, Trajtenberg, 1994; Bas, Nahujs, 2002) показывают, что, даже если новые технологии будут существенно более эффективными, на первых порах они едва ли смогут повлиять на рост экономики, поскольку им для значительного и длительного воздействия придется подождать формирования достаточно большого пула дополнительных активов. Более того, на создание таких активов расходуются ресурсы, и, следовательно, в краткосрочной перспективе это может негативно сказаться на росте. Однако динамика капиталоемкости пока не была предметом непосредственного анализа в исследованиях технологий широкого назначения, включая искусственный интеллект, при этом значительное внимание уделяется парадоксу производительности (Acemoglu et al., 2014; Brynjolfsson et al., 2019; Capello et al., 2022).

Растущая автоматизация производства, развитие искусственного интеллекта способствовали активизации изучения капиталовооруженности труда и перспектив занятости (Aghion et al., 2022; Ing, Grossman, 2022). Однако эти исследования не дают ответа на вопрос о динамике фондоотдачи/капиталоемкости производства.

МОДЕЛЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБНОВЛЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВА

Технологическое развитие в долгосрочном плане рассматривается как процесс смены доминирующих технологий широкого назначения. В (Андрукович, 2023) отмечено, что в большинстве работ волны Кондратьева моделируются в виде дифференциальных уравнений различного вида и представляются как следующие друг за другом периодические колебания, так что начало новой волны приходится на окончание предыдущей и т.д. Однако исследования технологий широкого назначения свидетельствуют о том, что эти технологии и порождаемые ими длинные волны не следуют одна за другой, а накладываются друг на друга. При этом очередная технологическая волна начинает свой рост в период действия предыдущей, а ее влияние на экономические процессы не заканчивается в конце ее первого цикла, а работает и в дальнейшем, формируя многоукладность экономики (Глазьев, 1993; Дементьев, 2021). В этой связи оправдано введение в структуру технологической волны понятий «латентный период», «период ее лидерства» и «технологический след», как предложено в (Андрукович, 2023). Таким представлениям о длинноволновой динамике соответствует модель технологического обновления производства, приводимая в данной статье. В ней в отличие от моделей, содержащихся в (Дементьев, 2021, 2023), выделены инвестиции в фундаментальные и прикладные исследования.

Модель имеет дискретный характер, причем единичные циклы группируются в последовательные фазы развития экономической системы. Для каждого набора технологий широкого назначения будем различать:

а) накопление теоретических знаний в результате фундаментальных исследований об этих технологиях. В соответствии со степенью их изученности можно рассматривать теоретический потенциал технологий, поскольку накопленные теоретические знания служат основой для соответствующих прикладных разработок;

б) накопление прикладных знаний, от чего зависит практический потенциал данного набора технологий.

При описании сферы фундаментальных исследований и сферы производства воспользуемся логистическими функциями. Они позволяют учесть эффект масштаба в этих сферах и то, что он сохраняется лишь до некоторого уровня наращивания объема используемых ресурсов.

Формирование теоретического потенциала $A_f(t)$ происходит за счет накопления нематериальных активов (intangible capital) $K_f(t)$ сферы фундаментальных исследований:

$$A_f(t) = A_f / (1 + d_f e^{-b_f K_f(t)}),$$

где d_f, b_f, A_f — параметры влияния $K_f(t)$ на $A_f(t)$.

Практический потенциал $A(t)$ формируется в результате инвестиций в прикладные исследования и разработки:

$$A(t) = A_f(t) \left[1 - (1 + qK_a(t))^{-1} \right],$$

где q — фиксированный параметр; $K_a(t)$ — нематериальные активы (intangible capital), представляющие накопленные прикладные знания. С увеличением этих знаний практический потенциал приближается к теоретическому. Здесь для упрощения модели игнорируется, что на практике фундаментальные знания лишь частично трансформируются в прикладные.

В модели величина нематериальных активов фактически отождествляется с накопленным объемом инвестиций в соответствующие исследования.

Выпуск продукции в результате использования практического потенциала данного набора технологий описывает логистическая функция:

$$Y(t) = A(t) / (1 + d_c e^{-b_c K_c(t)}),$$

где $Y(t)$ — выпуск продукции в момент t ; d_c, b_c — фиксированные параметры производственной функции; $K_c(t)$ — используемые для этого выпуска материальные активы (tangible capital).

Наращивание активов разных видов происходит по принципу:

$$K_f(t+1) = K_f(t) + fY(t), \quad K_a(t+1) = K_a(t) + aY(t), \quad K_c(t+1) = rK_c(t) + cY(t),$$

где f — доля выпуска $Y(t)$, направляемая на инвестиции в сферу фундаментальных исследований; a — доля выпуска $Y(t)$, направляемая на инвестиции в сферу прикладных исследований; c — доля выпуска $Y(t)$, направляемая на инвестиции в производственную сферу; r — коэффициент остаточной стоимости материальных активов.

Можно исходить из того, что причиной активизации фундаментальных и прикладных исследований является ухудшение динамики отдачи от использования уже освоенных технологий.

Для простоты изложения допустим, что стоимость нематериальных активы не меняется.

Фаза 1. Описание процесса технологического развития начнем с положения, когда теоретический потенциал исходного набора технологий уже достиг высокого уровня. Другими словами, в начальный момент $t = 0$ уровень нематериальных активов сферы фундаментальных исследований $K_{1f}(0)$ таков, что позволяет существенно снизить капиталоемкость производства за счет накопления прикладных знаний. При исходном уровне этих знаний K_{1a} еще имеются резервы повышения капиталотдачи; $K_{1c}(0)$ — начальный объем материальных активов.

В рамках фазы 1 динамику производства определяют следующие соотношения:

$$\begin{aligned} K_{1f}(t) &= K_{1f}(t-1) + f_1 Y_1(t-1), & A_{1f}(t) &= A_{1f} / (1 + d_{1f} e^{-b_{1f} K_{1f}(t)}), \\ K_{1c}(t) &= r_1 K_{1c}(t-1) + c_1 Y_1(t-1), & K_{1a}(t) &= K_{1a}(t-1) + a_1 Y_1(t-1), \\ A_1(t) &= A_{1f}(t) \left[1 - (1 + q_1 K_{1a}(t))^{-1} \right], & Y_1(t) &= A_1(t) / (1 + d_1 e^{-b_1 K_{1c}(t)}). \end{aligned}$$

Фаза 2 наступает после того, как капиталоемкость производства, использующего данный набор технологий, практически перестает снижаться. В этой ситуации долгосрочные перспективы повышения ресурсоотдачи связаны с активизацией фундаментальных исследований, нацеленных на углубление знаний о новых технологиях широкого назначения, на поиски таких технологий. Обозначим время начала этой фазы через T_2 . После распределения выпуска $Y_1(T_2 - 1)$ все финансирование фундаментальных исследований направляются на изучение новых технологий.

Формирование теоретического потенциала $A_{2f}(t)$ нового набора технологий широкого назначения происходит за счет наращивания нематериальных активов (intangible capital) сферы фундаментальных исследований:

$$A_{2f}(t) = A_{2f} / (1 + d_{2f} e^{-b_{2f} K_{2f}(t)}),$$

где $K_{2f}(T_2) = K_{2f}(T_2 - 1) + f_2 Y_1(T_2 - 1)$. В дальнейшем в рамках фазы 2 имеем $K_{2f}(t+1) = K_{2f}(t) + f_2 Y_1(t)$. Однако продолжает поддерживаться накопление прикладных знаний о старых технологиях: $K_{1a}(t+1) = K_{1a}(t) + a_1 Y_1(t)$. Индексы при a, c, f, q, d, b, K, Y указывают на набор технологий широкого применения.

В рамках фазы 2 продолжают инвестиции в материальные активы производства $Y_1(t)$:

$$K_{1c}(t) = r_1 K_{1c}(t-1) + c_1 Y_1(t-1).$$

Фаза 3. Накопление прикладных знаний о новых технологиях широкого назначения. Инвестиции в эти знания начинаются после достижения некоторого порогового уровня фундаментальных знаний. Допустим, что этот пороговый уровень представляет параметр δ и возможность перехода выявляется в момент $(T_3 - 1)$ при $A_{2f}(T_3 - 1) \geq \delta A_{2f}$. В таком случае фаза 3 начинается с T_3 :

$$K_{2a}(T_3) = a_{2a} Y_1(T_3 - 1), \quad K_{2a}(t) = K_{2a}(t-1) + a_2 Y_1(t-1).$$

Продолжаются инвестиции в фундаментальные исследования новых технологий:

$$K_{2f}(t+1) = K_{2f}(t) + f_2 Y_1(t).$$

Уровень прикладных знаний о новых технологиях следующим образом зависит от инвестиций в нематериальные активы

$$A_2(t) = A_{2f} \left[1 - (1 + q_2 K_{2a}(t))^{-1} \right] / (1 + d_{2f} e^{-b_{2f} K_{2f}(t)}).$$

Для повышения практического потенциала старых технологий $A_1(t)$ продолжают финансироваться прикладные исследования и разработки на основе фундаментальных знаний и по этим технологиям $K_{1a}(t) = K_{1a}(t-1) + a_1 Y_1(t-1)$, а также продолжают инвестиции в материальные активы, воплощающие старые технологии: $K_{1c}(t) = r_1 K_{1c}(t-1) + c_1 Y_1(t-1)$.

Фаза 4 соответствует переходу к радикальным инновациям на основе новых технологий широкого назначения. Переход начинается в момент T_4 , после накопления значительного объема прикладных знаний об этих технологиях:

$$K_{2c}(T_4) = c_{21} Y_1(T_4 - 1), \quad Y_2(t) = A_2(t) / (1 + d_2 e^{-b_2 K_{2c}(t)}).$$

Продолжаются инвестиции в фундаментальные и прикладные исследования по новым технологиям:

$$K_{2f}(t+1) = K_{2f}(t) + f_2 (Y_1(t) + Y_2(t)), \quad K_{2a}(t+1) = K_{2a}(t) + a_2 (Y_1(t) + Y_2(t)).$$

Производство на старой технологической базе не ликвидируется. Накопление материальных активов для исходного набора технологий широкого назначения может как останавливаться, так и продолжаться. На практике инвестиции в ранее освоенные технологии в той или иной мере по разным причинам сохраняются, включая использование продукции этих технологий в качестве ресурсов для новых технологий. Если накопление материальных активов для исходного набора технологий прекращается, то с учетом износа объем этих активов начинает уменьшаться. При этом может сохраняться возможность для медленного и временного увеличения производства продукции $Y_1(t)$ за счет продолжающегося совершенствования методов использования старых технологий.

Фазы 5, 6, 7 по существу повторяют фазы 2, 3, 4.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЛЛЮСТРАТИВНЫХ РАСЧЕТОВ ПО МОДЕЛИ

Численные иллюстративные расчеты по построенной модели приведены в Приложении (см. табл. П). Там указаны значения всех исходных данных проведенных нами расчетов. В расчетах для инвестиций в материальные активы предшествующего набора технологий после фазы 3 использован вариант их полной остановки, а после фазы 6 — вариант продолжения инвестиций. Значение параметра δ , влияющего на смену фаз, принято в этих расчетах на уровне $\delta = 0,5$.

Результаты расчетов позволяют сопоставить полученную таким образом динамику капиталоемкости производства с фактическим изменением капиталоемкости производства в экономике США в 1960–2022 гг. На этот период пришлись две волны Кондратьева. Два раза происходило радикальное обновление технологии производства и в рамках иллюстративных расчетов по модели (рис. 3). Графики фактического изменения капиталоемкости и полученной в результате модельных расчетов траектории капиталоемкости оказались похожими (рис. 4).

Из графиков на рис. 3 и 4б видно, что снижение капиталоемкости приходится на периоды, когда начинает проявляться возрастающая эффективность масштаба производства по новой технологии. При убывающей эффективности масштабов производства меняется и динамика его капиталоемкости. Слом кривой (рис. 4б) при $t = 12$ связан с прекращением инвестиций в старую технологию. Однако при медленном освоении новой технологии снижение капиталоемкости начинается не сразу, при быстром же переходе к новой технологии удается избежать заминок в снижении капиталоемкости производства.

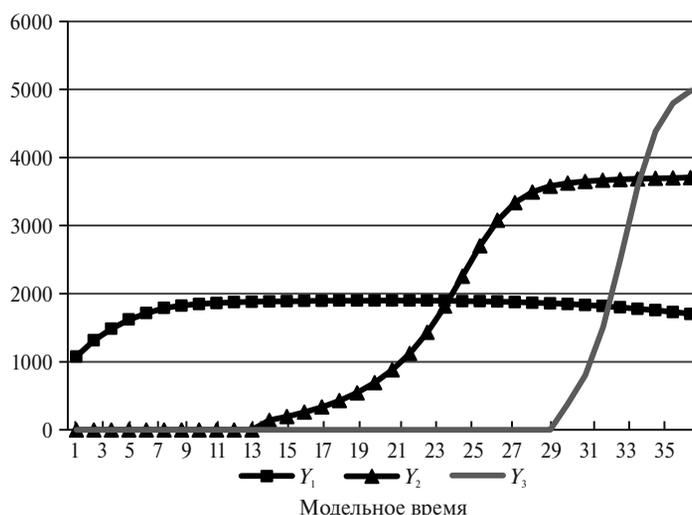


Рис. 3. Графики объемов производства по разным технологиям, усл. ед.

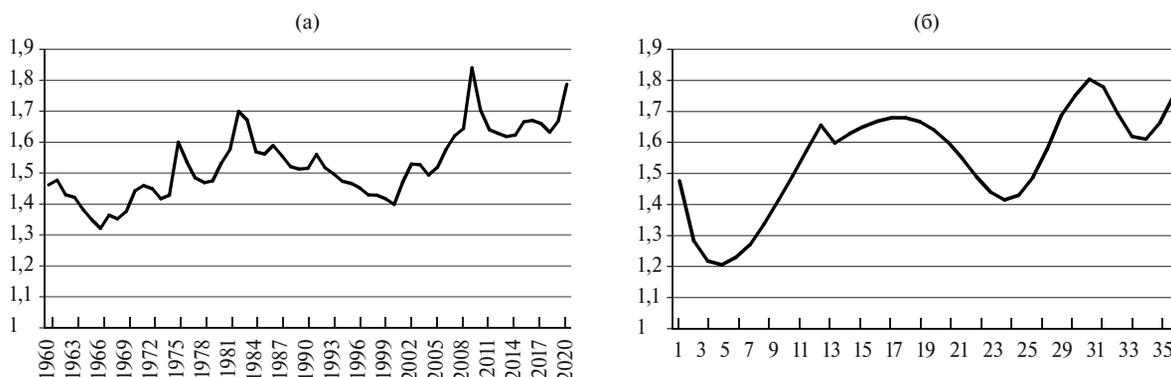


Рис. 4. Графики изменения капиталоемкости: а) в экономике США; б) в модели технологического развития (по результатам иллюстративных расчетов)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование закономерностей изменения капиталоемкости производства, влияющих на нее факторов имеет большое значение для сбалансированного экономического развития страны, для распределения ресурсов между инвестициями в текущее производство и инвестициями в активы, способные, хотя и не сразу, изменить характер и самого производства, и производственных отношений.

Важное свойство представленной модели и выполненных по ней иллюстративных расчетов состоит в том, что смена фаз развития основывается на определенной экономической логике, а не задается экзогенно. Это же можно утверждать и в отношении продолжительности фаз развития. Близость полученной из модели и фактической траектории капиталоемкости позволяет допустить, что заложенная в модель логика экономического развития не далека от реальности.

Воспроизведение выполненных расчетов, но уже на основе фактических данных, представляется весьма сложной задачей, ввиду того что волны технологического развития не просто сменяют друг друга, а сопряжены с технологическими метаморфозами. Разнесение технологий по разным волнам сильно затрудняет то, что часть старых производств после накопления улучшающих инноваций на основе новых технологий широкого назначения радикально меняют свой технологический характер. Так происходит, в частности, при роботизации традиционных отраслей, при смене их базовых технологий (переход на электрическую тягу железнодорожного и автомобильного транспорта). Природа технологий широкого назначения такова, что технологии очередной волны не ограничиваются только взаимодействием между собой, а проникают повсюду. Тем не менее, усилия, направленные на воспроизведение волнообразности технологического развития с помощью более структурированного описания экономической динамики, включая модели переключающегося режима воспроизводства, должны послужить сокращению дистанции между экономической теорией и стилизованными фактами. Представленную в статье динамику капиталоемкости производства можно отнести к таким фактам.

Таблица П. Иллюстративные расчеты по модели технологического обновления производства

Переменная	Исходные данные	Модельное время										
		Фаза 1			Фаза 2				Фаза 3			
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
A_{1f}	2000	2000,00	2000,00	2000,00	2000,00	2000,00	2000,00	2000,00	2000,00	2000,00	2000,00	2000,00
f_1	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
$K_{1f}(t)$	5	25,77	38,92	53,78	53,78	53,78	53,78	53,78	53,78	53,78	53,78	53,78
d_{1f}	5	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00
b_{1f}	0,3	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30
$A_{1f}(t)$	1894,76	1995,62	1999,91	2000,00	2000,00	2000,00	2000,00	2000,00	2000,00	2000,00	2000,00	2000,00
a_1	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
$K_{1a}(t)$	10	51,54	77,84	107,57	139,99	174,31	210,09	246,60	283,58	320,85	358,32	358,32
q_1	0,8	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80
$A_1(t)$	1542,69	1699,68	1751,72	1784,88	1808,90	1839,34	1851,82	1861,96	1870,32	1877,35	1883,36	1883,36
r_1	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98
c_1	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12
$K_{1c}(t)$	1500	1687,44	1811,47	1953,64	2109,11	2272,83	2442,05	2612,30	2781,88	2949,86	3115,72	3115,72
d_1	2500	250,00	250,00	250,00	250,00	250,00	250,00	250,00	250,00	250,00	250,00	250,00
b_1	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004
$Y_1(t)$	1000	1314,74	1486,68	1621,21	1715,89	1788,97	1825,69	1848,57	1863,47	1873,84	1881,54	1881,54
A_{2f}	4000,00				4000,00	4000,00	4000,00	4000,00	4000,00	4000,00	4000,00	4000,00
f_2	0,01				0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
$K_{2f}(t)$					16,21	33,37	51,26	69,52	88,00	106,64	125,38	125,38
d_{2f}	10,00				10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00
b_{2f}	0,030				0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030
$A_{2f}(t)$					559,55	855,68	1270,45	1783,79	2334,35	2840,96	3245,34	3245,34
a_{2f}	0,02									0,02	0,02	0,02
$K_{2a}(t)$										37,27	74,75	74,75
q_2	0,20									0,20	0,20	0,20
$A_2(t)$										1486,49	2065,14	2065,14
K/Y		1,28	1,22	1,21	1,23	1,27	1,34	1,41	1,49	1,57	1,66	1,66

Продолжение таблицы П

Переменная	Модельное время												
	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
A_{1f}	2000,00	2000,00	2000,00	2000,00	2000,00	2000,00	2000,00	2000,00	2000,00	2000,00	2000,00	2000,00	2000,00
f_1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
$K_{1f}(t)$	53,78	53,78	53,78	53,78	53,78	53,78	53,78	53,78	53,78	53,78	53,78	53,78	53,78
d_{1f}	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00
b_{1f}	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30
$A_{1f}(t)$	2000,00	2000,00	2000,00	2000,00	2000,00	2000,00	2000,00	2000,00	2000,00	2000,00	2000,00	2000,00	2000,00
a_1	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
$K_{1d}(t)$	395,95	433,68	471,48	509,34	547,24	585,19	623,16	661,15	699,14	737,11	775,06	812,97	850,82
q_1	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80
$A_{1f}(t)$	1888,57	1892,92	1896,79	1900,25	1903,38	1906,22	1908,82	1911,21	1913,41	1915,45	1917,35	1919,12	1920,77
r_1	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98
c_1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
$K_{1f}(t)$	3053,41	2992,34	2932,49	2873,84	2816,36	2760,04	2704,84	2650,74	2597,72	2545,77	2494,85	2444,96	2396,06
d_1	250,00	250,00	250,00	250,00	250,00	250,00	250,00	250,00	250,00	250,00	250,00	250,00	250,00
b_1	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004
$Y_1(t)$	1886,23	1889,93	1892,98	1895,43	1897,30	1898,61	1899,32	1899,41	1898,83	1897,52	1895,39	1892,35	1888,29
A_{2f}	4000,00	4000,00	4000,00	4000,00	4000,00	4000,00	4000,00	4000,00	4000,00	4000,00	4000,00	4000,00	4000,00
f_2	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
$K_{2f}(t)$	144,19	163,05	181,95	200,88	219,84	238,81	257,80	276,79	295,78	314,77	333,75	352,70	371,62
d_{2f}	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00
b_{2f}	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030
$A_{2f}(t)$	3532,83	3720,61	3836,58	3905,72	3946,06	3969,29	3982,57	3990,12	3994,41	3996,83	3998,21	3998,98	3999,42
a_{2f}	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
K_{2a}	112,38	150,10	187,90	225,76	263,67	301,61	339,59	377,57	415,56	453,54	491,49	529,40	567,24
q_2	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20
$A_{2f}(t)$	2507,71	2832,49	3059,51	3214,44	3320,25	3393,97	3447,07	3486,88	3517,97	3543,18	3564,29	3582,41	3598,30
c_{21}	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
c_{22}	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20
r_2	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98
$K_{2f}(t)$	188,15	401,56	621,90	850,89	1090,80	1344,74	1616,97	1913,28	2241,43	2611,55	3036,15	3528,60	4098,75
d_2	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00
b_2	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
$Y_2(t)$	142,73	196,90	260,64	336,92	430,14	546,34	693,58	882,33	1125,34	1435,41	1818,15	2257,46	2701,69
K/Y	1,60	1,63	1,65	1,67	1,68	1,68	1,67	1,64	1,60	1,55	1,49	1,44	1,41

Продолжение таблицы П

Переменная	Модельное время												
	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	
	Фаза 5						Фаза 7						
A_{1f}	2000,00	2001,00	2002,00	2003,00	2004,00	2005,00	2006,00	2007,00	2008,00	2009,00	2010,00	2011,00	
f_1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
$K_{1f}(t)$	53,78	53,78	53,78	53,78	53,78	53,78	53,78	53,78	53,78	53,78	53,78	53,78	
d_{1f}	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	
b_{1f}	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	
$A_{1f}(t)$	2000,00	2000,00	2000,00	2000,00	2000,00	2000,00	2000,00	2000,00	2000,00	2000,00	2000,00	2000,00	
a_1	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	
$K_{1a}(t)$	888,58	926,25	963,78	1001,15	1038,33	1075,29	1111,98	1148,33	1184,31	1219,90	1255,03	1289,65	
q_1	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	
$A_{1f}(t)$	1922,32	1923,78	1925,15	1926,45	1927,67	1928,82	1927,74	1928,85	1929,90	1930,89	1931,84	1932,73	
r_1	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	
c_1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
$K_{1f}(t)$	2348,14	2301,17	2255,15	2210,05	2165,85	2122,53	2080,08	2038,48	1997,71	1957,75	1918,60	1880,23	
d_1	250,00	250,00	250,00	250,00	250,00	250,00	250,00	250,00	250,00	250,00	250,00	250,00	
b_1	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	
$Y_1(t)$	1883,09	1876,60	1868,68	1859,15	1847,84	1834,58	1817,11	1799,46	1779,30	1756,47	1730,81	1702,23	
A_{2f}	4000,00	4000,00	4000,00	4000,00	4000,00	4000,00	4000,00	4000,00	4000,00	4000,00	4000,00	4000,00	
f_2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
$K_{2f}(t)$	371,62	371,62	371,62	371,62	371,62	371,62	371,62	371,62	371,62	371,62	371,62	371,62	
d_{2f}	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	
b_{2f}	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	
$A_{2f}(t)$	3999,42	3999,42	3999,42	3999,42	3999,42	3999,42	3999,42	3999,42	3999,42	3999,42	3999,42	3999,42	
a_{2f}	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	
$K_{2a}(t)$	605,01	642,67	680,20	717,58	754,76	791,72	828,41	864,75	900,74	936,33	971,45	1006,07	
q_2	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	
$A_{2f}(t)$	3612,42	3624,91	3636,31	3646,76	3656,39	3665,28	3673,51	3681,14	3688,23	3694,84	3701,00	3706,75	
c_{21}	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	
c_{22}	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	

Окончание таблицы П

Переменная	Модельное время												
	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	
	Фаза 5						Фаза 7						
r_2	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	
$K_2(t)$	4745,95	5454,88	6201,31	6963,08	7725,54	8480,70	9224,57	9955,04	10671,42	11373,22	12060,20	12732,20	
d_2	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	
b_2	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	
$Y_2(t)$	3077,71	3339,36	3494,65	3579,04	3624,39	3650,14	3666,28	3677,65	3686,52	3693,99	3700,57	3706,53	
A_{3f}	6000,00	6000,00	6000,00	6000,00	6000,00	6000,00	6000,00	6000,00	6000,00	6000,00	6000,00	6000,00	
f_3	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	
$K_3(t)$	27,02	57,79	91,19	126,13	161,92	198,17	234,67	271,33	308,11	344,97	381,91	418,92	
d_{3f}	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	
b_{3f}	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	
$A_{3y}(t)$	1101,66	2169,13	3639,60	4888,74	5567,51	5846,88	5947,89	5982,55	5994,20	5998,08	5999,37	5999,79	
a_3	0,02			0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	
$K_{3a}(t)$				136,68	208,26	280,75	353,75	427,08	500,63	574,36	648,24	722,25	
q_3	0,20			0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	
$A_3(t)$				3424,26	4134,89	4503,12	4698,77	4817,08	4899,36	4962,71	5014,59	5058,64	
r_3	0,98			0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	
c_{32}	0,10			0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	
c_{33}	0,05			0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	
$K_3(t)$				357,90	4134,89	732,371	1122,78	1542,32	2005,01	2513,34	3051,82	3600,85	
d_3	20,00			20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	
b_3	0,002			0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	
$Y_3(t)$				383,72	4134,89	800,87	1507,29	2515,53	3595,44	4387,07	4800,06	4984,34	
K/Y	1,43	1,49	1,58	1,69	1,75	1,80	1,78	1,69	1,62	1,61	1,66	1,75	

СПИСОКЛИТЕРАТУРЫ/ REFERENCES

- Аганбегян Г.А.** (2023). Инновации в России: от высокого знания и наличия перспективных научных заделов к эффективному социально-экономическому развитию // *Экономическое возрождение России*. № 2. С. 13–26. DOI: 10.37930/1990-9780-2023-2(76)-13-26 [Aganbegyan A.G. (2023). Innovations in Russia: From possessing the higher knowledge and promising scientific groundwork towards effective socio-economic development. *Economic Revival of Russia*, 2, 13–26. DOI: 10.37930/1990-9780-2023-2(76)-13-26 (in Russian).]
- Андрукович П.Ф.** (2023). Модели длинных волн Н.Д. Кондратьева для трех крупных стран Европы // *Экономическая наука современной России*. № 3. С. 47–66. DOI: 10.33293/1609-1442-2023-3(102)-47-66 [Andrukovich P.F. (2023). Kondratiev N.D. long wave models for three large European countries. *Economics of Contemporary Russia*, 3, 47–66. DOI: 10.33293/1609-1442-2023-3(102)-47-66 (in Russian).]
- Глазьев С.Ю.** (1993). Теория долгосрочного технико-экономического развития. М.: ВладДар. [Glazyev S.Yu. (1993). *Theory of long-term technical and economic development*. Moscow: VlaDar (in Russian).]
- Дементьев В.Е.** (2021). Модель интерференции длинных волн экономического развития // *Компьютерные исследования и моделирование*. Т. 13. Вып. 3. С. 649–663. [Dementiev V.E. (2021). The model of interference of long waves of economic development. *Compute Research and Modeling*, 13, 3, 649–663 (in Russian).]
- Дементьев В.Е.** (2023). Обновление технологической базы экономики и реальные процентные ставки // *Журнал Новой экономической ассоциации*. № 3 (60). С. 104–119. DOI: 10.31737/22212264_2023_3_104-119, EDN: LBKSGQ [Dementiev V.E. (2023). Updating the technological base of the economy and real interest rates. *Journal of the New Economic Association*, 3 (60), 104–119. DOI: 10.31737/22212264_2023_3_104-119, EDN: LBKSGQ (in Russian).]
- Лавровский Б.Л., Чуваев А.В.** (2022). О соотношении экономической динамики и нормы накопления: международный опыт // *Проблемы прогнозирования*. № 2 (191). С. 6–16. DOI: 10.47711/0868-6351-191-6-16 [Lavrovskii B.L., Chuvaev A.V. (2022). On the relationship of economic dynamics and accumulation rate: International experience. *Studies on Russian Economic Development*, 2 (191), 6–16 (in Russian); 33, 2, 127–134. DOI: 10.1134/S1075700722020071 (in English).]
- Маевский В.И., Рубинштейн А.А.** (2023). Волны Кондратьева и современная макроэкономика // *Научные труды Вольного экономического общества России*. № 2. С. 87–110. DOI: 10.38197/2072-2060-2023-240-2-87-110 [Maevsky V.I., Rubinstein A.A. (2023). Kondratieff waves and modern macroeconomics. *Scientific Works of the Free Economic Society of Russia*, 2, 87–110. DOI: 10.38197/2072-2060-2023-240-2-87-110 (in Russian).]
- Acemoglu D., Autor D., Dorn D., Hanson G.H., Price B.** (2014). Return of the Solow paradox? IT, productivity, and employment in US manufacturing. *American Economic Review*, 104 (5), 394–399.
- Aghion P., Antonin C., Bunel S., Jaravel X.** (2022). The effects of automation on labor demand: A survey of the recent literature. In: *Robots and AI: A new economic era*. L.Y. Ing, G.M. Grossman (eds.). N.Y.: Routledge, 15–39. DOI: 10.4324/9781003275534-2
- Bas J., Nahuis R.** (2002). A general purpose technology explains the Solow paradox and wage inequality. *Economics Letters*, 74, 2, 243–250.
- Brynjolfsson E., Rock D., Syverson C.** (2019). Artificial intelligence and the modern productivity paradox: A clash of expectations and statistics. In: *The economics of artificial intelligence: An agenda*. Agrawal A., Cans J., Goldfarb A. (eds.). Chicago: University of Chicago Press, 23–60.
- Capello R., Lenzi C.** (2022). Giovanni Perucca the modern Solow paradox. In search for explanations. *Structural Change and Economic Dynamics*, 63, 66–180. DOI: 10.1016/j.strueco.2022.09.013
- Capital productivity* (1996). McKinsey Global Institute. Washington. Available at: <https://www.mckinsey.com/capabilities/operations/our-insights/capital-productivity>
- Derkacz A.J.** (2020). Capital intensity of investments and GDP dynamics. *SSRN Electronic Journal*. DOI:10.2139/ssrn.3639572
- Helpman E., Trajtenberg M.** (1994). A time to sow and a time to reap: Growth based on general purpose technologies. *National Bureau of Economic Research, Working paper 4854*. DOI: 10.3386/w4854
- Ing L.Y., Grossman G.M.** (eds.). (2022). *Robots and AI: A new economic era*. 1st ed. N.Y.: Routledge. DOI: 10.4324/9781003275534
- Kalecki M.** (1954). *Theory of economic dynamics. An essay on cyclical and long-run changes in capitalist economy*. London: Allen & Unwin Ltd. 178 p.
- Solow R.M.** (1987). We'd better watch out. *New York Times Book Review*, 36.

The paradox of capital intensity

© 2024 V.E. Dementiev

V.E. Dementiev,

*Corresponding member of the Russian Academy of Sciences; Central Economics and Mathematics Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia;
e-mail: vedementev@rambler.ru*

Received 22.03.2024

Abstract. Reducing the capital intensity of production makes possible to maintain economic growth at a low rate of capital accumulation. However, the relationship between the development of the knowledge economy and the dynamics of capital intensity is complex. In some periods it is positive, in others it is negative. It is acceptable to analyze the capital intensity paradox by analogy with the productivity paradox (Solow's paradox). To identify how the paradox of capital intensity can be formed, the article builds up mathematical model of updating the technological base of production. The peculiarity of the model is both its multiphase nature and the differentiation of investments in current production, in basic research, and in applied developments. Logistic functions are used to describe the field of basic research and the field of production. Such functions allow us to take into account the existence of a positive scale effect in these areas and the fact that it persists only up to a certain amount of resources used. The model shows not only the alternation of long waves of technological development, but also the overlapping of waves on each other. An important feature of this model is: the change of phases of development is based on a certain economic logic, and is not set exogenously. An illustrative calculation based on the model was performed, as a result of which the trajectory of changes in the capital intensity of production was obtained. The configuration of this trajectory is close to how the capital intensity of production in the US economy really changed in the period 1960–2022. The proposed model demonstrates the connection of the capital intensity paradox with the periodic updating of general-purpose technologies, with the Kondratiev waves generated by these updates.

Keywords: capital intensity of production, capital accumulation, investments in human capital, investments in research and development, general-purpose technologies, Kondratiev waves.

JEL Classification: C63, E22, O11, O51.

UDC: 330.32.

For reference: **Dementiev V.E.** (2024). The paradox of capital intensity. *Economics and Mathematical Methods*, 60, 2, 27–39. DOI: 10.31857/S0424738824020037 (in Russian).

Экономический рост в развитых и развивающихся странах при переходе к возобновляемым источникам энергии

© 2024 г. О.В. Кудрявцева, С.В. Чернявский, А.В. Уткина

О.В. Кудрявцева,

Экономический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва; e-mail: olgakud@mail.ru

С.В. Чернявский,

ЦЭМИ РАН, Москва; e-mail: vols85-85@mail.ru

А.В. Уткина,

Экономический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва; e-mail: kanashkina.a@yandex.ru

Поступила в редакцию 09.03.2023

Исследование проведено при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках проекта № 23-28-00508 «Методология формирования механизмов низкоуглеродного развития российской экономики в новых условиях».

Аннотация. Сегодня экономическое развитие мира неразрывно связано с глобальными экологическими проблемами. В этих условиях актуальным стал поиск решений проблемы без неблагоприятного воздействия на экономический рост. Энергетический переход может неоднозначно влиять на темпы и динамику экономического роста. Цель данной работы — изучить, как динамика объемов инвестиций в возобновляемую энергетику влияет на экономический рост развитых и развивающихся стран, а также проверить гипотезы: 1) для развивающихся стран рост инвестиций в отрасли возобновляемой энергетики стимулирует экономический рост; 2) для развитых стран рост инвестиций в отрасли возобновляемой энергетики затормаживает экономический рост. При увеличении на 1% доли дохода, инвестированной в капитал возобновляемой энергетики, в развитых странах темпы экономического роста понизятся на 0,0001%, в то время как в развивающихся странах — вырастут на 0,0001%. Для развитых стран такое снижение темпов экономического роста можно рассматривать как некую плату за предпочтение будущего состояния окружающей среды перед текущим получением дополнительного выпуска, а для развивающихся стран энергетический переход положительно влияет на темпы экономического роста. Четвертый энергетический переход, основанный на расширении использования возобновляемых источников энергии (ВИЭ) и вытеснении ископаемых видов топлива, является решением глобальных экологических проблем, вызванных эмиссией CO₂ в атмосферу. Такой переход необходим, даже при росте экономических издержек, поскольку без него невозможно устойчивое развитие, как текущего, так и будущих поколений.

Ключевые слова: концепция устойчивого развития, зеленая экономика, традиционная энергетика, возобновляемая энергетика, экономический рост, энергоэффективность.

Классификация JEL: C23, C81, O13, Q42, Q43.

УДК: 332.1.

Для цитирования: **Кудрявцева О.В., Чернявский С.В., Уткина А.В.** (2024). Экономический рост в развитых и развивающихся странах при переходе к возобновляемым источникам энергии // *Экономика и математические методы*. Т. 60. № 2. С. 40–49. DOI: 10.31857/S0424738824020049

Сегодня экономическое развитие стран мира неразрывно связано с глобальными экологическими проблемами. При этом важно помнить, что «удовлетворение потребностей человечества должно осуществляться без ущерба для экосистемы»¹. В связи с этим на конференции РИО+20 в 2012 г. была принята *концепция устойчивого развития*, основанная на принципах зеленой экономики (Клапцов, 2012). Многие цели устойчивого развития до 2030 г., принятые в 2015 г. 193 государствами, необходимы для поиска новой модели экономического развития, предполагающей минимизировать вредное воздействие на экосистему. Такой моделью может стать *концепция зеленой экономики*, основным направлением

¹ «Четвертый энергопереход: риски и вызовы для России» // *Ведомости*. 31 января 2021 г. (<https://vedomosti.ru/opinion/articles/2021...energoperehod>).

которой становится переход от традиционных видов топлива к возобновляемым источникам энергии (ВИЭ).

Таким образом, целью данной работы является выявление влияния динамики объемов инвестиций в возобновляемую энергетику на экономический рост для развитых и развивающихся стран. Для этого необходимо оценить гипотезы:

- 1) для развивающихся стран рост инвестиций в отрасли возобновляемой энергетики стимулирует экономический рост;
- 2) для развитых стран рост инвестиций в отрасли возобновляемой энергетики затормаживает экономический рост.

Эти гипотезы основываются на том, что в развитых странах происходит активное вытеснение финансовых ресурсов из отраслей традиционной энергетики в другие отрасли по причине насыщения энергетического рынка и больших инвестиций в рост энергоэффективности; в развивающихся странах наблюдается рост совокупного потребления энергии без вытеснения традиционных отраслей.

ЧЕТВЕРТЫЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ПЕРЕХОД. ПРИЧИНЫ И ОСОБЕННОСТИ

В последние десятилетия наблюдается активный рост мощностей ВИЭ, а также сокращение потребления энергии, полученной из ископаемых источников. Этот процесс принято считать основной составляющей, так называемого, *энергетического перехода*. Предшествующие энергетические переходы характеризовались последовательной заменой одного углеродного топлива другим (древесина, каменный уголь, нефть и газ). Последний энергопереход нацелен на использование экологически чистых видов топлива, в первую очередь ВИЭ (солнечная энергия, энергия водных потоков, ветер, приливы, геотермальная теплота, биотопливо и др.).

Главной особенностью возобновляемых энергоресурсов является возможность их получения из постоянно действующих или периодически возникающих естественных природных процессов. Основными источниками ВИЭ принято считать энергию ветра, приливов, гидроэнергию, солнечное излучение, биомассу, геотермальную энергию (Tahvonen, Salo, 2001). К невозобновляемым энергоресурсам относят природные запасы ресурсов, которые могут быть использованы человеком для производства энергии (нефть, газ, уголь, ядерное топливо). Добыча, переработка, транспортировка, преобразование в электрическую и тепловую энергию традиционных видов топлива негативно влияет на состояние окружающей среды. Новыми приоритетами энергетической политики становятся сокращение эмиссии парниковых газов, улучшение качества воздуха и переход к низкоуглеродным источникам энергии (Прогноз развития энергетики ..., 2019).

Переход от традиционных источников энергии к ВИЭ в настоящее время является одним из главных способов решения экологических проблем. Добыча и использование ископаемого топлива ведет к загрязнению окружающей среды (локальному загрязнению воздуха и накоплению парниковых газов, ведущему к глобальному изменению климата). «Зеленая» энергия может способствовать минимизации влияния факторов потепления климата.

Особое значение для стимулирования четвертого энергетического перехода с целью предотвращения загрязнения окружающей среды имеют международные соглашения, международные правовые инструменты и механизмы ратификации этих соглашений.

Другим стимулом четвертого энергетического перехода является постепенное снижение доходов производителей углеводородов как следствие международных соглашений и политики некоторых стран, предусматривающих налог на углерод и/или торговлю квотами на эмиссию CO₂ (Башмаков, 2020; Прогноз развития энергетики ..., 2019).

Основной движущей силой четвертого энергетического перехода являются государственная энергетическая политика и развитие технологий (Прогноз развития энергетики ..., 2019). В современных условиях внедрение новых мощностей ВИЭ, как правило, возможно только при государственной поддержке. Другая особенность состоит в том, что соотношение полученной энергии к затраченной (*energy returned on energy invested, EROEI*)² для получения ископаемого топлива

² Отношение количества пригодной к использованию энергии, полученной из определённого источника энергии, к количеству энергии, затраченной на получение этого энергетического ресурса (<http://neftianka.ru/budushhee-energetiki-opredelit-pokazatel-eroei/>).

в современных условиях резко снижается, но современные возобновляемые источники энергии, как правило, имеют еще более низкий EROEI, чем ископаемые виды топлива (Režný, Bureš, 2019).

Эти факты требуют особого внимания со стороны экономистов, экологов и ученых, в связи с тем, что политика, направленная на резкое сокращение потребления ископаемой энергии, может привести к заметному замедлению экономического роста.

ВЛИЯНИЕ ПЕРЕХОДА К ВИЭ НА ЭКОНОМИЧЕСКИЙ РОСТ

Современный энергетический переход может неоднозначно повлиять на темпы и динамику экономического роста стран мира. Он может открыть новые источники экономического роста, например, внедрение ВИЭ будет способствовать созданию новых рынков зеленых технологий и дополнительных рабочих мест, что в конечном итоге будет стимулировать экономический рост (Blazejczak et al., 2014). Также внедрение ВИЭ стимулирует развитие других рынков за счет межотраслевых отношений — таких как поставка промежуточных ресурсов или производственного оборудования (Blazejczak et al., 2014).

При этом многие исследователи считают, что четвертый энергетический переход может негативно повлиять на экономический рост стран. Это может происходить в том числе за счет оттока инвестиций из других отраслей экономики, что приведет к менее эффективному использованию (более высокой стоимости) капитала и общим повышенным затратам для экономики в целом (Blazejczak et al., 2014; Mercure et al., 2019). Переход к декарбонизированной энергетической системе требует значительных вложений в НИОКР в области энергетики, удлинению цепочек поставок и др., что может значительно превысить затраты по сравнению с традиционным сценарием развития.

Подобное вытеснение может наблюдаться и в случае с рабочей силой, но при завершении энергетического перехода, когда низкоуглеродные технологии заменят в достаточной степени высокоуглеродные, процесс вытеснения прекратится и последует восстановление экономического роста за счет повышения производительности и снижения импорта невозобновляемых источников энергии (Mercure et al., 2019).

Также современный переход тесно связан с декарбонизацией энергоемких отраслей промышленности, что может привести к потерям прибылей компаний (например, предприятий черной металлургии) и ограничить их инвестиционную деятельность (Яшалова, Васильцов, Потравный, 2020).

Немаловажно, что четвертый энергетический переход также значительно уменьшит доходы стран-нефтеэкспортеров за счет сокращения соответствующей статьи экспорта из-за падения мирового спроса на невозобновляемые ресурсы. Для России данная проблема, как и в целом перспективы декарбонизации, представляет особую важность при обозначении приоритетов промышленной политики с учетом изменений в мировой экономике за последние несколько лет (Kudryavtseva, Kurdin, 2023; Kudryavtseva, Kurdin, Yakovleva, 2022).

ЭМПИРИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКОНОМИЧЕСКОГО РОСТА

Классической работой, связанной с моделированием экономического роста, является статья (Mankiw, Romer, Weil, 1992), цель которой — эмпирически проверить модель Солоу (Solow, 1956). Эта модель основана на стандартной неоклассической производственной функции с убывающей отдачей от капитала. Предпосылками модели служат экзогенность нормы сбережений и темп роста населения. Различия в устойчивых состояниях разных стран обуславливаются разными нормами сбережений, положительно влияющими на экономический рост, а также разными темпами роста населения, влияющими на него негативно.

Эмпирическая модель (Mankiw, Romer, Weil, 1992) построена на годовых данных Summers–Heston data set³ за период 1960–1985 гг. с помощью метода наименьших квадратов (МНК). Она подтверждает направления влияния этих показателей на логарифм темпа прироста ВВП на человека трудоспособного возраста. Однако эта модель не подтверждает силы этого влияния, что объясняется невключением в оригинальную модель человеческого капитала. Авторы

³Основные страновые социально-экономические показатели (<https://www.bristol.ac.uk/depts/Economics/Growth/summers.htm>).

(Mankiw, Romer, Weil, 1992) вводят человеческий капитал в производственную функцию Кобба–Дугласа, которая принимает вид

$$Y(t) = K(t)^\alpha H(t)^\beta (A(t)L(t))^{1-\alpha-\beta},$$

где Y — выпуск; K — физический капитал; H — человеческий капитал; A — уровень развития технологий; L — труд.

При оценке регрессии, включающей логарифм доли дохода, инвестированной в человеческий капитал, помимо логарифма доли дохода, инвестированной в физический капитал, и логарифма суммы темпов роста населения, темпа технологического прогресса и нормы выбытия капитала, сила и направление влияния оцениваемых регрессоров совпадают с теоретической (Mankiw, Romer, Weil, 1992).

Во многих последующих исследованиях экономического роста модель (Mankiw, Romer, Weil, 1992) принималась в качестве базовой и дополнялась необходимыми переменными. Так, в работе (Brock, Taylor, 2010) авторы объединили модель Солоу с экологической кривой Кузнецца (зависимость состояния окружающей среды от дохода представляет из себя перевернутую U-образную кривую), с экзогенным технологическим прогрессом, показателем технологического прогресса в борьбе с загрязнением окружающей среды и оценивали ее на панельных данных по 173 странам за период 1960–1998 гг. (до Киотского соглашения). Норма сбережений и борьба с загрязнением в модели считались экзогенными. Авторы статьи приводят подробный вывод уравнения регрессии, основанный на модели Солоу и предположениях. В результате зависимыми переменными является логарифм выбросов вредных веществ на душу населения, логарифм нормы сбережений и логарифм суммы темпов роста населения, темпов технологического прогресса и нормы выбытия.

В современных работах по данной теме часто встречается *показатель открытости экономики* как фактор экономического роста и приводится эмпирическое доказательство положительного влияния этого параметра на экономический рост, также основанное на классической модели Солоу (Busse, Koeniger, 2012). Каналами влияния открытости экономики на экономический рост являются «эффективное распределение ресурсов, реализация экономии на масштабе, стимулирование распространения знаний, способствование техническому прогрессу и поощрение конкуренции как на внутреннем, так и на международных рынках, что приводит к оптимизации производственных процессов и разработке новых продуктов» (Busse, Koeniger, 2012). Однако некоторые формы *протекционизма*, например защита зарождающейся отрасли для развития определенных отраслей или секторов или стратегическая торговая политика в ключевых секторах, могут быть полезны для экономического развития.

МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ ЭМПИРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

По аналогии с эмпирическими работами основой для нашего эконометрического исследования является модель (Solow, 1956), которая дополняется включением в классическую производственную функцию Кобба–Дугласа трех типов капитала: капитала возобновляемой энергетики, остального физического капитала и, по аналогии с (Mankiw, Romer, Weil, 1992), — человеческого. Новизна модели состоит во включении в нее прокси-переменной для обозначения капитала в возобновляемой энергетике. Подобное выделение можно найти в теоретических статьях (например, в (Court, Jouvet, Lantz, 2018)), однако такое расширение производственной функции не подвергалось эмпирической проверке.

Таким образом, производственная функция имеет вид

$$Y(t) = K_{green}(t)^\alpha K_{other}(t)^\beta H(t)^\gamma (A(t)L(t))^{1-\alpha-\beta-\gamma}, \quad (1)$$

где Y — выпуск; K_{green} — капитал возобновляемой энергетики; K_{other} — физический капитал за исключением капитала возобновляемой энергетики; H — человеческий капитал; A — уровень развития технологий; L — труд.

Пусть $s_{k_{green}}$ — доля дохода, инвестированная в капитал возобновляемой энергетики; $s_{k_{other}}$ — доля дохода, инвестированная в физический капитал за исключением капитала возобновляемой энергетики; s_h — доля дохода, инвестированная в человеческий капитал. Эволюция экономики описывается уравнениями:

$$\begin{aligned} \dot{k}_{green}(t) &= s_{k_{green}} y(t) - (n + g + \delta) k_{green}(t), \quad \dot{k}_{other}(t) = s_{k_{other}} y(t) - (n + g + \delta) k_{other}(t), \\ \dot{h}(t) &= s_h y(t) - (n + g + \delta) h(t), \end{aligned} \quad (2)$$

где $y = Y / AL$, $k_{green} = K_{green} / AL$, $k_{other} = K_{other} / AL$ и $h = H / AL$ — объемы капитала на единицу эффективного труда; n — темпы прироста населения; g — темпы технологического прогресса, δ — норма выбытия капитала.

Предполагается, что норма выбытия для капитала возобновляемой энергетики, физического капитала за вычетом капитала возобновляемой энергетики и человеческого капитала, по аналогии с моделью (Mankiw, Romer, Weil, 1992), одинаковая. Также предполагается, что $\alpha + \beta + \gamma < 1$, а это соответствует убывающей отдаче от капитала.

В устойчивом состоянии экономика описывается следующими уравнениями:

$$k_{green}^* = \left(s_{k_{green}}^{1-\beta-\gamma} s_{k_{other}}^\beta s_h^\gamma / (n+g+\delta) \right)^{1/(1-\alpha-\beta-\gamma)}, \quad k_{other}^* = \left(s_{k_{green}}^\alpha s_{k_{other}}^{1-\alpha-\gamma} s_h^\gamma / (n+g+\delta) \right)^{1/(1-\alpha-\beta-\gamma)}, \quad (3)$$

$$h^* = \left(s_{k_{green}}^\alpha s_{k_{other}}^\beta s_h^{1-\alpha-\beta} / (n+g+\delta) \right)^{1/(1-\alpha-\beta-\gamma)}.$$

Подставив уравнения (3) в производственную функцию (1) и логарифмировав обе стороны уравнения, получим

$$\ln \left(\frac{Y(t)}{L(t)} \right) = \ln A(0) + gt - \frac{\alpha + \beta + \gamma}{1 - \alpha - \beta - \gamma} \ln(n + g + \delta) + \frac{\alpha}{1 - \alpha - \beta - \gamma} \ln(s_{k_{green}}) + \frac{\beta}{1 - \alpha - \beta - \gamma} \ln(s_{k_{other}}) + \frac{\gamma}{1 - \alpha - \beta - \gamma} \ln(s_h). \quad (4)$$

Это уравнение показывает, как доход на душу населения зависит от роста населения и накопления капитала возобновляемой энергетики, физического капитала за вычетом капитала возобновляемой энергетики и человеческого капитала.

Этот метод позволяет учесть эффекты, отражающие особенности, характерные для каждой страны и не изменяющиеся с течением времени (например, начальный уровень технологического развития). Более того, в оцениваемой модели регрессоры также взяты с лагами в 1–2 года относительно зависимой переменной. Это связано с тем, что объемы инвестиций в различные типы капитала не мгновенно влияют на экономический рост и инвестиционные проекты, как правило, осуществляются в течение нескольких лет.

В качестве контрольной переменной в модель включен показатель открытости экономики (по аналогии с показателями из статей (Busse, Koeniger, 2012; Fetahi-Vehapi, Sadiku, Petkovski, 2015)). Такой регрессор часто встречается в таких эмпирических моделях, оценивающих влияние интересующих показателей на экономический рост, как государственный долг, тип монетарной политики и др.

Итак, окончательно модель выглядит следующим образом:

$$\ln \left(\frac{Y_{it}}{L_{it}} \right) = \beta_0 + \beta_1 \ln \left(\frac{Y_{it-1}}{L_{it-1}} \right) + \ln \left(\frac{I_{green\ it-2}}{GDP_{it-2}} \right) + \ln \left(\frac{I_{other\ it-2}}{GDP_{it-2}} \right) + \ln(HC_{it-1}) + \ln(n_{it} + g + \delta) + \ln(Open_{it-2}) + a_i + \varepsilon_{it}, \quad (5)$$

где Y_{it} / L_{it} — выпуск на единицу рабочей силы; Y_{it-1} / L_{it-1} — первый лаг этого показателя; $I_{green\ it-2} / GDP_{it-2}$ — доля дохода, инвестированная в капитал возобновляемой энергетики (второй лаг); $I_{other\ it-2} / GDP_{it-2}$ — доля дохода, инвестированная в физический капитал за исключением капитала возобновляемой энергетики (второй лаг); HC_{it-1} — доля дохода, инвестированная в человеческий капитал (первый лаг); n_{it} — темпы прироста населения; g — темпы технологического прогресса; δ — норма выбытия капитала; $Open_{it-2}$ — открытость экономики (второй лаг); a_i — постоянные во времени страновые эффекты; ε_{it} — идиосинкратические шоки.

Рассматриваемая модель позволяет выяснить, преобладает ли вытеснение рабочей силы и инвестиций из других, не относящихся к возобновляемой энергетике отраслей экономики, что понизит эффективность использования капитала, или, напротив, рост капитала возобновляемой энергетики будет способствовать созданию новых рынков, что создаст дополнительные рабочие места, и стимулировать развитие других рынков за счет межотраслевых отношений.

Кроме этого, в развитых странах может происходить активное вытеснение капитала из других отраслей в результате насыщения энергетического рынка и больших инвестиций в рост

энергоэффективности, в то время как в развивающихся странах будет наблюдаться рост совокупного потребления энергии без вытеснения традиционных отраслей.

Выбор данных, используемых для оценки модели с целью проверки гипотез, будет приведен в следующем разделе.

ВЫБОР ДАННЫХ

Приведенная выше модель оценивается на основе годовых панельных данных из баз Bloomberg⁴ и World Bank Development Indicators⁵ за 2004–2018 гг. для выборок из 20 развитых и 13 развивающихся стран (табл. 1).

Таблица 1. Список стран, включенных в соответствующие выборки

Развитые страны		Развивающиеся страны	
Код страны	Страна	Код страны	Страна
AUS	Австралия	BRA	Бразилия
AUT	Австрия	CHL	Чили
BEL	Бельгия	CHN	Китай
CAN	Канада	IDN	Индонезия
DEU	Германия	IND	Индия
DNK	Дания	KOR	Южная Корея
ESP	Испания	MEX	Мексика
FIN	Финляндия	MYS	Малайзия
FRA	Франция	PER	Перу
GBR	Великобритания	PHL	Филиппины
GRC	Греция	SGP	Сингапур
HUN	Венгрия	THA	Таиланд
ITA	Италия	VNM	Вьетнам
JPN	Япония		
NLD	Нидерланды		
NZL	Новая Зеландия		
POL	Польша		
PRT	Португалия		
SWE	Швеция		
USA	США		

Источник: составлено авторами.

Выбор такого короткого промежутка времени (5 лет) обусловлен в первую очередь наличием данных для прокси-переменной доли дохода, инвестированной в капитал возобновляемой энергетики. Статистика по этому показателю имеется также для небольшой части стран. Выбранный нами обобщенный метод моментов успешно применяется для работы с короткими временными рядами и относительно большой кросс-секцией.

Разделение выборки стран на развитые и развивающиеся помогает смягчить проблему гетерогенности, имея при этом достаточное для построения регрессии число наблюдений. Набор данных, используемых для модели, приведен в табл. 2.

Для определения экономического роста использованы данные реального ВВП в ценах 2010 г., а также числа людей в возрасте от 15 лет — сюда вошли люди, которые в настоящее время работают, и люди, которые не имеют работы, но ищут ее. Для очищения временных рядов от циклических колебаний с целью выделения потенциального выпуска использован фильтр Ходрика–Прескотта. Это специальный метод, позволяющий сглаживать временные ряды для выделения трендовой составляющей и устранения из них циклической компоненты.

⁴ <https://www.bloomberg.com/graphics/climate-change-data-green/investment.html>

⁵ <https://databank.worldbank.org/source/world-development-indicators>

Таблица 2. Данные, используемые в модели

Переменная	Показатель	Данные	Источник
Y_{it} / L_{it}	Отношение выпуска к единице рабочей силы (экономический рост)	GDP (constant 2010 US\$), Labor force, Total	World Bank Development Indicators
$I_{green\ it-2} / GDP_{it-2}$	Доля дохода, инвестированная в капитал возобновляемой энергетики	Renewable investment (current US\$), GDP (current US\$)	Bloomberg, World Bank Development Indicators
$I_{other\ it-2} / GDP_{it-2}$	Доля дохода, инвестированная в физический капитал, за исключением капитала возобновляемой энергетики	Gross savings (% GDP), Renewable investment (current US\$), GDP (current US\$)	Bloomberg, World Bank Development Indicators
HC_{it-1}	Доля дохода, инвестированная в человеческий капитал	School enrollment, secondary (% gross)	World Bank Development Indicators
n_{it}	Темпы прироста населения	Labor force, total	World Bank Development Indicators
$Open_{it-2}$	Открытость экономики	Trade (%GDP)	World Bank Development Indicators

Источник: составлено авторами.

По аналогии с моделью (Mankiw, Romer, Weil, 1992), в которой в качестве прокси для нормы сбережения используется доля реальных инвестиций в реальном ВВП, в нашей работе доля дохода, инвестированная в капитал возобновляемой энергетики, рассчитывается как доля инвестиций в возобновляемую энергетику к ВВП в том же периоде. Показатель включается в модель со вторым лагом, что обусловлено сроками реализации инвестиционных проектов.

Доля дохода, инвестированная в физический капитал за исключением капитала возобновляемой энергетики, находится из нормы сбережений за вычетом доли инвестиций в возобновляемую энергетику к ВВП. Регрессор также включается со вторым лагом.

В качестве прокси для переменной доли дохода, инвестированного в человеческий капитал, используется показатель отношения общего числа учащихся в средней школе, независимо от возраста, к численности возрастной группы, официально соответствующей указанному уровню образования. Показатель, отражающий охват среднего образования, был выбран в соответствии с работами (Mankiw, Romer, Weil, 1992; Busse, Koeniger, 2012), в которых в качестве прокси был взят процент населения трудоспособного возраста, учащегося в средней школе. Такой выбор показателя несовершенен, так как не учитывает других составляющих человеческого капитала, например инвестиции в здоровье или в другие ступени образования, однако его общая динамика должна соответствовать динамике инвестиций в человеческий капитал.

Показатель темпов прироста населения отражает динамику численности населения в возрасте от 15 лет, представляющих собой рабочую силу. Он включается в модель без лага, поскольку влияет на темп экономического роста в тот же период.

Темпы технологического прогресса, а также норма выбытия капитала считаются постоянными во времени и одинаковыми для всех стран, согласно (Mankiw, Romer, Weil, 1992). В работах (Mankiw, Romer, Weil, 1992; Busse, Koeniger, 2012) сумма этих показателей оценивается как 0,05, в то время как в большинстве других исследований темпы технологического роста и норма выбытия капитала не учитываются при моделировании. Для расчета регрессора $\ln(n_{it} + g + \delta)$ сумма темпов технологического прогресса и нормы выбытия капитала также принимается равной 0,05.

Открытость экономики, в соответствии с работой (Fetahi-Vehapi, Sadiku, Petkovski, 2015), рассчитывается как сумма экспорта и импорта, деленная на ВВП.

Далее приводится оценка модели (5) на данных, описанных в данном разделе. Выделение тренда динамики ВВП при помощи фильтра Ходрика–Прескотта и предварительная обработка данных проведены в среде программирования RStudio. Уравнение регрессии (5) оценивается через метод обобщенных моментов (GMM) в эконометрическом пакете EViews.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ВЫВОДЫ

Согласно результатам моделирования при увеличении на 1% доли дохода, инвестированной в капитал возобновляемой энергетики, в развитых странах темпы экономического роста понизятся на 0,0001%, а в развивающихся странах — вырастут на 0,0001%. Оценки значимы на уровнях 1 и 10%

Таблица 3. Результаты оценки уравнения (5) с помощью метода GMM на годовых панельных данных за 2004–2018 гг. на выборках 20 развитых и 13 развивающихся стран (зависимая переменная: выпуск на единицу рабочей силы (Y_{it} / L_{it}))

Регрессор	Развитые страны	Развивающиеся страны
$\ln(Y_{it-1} / L_{it-1})$ — лаг зависимой переменной	0,99*** (0,0022)	0,97*** (0,005)
$\ln(I_{green\ it-2} / GDP_{it-2})$ — доля дохода, инвестированная в капитал возобновляемой энергетики	-0,0001*** (0,0000)	0,0001* (0,0000)
$\ln(I_{other\ it-2} / GDP_{it-2})$ — доля дохода, инвестированная в физический капитал за исключением капитала возобновляемой энергетики	0,005*** (0,0003)	0,008*** (0,0028)
$\ln(HC_{it-1})$ — доля дохода, инвестированная в человеческий капитал	-0,0005 (0,0042)	0,02** (0,0076)
$\ln(n_t + g + \delta)$ — сумма темпов прироста населения, темпов технологического прогресса и нормы выбытия капитала	-0,0006* (0,0003)	-0,002** (0,0008)
Открытость экономики (для развитых стран $\ln(Open_{it-2})$, для развивающихся стран $\ln(Open_{it-1})$)	-0,005*** (0,0008)	-0,003*** (0,0008)
Страновые эффекты	Да	Да
Число наблюдений	216	108

Примечание. В скобках указаны робастные стандартные ошибки. Символами «*», «**», «***» отмечены оценки, значимые на уровне 10, 5 и 1% соответственно.

Источник: составлено авторами.

соответственно. Небольшая величина влияния объясняется тем, что по-прежнему потребление возобновляемой энергии занимает небольшую долю в мировом энергобалансе, и, вероятно, в дальнейшем это влияние станет более значительным (табл. 3).

Получившиеся знаки оценок при регрессорах долей дохода, инвестированных в капитал возобновляемой энергетики, для развитых и развивающихся стран разнонаправлены. Для развитых стран это явление можно объяснить тем, что в этих странах оптимум капитала почти достигнут, а энергетический рынок насыщен. Таким образом, переход на потребление возобновляемых энергоресурсов лишь меняет структуру энергобаланса, не внося вклада в рост совокупного выпуска энергии. Рост возобновляемой энергетики сопровождается пропорциональным сворачиванием уже имеющихся предприятий, добывающих ископаемые ресурсы и работающих на ископаемом топливе. Особенно это касается угля как источника энергии с наибольшими вредными выбросами в атмосферу. Этот процесс дополняется затратами на структурные преобразования, что выражено в больших объемах инвестиций в возобновляемую энергетику. Так происходит вытеснение капитала из других отраслей экономики, особенно этот процесс выражен в отраслях, традиционно добывающих и использующих ископаемое топливо. Для развивающихся стран, напротив, реализация инвестиционных проектов в области ВИЭ способствует росту совокупного выпуска энергетической отрасли, дополнительно стимулируя развитие других рынков, с одной стороны — через спрос на материалы для строительства новых мощностей ВИЭ, а с другой — через предложение дополнительных объемов энергии. Такой процесс стимулирует создание новых рабочих мест, что положительно стимулирует экономический рост.

Тем не менее, в теоретических моделях, рассматривающих влияние энергетического перехода на экономический рост, отмечается, что по завершению энергетического перехода *темпы экономического роста восстановятся*, когда потребление ВИЭ в достаточном объеме заместит потребление ископаемых энергоресурсов (Tahvonon, Salo, 2001). Более того, так как большинство стран находится на ранней стадии четвертого энергетического перехода, это создает трудности в оценке его влияния на окружающую среду на текущий момент времени, поэтому такой эффект не учитывается в модели. Однако оценку регрессии при показателе доли дохода, инвестированной в капитал возобновляемой энергетики, для развитых стран можно интерпретировать как некую плату за предпочтение будущего состояния окружающей среды вместо текущего получения дополнительного выпуска.

Оценки коэффициентов при доле дохода, инвестированной в физический капитал — за исключением капитала ВИЭ, — для обеих выборок значимы и положительны, что соответствует результатам, полученным (Mankiw, Romer, Weil, 1992) и др.

Доля дохода, инвестированная в человеческий капитал, оказывается значимой и положительной лишь для развивающихся стран, причем для данной выборки этот показатель значимо влияет на экономический рост. Такие результаты можно объяснить выбором прокси для этого показателя. Вероятно, в развивающихся странах среднее образование получает большая часть населения, поэтому вариация этого показателя мала. В развивающихся странах среднее образование является большим стимулом развития человеческого капитала.

Оценка коэффициента при темпах прироста населения, как и в результатах, полученных (Mankiw, Romer, Weil, 1992), значимая и отрицательная, так как подушевой объем капитала обратно пропорционален увеличению численности населения.

Однако оценки при показателе открытости экономики для обеих выборок получились значимыми и отрицательными, что расходится с результатами (Busse, Koeniger, 2012; Fetahi-Vehapi, Sadiku, Petkovski, 2015). Для развивающихся стран это можно объяснить необходимостью в протекционистской политике с целью развития собственных отраслей производства.

Таким образом, четвертый энергетический переход, связанный с расширением использования ВИЭ и вытеснением ископаемых видов топлива из энергобаланса, является естественным решением экологических проблем, вызванных эмиссией вредных веществ в атмосферу. Стоит учитывать, что это требует больших объемов инвестиций как в развитие технологий для удешевления процесса получения зеленой энергии, так и, непосредственно, в строительство новых мощностей ВИЭ.

Такой процесс неоднозначно может влиять на экономический рост. В работе были выделены четыре канала, через которые может осуществляться это влияние, а именно — занятости, торгового баланса, отраслевой, а также ценовой. Приведенные каналы упоминаются в теоретической литературе, исследующей взаимосвязь энергетических переходов с экономическим ростом, однако отсутствуют их полноценные эмпирические исследования. В эконометрических статьях по данной проблематике, как правило, в качестве исследуемой переменной берется совокупный выпуск, а не экономический рост, а в качестве факторов — динамика потребления возобновляемой энергии. Результаты этих моделей разнятся в зависимости от выборки и периода наблюдения. Также это может происходить за счет того, что динамика ВВП учитывает циклические колебания.

Главным дополнением модели является выделение нового типа капитала — капитала ВИЭ. Это позволило эконометрически оценить регрессию, в которой зависимой переменной является экономический рост, а независимой — доля дохода, направляемая на инвестиции в возобновляемую энергетику.

Эта регрессия оценена при помощи метода обобщенных моментов на основе годовых панельных данных для двух выборок из 20 развитых и 13 развивающихся стран за 2004–2018 гг. Оценки коэффициентов при интересующих регрессорах подтверждают следующие гипотезы:

- 1) в развивающихся странах рост инвестиций в капитал возобновляемой энергетики стимулирует экономический рост;
- 2) в развитых странах рост инвестиций в капитал возобновляемой энергетики тормозит экономический рост.

При увеличении на 1% доли дохода, инвестированной в капитал возобновляемой энергетики, в развитых странах темпы экономического роста понизятся на 0,0001%, в то время как в развивающихся странах — вырастут на такую же величину. Это связано с тем, что в развитых экономиках внедрение зеленых инвестиций требует отказа от уже используемого капитала за счет насыщения энергетического рынка, поэтому на начальном этапе энергетического перехода эффект увеличения доли зеленых инвестиций в ВВП негативный, т.е. превалирует замещение через канал занятости и отраслевой. Однако оценку регрессии при показателе доли дохода, инвестированной в капитал возобновляемой энергетики, для развитых стран можно рассматривать как некую плату за предпочтение будущего состояния окружающей среды перед текущим получением дополнительного выпуска. Для развивающихся стран энергетический переход положительно влияет на экономический рост через те же каналы. Реализация инвестиционных проектов в области возобновляемой энергетики в этих странах способствует росту совокупного выпуска энергетической отрасли, дополнительно стимулируя другие рынки и создавая новые рабочие места.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

- Башмаков И.А.** (2020). Мониторинг применения низкоуглеродных технологий в России: возможности для ускорения и риски отставания. М.: ЦЭНЭФ. 261 с. Режим доступа: <http://www.cenef.ru/file/Report%202020.pdf> [**Bashmakov I.A.** (2020). *Monitoring the application of low-carbon technologies in Russia: Opportunities*

for acceleration and risks of falling behind. Moscow: Center for Energy Efficiency. 261 p. Available at: <http://www.cenef.ru/file/Report%202020.pdf> (in Russian).]

Клапцов В.М. (2012). Итоги Саммита «РИО+20» // *Бюллетень Национального комитета по исследованию БРИКС*. № 5. Спецвыпуск. Режим доступа: https://www.nkibrics.ru/system/asset_bulletins/data/53cf/aeea/676c/7665/0017/0000/original/bulleten-brics-5.pdf?1406119658 [**Клaптoв В.М.** (2012). RIO+20 Summit Results. *Center for Economic Research, Russia's Institute for Strategic Studies (RISS)*, 29.06.2012, Special Issue. Available at: https://www.nkibrics.ru/system/asset_bulletins/data/53cf/aeea/676c/7665/0017/0000/original/bulleten-brics-5.pdf?1406119658 (in Russian).]

Прогноз развития энергетики мира и России (2019). Под ред. А.А. Макарова, Т.А. Митровой, В.А. Кулагина. М.: ИНЭИ РАН, Московская школа управления СКОЛКОВО. 210 с. ISBN: 978-5-91438-028-8. Режим доступа: https://energy.skolkovo.ru/downloads/documents/SEneC/Research/SKOLKOVO_EneC_Forecast_2019_Rus.pdf [*Forecast of development of the world and Russian energy* (2019). A.A. Makarov, T.A. Mitrova, V.A. Kulagin (eds.). Moscow: Institute for Energy Studies, Russian Academy of Sciences, Moscow School of Management Skolkovo. 210 p. ISBN: 978-5-91438-028-8 Available at: https://energy.skolkovo.ru/downloads/documents/SEneC/Research/SKOLKOVO_EneC_Forecast_2019_Rus.pdf (in Russian).]

Яшалова Н.Н., Васильцов В.С., Потравный И.М. (2020). Декарбонизация черной металлургии: цели и инструменты регулирования // *Черные металлы*. № 8. С. 70–75. [**Yashalova N.N., Vasil'tsov V.S., Potravny I.M.** (2020). Decarbonization of ferrous metallurgy: Goals and regulation tools. *Chernye Metally*, 8, 70–75 (in Russian).]

Economic growth in developed and developing countries in the context of the transition to renewable energy sources

© 2024 O.V. Kudryavtseva, S.V. Chernyavskiy, A.V. Utkina

O.V. Kudryavtseva,

Lomonosov Moscow State University (MSU), Moscow, Russia; e-mail: olgakud@mail.ru

S.V. Chernyavskiy,

Central Economics and Mathematics Institute, Russian Academy of Sciences (CEMI RAS), Moscow, Russia; e-mail: vols85-85@mail.ru

A.V. Utkina,

Lomonosov Moscow State University (MSU), Moscow, Russia; e-mail: kanashkina.a@yandex.ru

Received 09.03.2023

The research was funded by the Russian Science Foundation within the project 23-28-00508 “Methodology for the elaboration of mechanisms for low-carbon development of Russia’s economy in new circumstances”.

Abstract. Today, economic development is inseparably linked with global environmental problems. So, the search for their solutions without adverse influence on economic growth became relevant. The energy transition can ambiguously affect the pace and dynamics of economic growth. The purpose of this work is to identify the influence of the dynamics of investment in renewable energy on economic growth for groups of developed and developing countries and verification of the following hypotheses: for developing countries, the growth of investments in the renewable energy stimulates economic growth. For developed countries, the growth of investments in the renewable energy inhibits economic growth. Research results: with an increase in the share of income invested in the capital of renewable energy by 1% in developed countries the rate of economic growth will decrease by 0.0001%; while in developing countries — will increase by 0.0001%. The indicated reduction in the rate of economic growth for developed countries can be considered as a “payment” for the preference of the future state of ecology before the current receipt of additional release. As for developing countries, the energy transition positively affects the pace of economic growth. The fourth energy transition is a solution for global environmental problems caused by the CO₂ emissions. The fourth energy transition based on the expansion of renewable energy sources and the displacement of fossil fuel is necessary since it is important for sustainable development of current and future generations.

Keywords: the concept of sustainable development, green economy, traditional energy, renewable energy, economic growth, energy efficiency.

JEL Classification: C23, C81, O13, Q42, Q43.

UDC: 332.1.

For reference: **Kudryavtseva O.V., Chernyavskiy S.V., Utkina A.V.** (2024). Economic growth in developed and developing countries in the context of the transition to renewable energy sources. *Economics and Mathematical Methods*, 60, 2, 40–49. DOI: 10.31857/S0424738824020049 (in Russian).

НАРОДНОХОЗЯЙСТВЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ

Моделирование пенсионных доходов и расходов на основе уравнения Ферхюльста и полиномиальной регрессии с демографическими прогнозами

© 2024 г. С. Со, Е.В. Костырин

С. Со,

МГТУ имени Н.Э. Баумана (НИУ), Москва; e-mail: sisuo1997@gmail.com

Е.В. Костырин,

МГТУ имени Н.Э. Баумана (НИУ), Москва; e-mail: kostyrinev@bmstu.ru

Поступила в редакцию 01.02.2023

Аннотация. Для расчета коэффициента демографической нагрузки в данной работе осуществлено прогнозирование численности населения России трудоспособного возраста с помощью уравнения полиномиальной регрессии четвертой степени с точностью 0,227% и прогнозирование численности населения старше трудоспособного возраста с помощью уравнения Ферхюльста (точность прогнозирования 1,084%) на период с 2023 по 2031 г. (9 лет). Разработана экономико-математическая модель для расчета пенсионных доходов и расходов граждан при внедрении индивидуальных (персонифицированных) пенсионных счетов граждан, учитывающая прогнозные значения коэффициента демографической нагрузки, и осуществлен стресс-анализ модели на основе оценки влияния ставки пенсионных взносов, среднемесячной заработной платы, средней ставки инвестиционного дохода по операциям с пенсионными средствами граждан (нормы доходности) и темпов роста заработной платы, при которых обеспечивается сбалансированность пенсионных поступлений и расходов на пенсию граждан. Практическая реализация разработанной экономико-математической модели показала, что минимальное значение нормы доходности, при котором обеспечивается сбалансированность пенсионных поступлений и расходов на пенсию граждан, равно 1,408%; минимальная среднемесячная заработная плата составляет 22 949,39 руб.; ставка взносов в СФР на пенсионное обеспечение оценивается в размере 18,813%.

Ключевые слова: уравнение Ферхюльста, полиномиальная регрессия, численность населения, коэффициент демографической нагрузки, ставка пенсионных взносов, заработная плата, пенсия, персонифицированный пенсионный счет, норма доходности.

Классификация JEL: C53, C63, J11, J26.

УДК: 336.233.2, 369.542.2, 314.93.

Для цитирования: **Со С., Костырин Е.В.** (2024). Моделирование пенсионных доходов и расходов на основе уравнения Ферхюльста и полиномиальной регрессии с демографическими прогнозами // *Экономика и математические методы*. Т. 60. № 2. С. 50–66. DOI: 10.31857/S0424738824020054

ВВЕДЕНИЕ

Статистические данные показывают, что старение населения России еще больше углубилось. И Россия будет продолжать сталкиваться с давлением на долгосрочное сбалансированное развитие структуры населения в течение определенного периода времени в будущем. Население мира также стареет ускоренными темпами. К 2050 г. доля мирового населения в возрасте 65 лет и старше увеличится до 16%. Поэтому вопрос о том, как создать эффективную систему пенсионного обеспечения, чтобы справиться с наступлением пика старения, стал в центре внимания всех стран мира¹.

В результате постоянно низкого уровня рождаемости и общего увеличения продолжительности жизни возрастная структура населения смещается в сторону старших возрастов, в результате чего коэффициент демографической нагрузки (КДН) растет. КДН отражает демографическую структуру старения общества. Чем выше коэффициент, тем тяжелее нагрузка на взрослое население

¹ Отчет «World Population Prospects 2019: Highlights». Организация Объединенных Наций. Департамент по экономическим и социальным вопросам (<https://www.un.org/development/desa/publications/world-population-prospects-2019-highlights.html>).

и тем более сильное негативное влияние она окажет на долгосрочное экономическое и социальное развитие страны. Поэтому изучение КДН актуально для использования человеческих ресурсов и стабильности социального обеспечения. Количественное исследование таких параметров, как норма прибыли, темпы роста заработной платы, минимальный размер заработной платы, ставка пенсионных взносов и т.д., направленное на решение проблемы дисбаланса между пенсионными доходами и расходами пенсионного фонда, может сыграть положительную роль в снижении давления на баланс его средств.

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Проблема дефицита средств пенсионного фонда может быть смягчена или решена путем корректировки таких параметров, как ставки взносов, минимальный размер заработной платы и возраст выхода на пенсию.

В контексте меняющейся демографической ситуации и макроэкономической среды параметры, задействованные при формировании системы пенсионного страхования, в том числе ставки взносов в фонд, необходимо периодически корректировать, чтобы обеспечить долгосрочную стабильность системы. Так, авторы работы (Holzmann, Palmer, Reform, 2006) утверждают, что такой параметр пенсионной системы, как ставка взносов, необходимо периодически корректировать, чтобы обеспечить долгосрочную стабильность системы в меняющихся демографических и макроэкономических условиях.

В работе (Borgschulze, Heeryung, 2018) авторы изучают влияние минимальной заработной платы на выход на пенсию в США, где получение более высокой минимальной заработной платы может задержать обращение в службу социального обеспечения для получения пенсии.

В дополнение к этому многие ученые отмечают важное влияние ожидаемой продолжительности жизни населения на принятие решений о пенсионном возрасте, и в соответствующей литературе обычно делается вывод о том, что оптимальный пенсионный возраст увеличивается с ростом ожидаемой продолжительности жизни (Sánchez-Romero, Prskawetz, 2016; Bloom, Canning, Moore, 2014).

В (Cai, Zhu, Han, 2017) авторы отмечают, что оптимальное число лет работы для индивидуума увеличивается с ростом продолжительности жизни, разработав анализ модели жизненного цикла.

В работе (Duan, Gao, Li, 2022) изучался оптимальный возраст выхода на пенсию на основе функции полезности и показано, что такие факторы, как пол, предпочтение досуга, возраст начала трудовой деятельности и индивидуальная ставка взноса в пенсионное страхование, влияют на оптимальный возраст выхода на пенсию работников.

Из-за сложности моделей управления доходами и расходами пенсионных фондов ученые в настоящее время делают предположения при построении моделей, которые могут не полностью отражать реальную ситуацию. Кроме того, некоторые текущие исследования не полностью учитывают совместное влияние заработной платы, сбережений и других факторов, и модель не является достаточно полной.

Поэтому, основываясь на вышеприведенных исследованиях, в данной работе в модель баланса доходов и расходов Пенсионного фонда Российской Федерации вводятся показатели нормы сбережений, размера заработной платы и пенсий, включая базовые пенсии и субсидии из государственного бюджета, что еще больше расширяет возможности модели и приближает ее к отражению реальной ситуации. Кроме того, в данной работе в модель на основе уравнения Ферхюльста и полиномиальной регрессии вводится будущая численность трудоспособного населения и численность пенсионеров, что делает результаты модели более точными и по своей сути отражает меняющуюся тенденцию уровня старения.

ПРОГНОЗ ПРИРОСТА НАСЕЛЕНИЯ РОССИИ НА ОСНОВЕ УРАВНЕНИЯ ФЕРХЮЛЬСТА

Еще в XVIII в. Томас Мальтус предположил, что «на протяжении большей части существования человечества рост его численности на каждый данный момент времени был ограничен потолком несущей способности земли, обусловленным наблюдаемым в данный момент времени уровнем развития жизнеобеспечивающих технологий» (Malthus, 1978). Мальтузианская модель роста,

в литературе называемая также моделью Мальтуса, устанавливает темп прироста населения a как константу, так что численность населения $P(t)$ растет экспоненциально. Мальтузианские модели выглядят следующим образом:

$$P(t) = P_0 e^{a(t-t_0)}, \quad (1)$$

где $P(t)$ — размер популяции в момент времени t , человек; $P_0 = P(0)$ — исходная численность населения, человек; a — темп прироста населения, годы; t — время, годы. Эта модель также может быть выражена в виде дифференциального уравнения:

$$dP(t)/dt = aP(t). \quad (2)$$

В 1840 г. бельгийский математик Ферхюльст изменил модель Мальтуса. Он утверждал, что «население не может расти сверх максимальной экологической емкости M , определяемой его географической средой». Это привело к появлению логистической модели. На начальных этапах функция растет примерно экспоненциально; затем рост замедляется по мере насыщения; и, наконец, рост прекращается, когда функция достигает зрелости (Verhulst, 1945).

Уравнение Ферхюльста представлено дифференциальным уравнением

$$dP(t)/dt = aP(t)(1 - P(t)/M), \quad (3)$$

где M — поддерживающая емкость среды, т.е. максимально возможная численность популяции, человек. Решая дифференциальное уравнение (3) с начальным условием $P(t_0) = P_0$, получаем:

$$P(t) = M / (1 + ce^{-a(t-t_0)}), \quad (4)$$

$$c = (M - P_0) / P_0, \quad (5)$$

где c — константа. После упрощения имеем

$$P(t) = M / (1 + e^{-a(t-t')}), \quad (6)$$

где t' — год с наибольшим изменением численности населения — год, в который достигается половина емкости среды.

Согласно международным критериям население считается «старым», если доля людей в возрастах 65 лет и более во всем населении превышает 7%. В настоящее время каждый седьмой россиянин, т.е. 15,8% (на начало 2020 г. — 15,5%) жителей страны, находится в возрасте 65 лет и выше.

Поскольку данные с 2014 г. включают численность населения Республики Крым, для устранения ошибки, вызванной этим изменением, расчет разделен на два периода 2005–2013 и 2015–2022 гг., используя 2014 г. в качестве границы. При этом 2014 г. не включен в статистику, а реальное значение используется непосредственно для прогнозируемой численности населения в 2014 г.

Далее уравнение Ферхюльста будет использоваться для прогнозирования численности населения в трудоспособном возрасте и численности населения старше трудоспособного возраста России. Полученные данные построены и представлены на рис. 1–2.

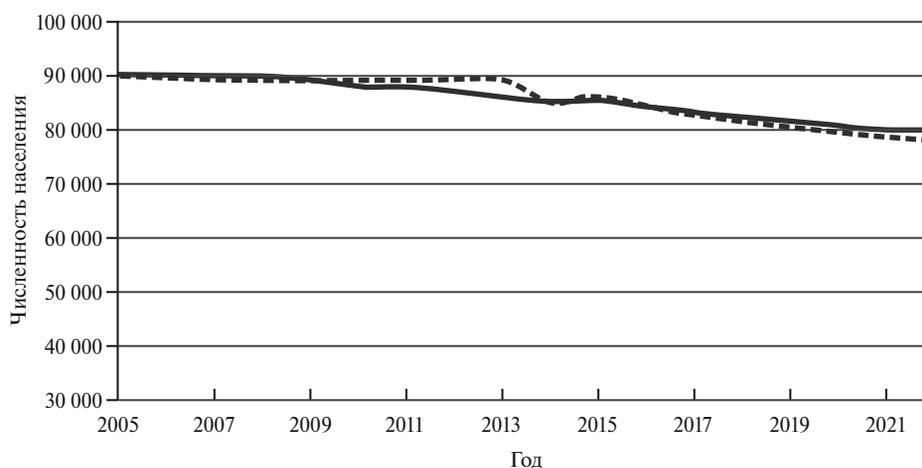


Рис. 1. Сравнение фактической (сплошная линия) с прогнозируемой (пунктирная линия) численностью населения России в трудоспособном возрасте в 2005–2021 гг., тыс. человек

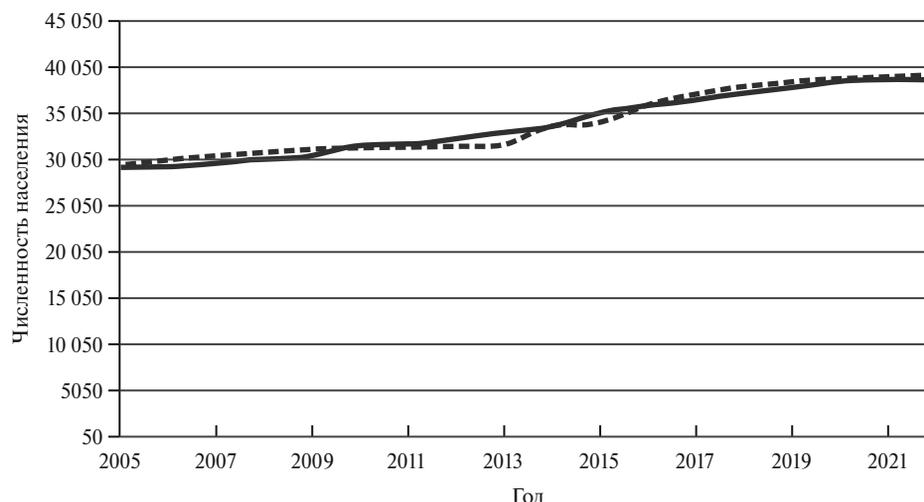


Рис. 2. Сравнение фактической (сплошная линия) с прогнозируемой (пунктирная линия) численностью населения России старше трудоспособного возраста в 2005–2021 гг., тыс. человек

Таблица 1. Параметры численности населения России

Параметр	Численность населения России			
	в трудоспособном возрасте		старше трудоспособного возраста	
	Период времени		Период времени	
	2005–2013	2015–2021	2005–2013	2015–2021
Темп прироста населения (a)	0,744	0,159	0,324	0,474
Поддерживающая емкость среды (M)	89 124	74 631	31 962	39 374
Год, в котором достигается половина поддерживающей емкости среды (t')	1999	2002	1998	2011
Численность населения ($P(t)$)	$\frac{89\,124}{1 - e^{-0,744(t-1999)}}$	$\frac{74\,631}{1 - e^{-0,159(t-2002)}}$	$\frac{31\,962}{1 + e^{-0,324(t-1998)}}$	$\frac{39\,374}{1 + e^{-0,474(t-2011)}}$

Таблица 2. Результаты расчетов по уравнению Ферхюльста в России на период 2005–2022 гг.

Год	В трудоспособном возрасте		Старше трудоспособного возраста	
	Прогнозируемое население, тыс. человек	Погрешность, %	Прогнозируемое население, тыс. человек	Погрешность, %
2005	90099	0,000	29353	0,000
2006	89584	0,635	30031	2,118
2007	89342	0,795	30541	2,721
...
2020	79414	1,631	38826	0,648
2021	78674	1,517	39031	0,343
2022	78053	1,713	39160	0,861
Средняя погрешность, %	1,089		1,484	

В табл. 1 представлены исходные параметры численности населения Российской Федерации, а в табл. 2 — результаты расчетов по уравнению Ферхюльста и их верификации.

Согласно данным, представленным в последней строке табл. 2, средняя погрешность прогноза прироста населения России на основе уравнения Ферхюльста равна 1,089% для населения в трудоспособном возрасте и 1,084% — для населения старше трудоспособного возраста.

ПРОГНОЗ ЧИСЛЕННОСТИ НАСЕЛЕНИЯ РОССИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОЛИНОМИАЛЬНОЙ РЕГРЕССИИ

Полиномиальная регрессия выступает наиболее часто используемым методом прогнозирования, а программное обеспечение MATLAB дает уникальные возможности прогнозирования численности населения с использованием полиномиальной регрессии, что в совокупности позволяет получить беспрецедентные преимущества по сравнению с другими методами прогнозирования населения. Подгонка данных (кривой) является важным методом обработки данных, цель которой состоит в том, чтобы установить эффективную эмпирическую функциональную связь между зависимой переменной и независимой переменной в соответствии с данными, а также предоставить рекомендации для дальнейшего исследования функции (Zhou, Qi, Jiao, 2008).

Верификация модели прогнозирования численности населения России трудоспособного и старше трудоспособного возрастов, выполненная в программной среде MATLAB с использованием полиномиальной регрессии, представлена на рис. 3, 4 и в табл. 3.

Анализ данных табл. 3 показал, что наименьшая средняя погрешность прогноза численности населения России, равная 0,227% для численности населения трудоспособного возраста и 0,372%

Таблица 3. Оценка средней погрешности результатов верификации полиномиальной регрессии для численности населения России в трудоспособном возрасте на период 2005–2022 гг., тыс. человек

Год	Фактическое население	Расчетное значение по полиномиальной регрессии			
		Степень 1	Степень 2	Степень 3	Степень 4
2005	90099	91440	90689	90290	90209
2006	90157	90748	90262	90145	90159
2007	90058	90056	89802	89879	89935
...
2020	80731	81064	80809	80733	80790
2021	79886	80372	79886	80003	80017
2022	79414	79680	78929	79327	79245
Средняя погрешность, %		0,470	0,324	0,230	0,227

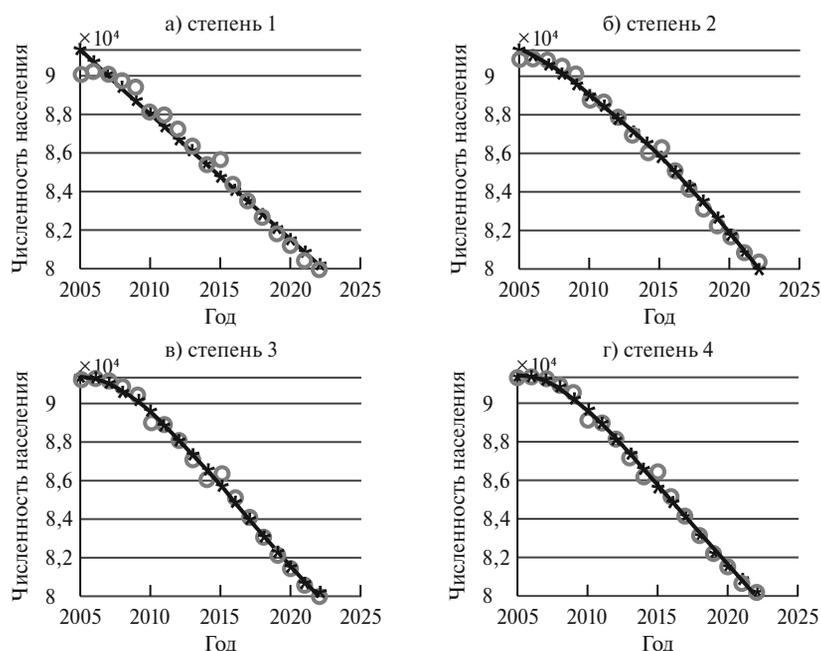


Рис. 3. Результаты верификации полиномиальной регрессии для численности населения России в трудоспособном возрасте на период 2005–2022 гг., тыс. человек

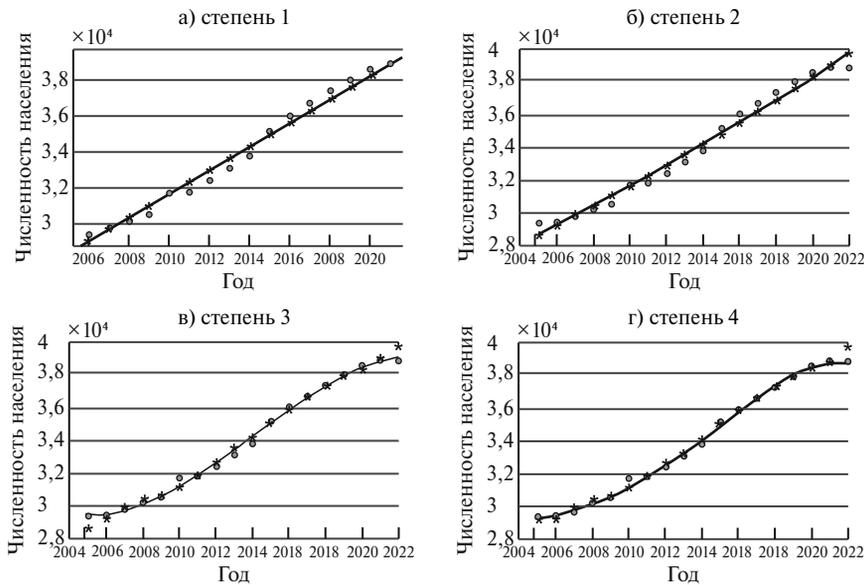


Рис. 4. Результаты верификации полиномиальной регрессии для численности населения России старше трудоспособного возраста на период 2005–2022 гг., тыс. человек

для численности населения старше трудоспособного возраста, получается для уравнения полиномиальной регрессии четвертой степени, которое имеет вид

$$y = -1,664 \times 10^{12} + 3,299 \times 10^9 x - 2,451 \times 10^6 x^2 + 809,7x^3 - 0,1003x^4. \tag{7}$$

Для численности населения старше трудоспособного возраста мы столкнулись с явлением переобучения модели, которое хорошо изучено и рассмотрено, например, в работе (Головкина, Козыченко, Клименко, 2022). Смысл такого переобучения заключается в том, что с ростом сложности модели (увеличением степени полинома) средняя погрешность на обучающих данных снижается, но при этом возрастает ошибка прогноза, что хорошо видно на рис. 5. Переобучение в статистике — явление, когда построенная модель хорошо объясняет примеры из обучающей выборки, но относительно плохо работает на примерах, не участвовавших в обучении (на примерах из тестовой выборки). Данная проблема решается путем снижения сложности модели до оптимального значения с точки зрения точности модели на обучающей и тестовой выборках данных, которым в нашем случае является уравнение полиномиальной регрессии второй степени вида

$$y = 2,264 \times 10^7 - 2,31 \times 10^4 x + 5,898x^2. \tag{8}$$

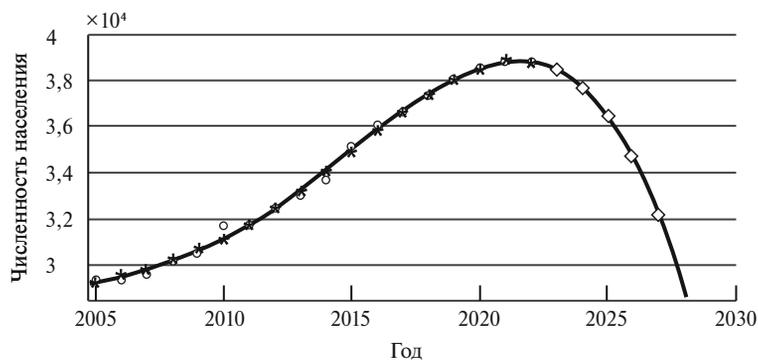


Рис. 5. Демонстрация явления переобучения модели на примере прогнозирования численности населения России старше трудоспособного возраста на период 2023–2027 гг. с использованием уравнения полиномиальной регрессии четвертой степени, тыс. человек

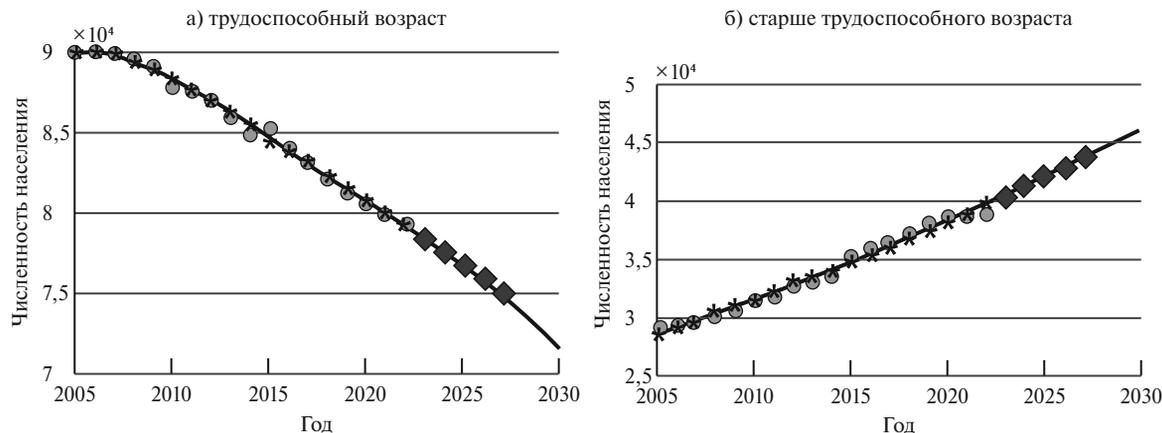


Рис. 6. Результаты прогнозирования численности населения России на период 2023–2027 гг., тыс. человек

На рис. 6 показаны результаты прогнозирования численности населения России по формулам (7) и (8) на период 2023–2027 гг.

ПРОГНОЗ КОЭФФИЦИЕНТА ДЕМОГРАФИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ

Представленные на рис. 6 результаты прогнозирования численности населения России позволяют осуществить прогноз коэффициента демографической нагрузки (КДН), определяемого отношением численности населения старше трудоспособного возраста (пенсионеров) к численности населения трудоспособного возраста и выступающего одним из основных показателей демографического статуса страны, влияющего на пенсионное обеспечение ее граждан, на здравоохранение, производительность труда и другие факторы социально-экономического развития государства. КДН получены на основе прогнозируемой численности населения России трудоспособного возраста с помощью уравнения полиномиальной регрессии четвертой степени и прогнозируемой численности населения старше трудоспособного возраста с помощью уравнения Ферхюльста, которые имеют минимальные погрешности (см. табл. 2 и 3). Результаты расчетов КДН на основе прогнозирования числа работающих граждан и числа пенсионеров на период 2023–2031 гг. (девять лет) и КДН с учетом выхода пенсионеров из солидарной системы пенсионного обеспечения, поскольку они накопят на своих индивидуальных (персонифицированных) пенсионных счетах сумму, достаточную для пенсионного обеспечения на период дожития, показаны в табл. 4.

При прогнозировании численности населения число лет прогноза соотносится с числом лет фактических данных и составляет половину лет фактических данных. Эта закономерность отражена во многих статьях, например, прогноз численности населения Китая на 2019–2050 гг. основан на численности населения 1950–2018 гг. (Chen, Xiao, 2020). Прогноз численности населения на 2021–2030 гг. Китая основан на численности населения 1990–2020 гг. (Shi, Yin, 2021).

Поскольку обучающие данные составляют 18 лет (с 2005 по 2022 г.), прогнозы могут быть сделаны для девяти лет, т.е. на 2023–2031 гг., при этом КДН остается постоянным на уровне 0,669 для последующих лет (см. столбец 5 в табл. 5).

Число граждан трудоспособного возраста и число пенсионеров за пределами горизонта прогнозирования, т.е. начиная с 2032 г., принимаются равными значениям последнего года прогнозного периода и составляют 70 285 тыс. человек и 47 006 тыс. человек соответственно (см. столбцы 3 и 4 табл. 4). Следовательно, начиная с 2032 г. КДН равен 47 006 тыс. человек / 70 285 тыс. человек = 0,669, что и указано в столбце 5 табл. 4. В столбце 6 табл. 4 указано число пенсионеров, на которых распространяется солидарная система пенсионного обеспечения. Численность пенсионеров, на которых распространяется солидарная система пенсионного обеспечения, сокращается, поскольку часть пенсионеров выходят из солидарной системы пенсионного обеспечения, а на их место поступает значительно меньшее число вышедших на пенсию. И так до тех пор, пока все действующие пенсионеры, т.е. те, которые находятся на пенсии в момент внедрения персонифицированных пенсионных счетов, не выйдут из солидарной системы пенсионного обеспечения. В ряде научных исследований, посвященных прогрессивным

Таблица 4. КДН России в 2023–2082 гг. с помощью уравнения полиномиальной регрессии

Год	Работающие граждане, тыс. человек	Число пенсионеров, тыс. человек	КДН	Число пенсионеров, на которых распространяется солидарная система пенсионного обеспечения, тыс. человек	КДН с учетом выхода пенсионеров из солидарной системы
1	2	3	4	5	6
2023	78466	40528	0,516	40528	0,516
2024	77670	41296	0,532	40463	0,521
...
2040	70285	47006	0,669	7836	0,111
2041	70285	47006	0,669	5810	0,083
2042	70285	47006	0,669	3784	0,054
2043	70285	47006	0,669	3784	0,054
...
2081	70285	47006	0,669	3784	0,054
2082	70285	47006	0,669	3784	0,054

технологиям финансирования пенсионного обеспечения граждан России с использованием индивидуальных (персонифицированных) пенсионных счетов (Соколов, Костырин, 2021; Костырин, Дрынкин, 2023, с. 129–144), период дожития принимается равным 20 годам, а период трудовой деятельности — 40 лет, поэтому после двадцатилетнего периода, начиная с 2042 г., солидарная система пенсионного обеспечения распространяется только на вновь вышедших на пенсию пенсионеров, численность которых постоянна и составляет 3784 тыс. человек, а КДН с учетом выхода пенсионеров из солидарной системы составляет 0,054 в 2042–2082 гг.

ПЕНСИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ В РОССИИ

В Российской Федерации действуют три уровня пенсионного обеспечения: государственное пенсионное обеспечение, обязательное пенсионное страхование и негосударственное (дополнительное) пенсионное обеспечение. Состав современной пенсионной системы РФ представлен на рис. 7.



Рис. 7. Основные типы систем пенсионного обеспечения в России

В 2023 г. государство реорганизовало Пенсионный фонд России (ПФР) — он вошел в Социальный фонд России (СФР)². Теперь СФР получает отчисления работодателей и выплачивает деньги пенсионерам, как показано на рис. 7. Значительная часть нынешних и будущих пенсионеров в той или иной степени не удовлетворены размером назначенных и будущих пенсий (Алексашенко, 2019; Гурвич, 2019). Как и во многих странах, в России проводится очередной этап преобразований пенсионной системы, который затрагивает в первую очередь распределительные элементы: повышение пенсионного возраста, изменение требований к минимальному страховому стажу, изменение порядка индексации пенсионных выплат (Биткина, 2020).

Для изучения факторов, влияющих на доходы и расходы пенсий в России, в данной работе строится математическая модель и осуществляется решение задачи линейного программирования для получения значений факторов, влияющих на пенсионные доходы и расходы.

Моделирование пенсионных доходов и расходов

Общая сумма накоплений в СФР на пенсионное обеспечение граждан Российской Федерации равна сумме взносов минус расходы на пенсионное обеспечение тех граждан, которые находятся на пенсии и (или) не успели накопить себе на пенсионное обеспечение на период дожития. Для первого года накопительная часть пенсии на конец года находится по формуле

$$O_1 = (12c_0w_0 / D_1 + H_1 + \Pi_1), \quad (9)$$

где c_t — ставка пенсионных взносов в году t , доли ед. (2022 г. принят за базовый и имеет порядковый номер $t = 1$); w_t — среднемесячная заработная плата в году t , руб.; $D_t = P_t / K_t$ — КДН в году t , доли ед.; K_t — число граждан трудоспособного возраста в году t , перечисляющих средства в СФР на пенсионное обеспечение, определяется по формуле (7) с учетом тех граждан, которые выходят из «тени» и начинают делать отчисления в СФР; P_t — число пенсионеров в году t , на которых распространяется солидарная система пенсионного обеспечения, определяется по формуле (6) за вычетом тех пенсионеров, которые успевают накопить на своих индивидуальных (персонифицированных) пенсионных счетах сумму, достаточную для пенсионного обеспечения на период дожития; H_t — бюджетные доходы, направляемые в году t в СФР на одного пенсионера в месяц, руб.; Π_t — размер средней страховой пенсии в месяц в году t , руб.; $\Pi_1 = r_1w_1$; $\Pi_2 = r_1w_1(1+s)$; и т.д., где r_t — коэффициент замещения выпадающих доходов при выходе работника на пенсию — доля годовой суммы, которую работник получает от пенсионной схемы после выхода на пенсию и которая эквивалентна его или ее зарплатному доходу за год до выхода на пенсию, доли ед.; s — темпы роста заработной платы, доли ед.

Накопленная часть пенсии с учетом капитализируемых процентов по вкладу на конец года для первого года составляет:

$$O_1^* = O_1(1+R), \quad (10)$$

Для второго года — $O_2 = (12c_0w_0(1+s) / D_2 + H_2 - \Pi_2) + O_1$. Накопленная часть пенсии с учетом капитализируемых процентов по пенсионному вкладу на конец года для второго года

$$O_2^* = O_2(1+R) + (O_1^* - O_1)(1+R), \quad (11)$$

где R — средняя ставка инвестиционного дохода по операциям с пенсионными средствами граждан (норма доходности), доли ед.

Аналогично — для всех остальных периодов накопления.

Таким образом, накопительная часть пенсии на конец года t составляет

$$O_t = \sum_{i=2}^t (12c_iw_i / D_i + H_i - \Pi_i), \quad (12)$$

а накопленная часть пенсии с учетом капитализируемых процентов по вкладу на конец года —

$$O_t^* = O_t(1+R) + (O_{t-1}^* - O_{t-1})(1+R). \quad (13)$$

Рассуждая аналогичным образом (формулы (9)–(12)), получаем, что общая сумма пенсионных накоплений равна:

1) от 1 до n лет —

$$J_1(n) = O_n^*, \quad (14)$$

² <https://sfr.gov.ru>

где $J_1(n)$ — накопительная часть пенсии с учетом капитализируемых процентов по вкладу на конец года n , руб.; n — период накопления средств, достаточных для пенсионного обеспечения в размере 80% заработной платы на период дожития m ($n \geq m$);

2) от n до T лет —

$$J_2 = J_1(1 + R)^{T-n}, \tag{15}$$

где J_2 — накопительная часть пенсии с учетом капитализируемых процентов по вкладу на момент выхода на пенсию, руб.; T — период трудовой деятельности в годах.

Размер общей суммы пенсионных накоплений на период дожития составляет:

$$L = \sum_{t=1}^m (12 r_t w_t), \tag{16}$$

где L — общая сумма пенсионных накоплений на период дожития, руб.; m — период дожития, лет.

В итоге, объединив уравнения (14)–(16), мы получили целевую функцию экономико-математической модели для расчета пенсионных доходов и расходов граждан:

$$N = \min n, \text{ при котором } J_2(n) \geq L(m), \tag{17}$$

где

$$J_2(n) = J_1(n)(1 + R)^{T-n}, \tag{18}$$

$$L(m) = \sum_{t=T}^{T+m} 12 r_t w_t. \tag{19}$$

Практическая реализация модели (17)–(19). Настройки параметров модели и допущения

Средняя заработная плата w_0 и темпы ее роста s

Большинство стран мира постепенно отходят от практики ежегодной индексации пенсий по уровню инфляции, переходя к индексации в соответствии с изменением среднего уровня заработной платы в экономике (Honerlein, 2019). Поэтому в данной работе мы выбираем одним из факторов, влияющих на пенсионные доходы и расходы, среднюю заработную плату. По данным Федеральной службы государственной статистики (Росстат)³ средняя заработная плата в 2023 г. в России составляла 65 094 руб. Средняя заработная плата работающих граждан значительно выросла за период с 2012 по 2023 г., но темпы ее роста сильно варьируют от года к году (рис. 8), при этом темпы ее роста после 2016 г. относительно стабильны, оставаясь на уровне около 8,47%. Таким образом, годовой темп роста средней заработной платы после 2016 г. в России оценивается в 8,47%.

Учитывая, что модель, используемая в данной работе, является инструментальным подходом, мы предварительно установили темп роста заработной платы на уровне 1,5% для обеспечения устойчивости моделирования.

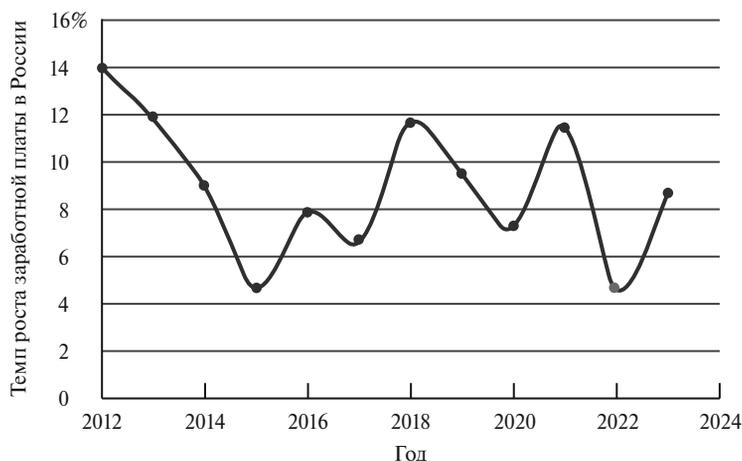


Рис. 8. Диаграмма разброса темпов роста средней заработной платы работников в России, 2012–2023 гг.

³ <https://rosstat.gov.ru>

Ставка пенсионных взносов s_0

Ставка пенсионных взносов, которые осуществляет работодатель из фонда оплаты труда работающих на предприятии граждан, является центральным параметром системы пенсионного страхования и напрямую влияет на пенсионный доход и, следовательно, на пенсионный разрыв: высокая ставка пенсионных взносов может привести к повышению стоимости рабочей силы, что, в свою очередь, может вытеснить средства на технологические инновации и затормозить технологический прогресс на предприятиях (Zhao, Lu, 2018). В то же время компании в собственных интересах будут перекладывать финансовое бремя, обусловленное высокими ставками взносов, на своих сотрудников (Ma, Meng, Gan, 2014). Таким образом, повышение ставок пенсионных взносов окажет негативное влияние на технологические инновации предприятий, конкурентоспособность продукции и способность обеспечивать занятость (Song, Feng, Yang, 2021). А поскольку взносы являются основным источником дохода пенсионных фондов, то снижение доходов от взносов неизбежно усилит давление, связанное с балансированием доходов и расходов пенсионных фондов, что приведет к увеличению пенсионного разрыва (Zhao, Fan, 2020).

С целью поддержания финансового баланса в Пенсионном фонде РФ ставка пенсионного страхования была сокращена с 26% в 2011 г. до 22%, начиная с 2012 г., и остается на этом уровне и в настоящее время (Соколов, Костырин, 2021).

Период накопления средств n , достаточных для пенсионного обеспечения в размере 80% заработной платы на период дожития m ($n \geq m$). Учитывая, что модель, используемая в данной работе, является инструментальным подходом, мы предположили, что период накопления средств n составляет 20 лет, период дожития m — также 20 лет.

Норма прибыли на инвестиции R . В данной работе сначала устанавливается инвестиционная доходность операции пенсионного фонда на уровне 2%, а затем корректируется в соответствии с реальной ситуацией результатов моделирования.

КДН с учетом выхода пенсионеров из солидарной системы. Исходя из расчетов, показанных выше, воспользуемся данными в столбце 7 табл. 4.

Государственный бюджет. Солидарные пенсии остаются важным элементом пенсионной системы, во многом обеспечивающим устойчивость пенсионных систем в разных странах. В то же время, бюджет солидарной пенсионной системы все больше испытывает хронический дефицит средств и требует постоянных дополнительных трансфертов из бюджета (Питиляк и др., 2019; Фатхлисламова, 2019). Расчет доплаты из бюджета, приходящейся на одного пенсионера, показан позже.

ПОЛУЧЕННЫЕ ПАРАМЕТРЫ

Результаты моделирования средней страховой пенсии за период трудовой деятельности с использованием экономико-математической модели (17)–(19) приведены в табл. 5–7. Согласно формулам (17)–(19) оценивается влияние следующих параметров модели: ставки пенсионных взносов s ; среднемесячной заработной платы w ; средней ставки инвестиционного дохода по операциям с пенсионными средствами граждан R (нормы доходности) и темпов роста заработной платы s , при которых обеспечивается сбалансированность пенсионных поступлений и расходов на пенсию граждан, т.е. при которых $J_2(n) - L(m) = 0$, что можно видеть в последней строке табл. 5–7.

В столбце 1 табл. 5–7 указан год, для которого осуществляется моделирование. Первая строка — базовый вариант моделирования, соответствующий 2023 г., т.е. моменту введения персонализированных пенсионных счетов, а последняя строка соответствует сумме лет трудоспособного периода и периода дожития, в рассматриваемых табл. 5–7 последняя строка соответствует 2082 г.

Согласно данным Федеральной службы государственной статистики среднемесячная номинальная начисленная заработная плата работников организаций Российской Федерации по состоянию на 2023 г. равна $w_1 = 65\,094$ руб., что указано в первой строке столбца 2 табл. 5. Предполагается ее ежегодное увеличение на 1,5% в год. Значит, в 2024 г. ожидаемое значение среднемесячной заработной платы составит $w_2 = 65\,094$ руб. в месяц $\times 1,015 = 66\,070,41$ руб. в месяц, что дано во второй строке столбца 2 табл. 5, и так далее по всем вариантам моделирования.

В столбце 3 табл. 5 представлены бюджетные доходы, направляемые в СФР на одного пенсионера, в месяц. Для расчета их размера использованы открытые данные СФР (Социальный фонд России, 2024). Основные показатели на официальном интернет-ресурсе СФР представлены

Таблица 5. Результаты моделирования средней страховой пенсии за период трудовой деятельности в России. Выход на пенсию в 2063 г. (норма доходности — 1,408%)

Год	Средняя заработная плата, руб.	Бюджетные доходы на 1 пенсионера в месяц, руб.	Средняя страховая пенсия в месяц, руб.	КДН с учетом выхода пенсионеров из солидарной системы	Накопительная часть пенсии на конец года, руб.	Накопленная часть пенсии с учетом капитализации на конец года, руб.
1	2	3	4	5	6	7
2023	65094,00	11908,75	19003,33	0,516	247582,83	251068,44
2024	66070,41	11908,75	21161,34	0,521	471369,76	481540,65
...
2041	85100,03	11908,75	34040,01	0,083	12037996,64	13085945,58
2042	86376,53	11908,75	34550,61	0,054	16002401,48	17290394,94
2043	87672,18	...	35068,87	0,054	16002401,48	17533818,93
...
2061	114617,40	...	45846,96	0,054	16002401,48	22550978,55
2062	116336,66	...	46534,67	0,054	16002401,48	22868464,03
2063	118081,71	...	94465,37	0,054	21734879,57	22040875,55
2064	119852,94	...	95882,35	0,054	20890287,32	21184392,65
2065	121650,73	...	97320,59	0,054	20016545,60	20298349,90
2066	123475,50	...	98780,40	0,054	19112985,14	19382068,60
...
2079	149843,99	...	119875,19	0,054	4323354,11	4384220,75
2080	152091,65	...	121673,32	0,054	2924140,92	2965308,64
2081	154373,02	...	123498,42	0,054	1483327,61	1504210,74
2082	156688,62	...	125350,90	0,054	0,00	0,00

Таблица 6. Результаты моделирования средней страховой пенсии за период трудовой деятельности. Выход на пенсию в 2063 г. (минимальная заработная плата — 22 949,39 руб.)

Год	Средняя заработная плата, руб.	Бюджетные доходы на 1 пенсионера в месяц, руб.	Средняя страховая пенсия в месяц, руб.	КДН с учетом выхода пенсионеров из солидарной системы	Накопительная часть пенсии на конец года, руб.	Накопленная часть пенсии с учетом капитализации на конец года, руб.
1	2	3	4	5	6	7
2023	22949,39	11908,75	19003,33	0,516	32167,24	32810,58
2024	23293,63	11908,75	19288,38	0,521	61654,31	63543,61
...
2041	30002,67	11908,75	24843,83	0,083	3358286,04	3710595,76
2042	30452,71	11908,75	25216,49	0,054	4692065,32	5145262,54
2043	30909,50	...	25594,73	0,054	4692065,32	5248167,79
...
2061	40409,25	...	33461,04	0,054	4692065,32	7495675,95
2062	41015,38	...	33962,95	0,054	4692065,32	7645589,47
2063	41630,61	...	34472,39	0,054	7231920,73	7376559,14
2064	42255,07	...	34989,48	0,054	6970910,44	7110328,64
2065	42888,90	...	35514,32	0,054	6698595,20	6832567,11
2066	43532,23	...	36047,04	0,054	6414657,67	6542950,82
...

Окончание таблицы 6

Год	Средняя заработная плата, руб.	Бюджетные доходы на 1 пенсионера в месяц, руб.	Средняя страховая пенсия в месяц, руб.	КДН с учетом выхода пенсионеров из солидарной системы	Накопительная часть пенсии на конец года, руб.	Накопленная часть пенсии с учетом капитализации на конец года, руб.
1	2	3	4	5	6	7
2079	52828,65		43744,97	0,054	1506597,43	1536729,38
2080	53621,08		44401,15	0,054	1021967,03	1042406,37
2081	54425,39		45067,16	0,054	519922,59	530321,04
2082	55241,78		45743,17	0,054	0,00	0,00

Таблица 7. Результаты моделирования средней страховой пенсии за период трудовой деятельности. Выход на пенсию в 2063 г. (ставка взноса — 18,813%)

Год	Средняя заработная плата, руб.	Бюджетные доходы на 1 пенсионера, в месяц, руб.	Средняя страховая пенсия в месяц, руб.	КДН с учетом выхода пенсионеров из солидарных систем	Накопительная часть пенсии на конец года, руб.	Накопленная часть пенсии с учетом капитализации на конец года, руб.
1	2	3	4	5	6	7
2023	65094,00	11908,75	19003,33	0,516	199388,64	203376,42
2024	66070,41	11908,75	21161,34	0,521	374677,18	386238,25
2041	85100,03	11908,75	34040,01	0,083	9731616,34	10930910,81
...
2042	86376,53	11908,75	34550,61	0,054	13082420,97	14567349,75
2043	87672,18		35068,87	0,054	13082420,97	14858696,74
...
2061	114617,40		45846,96	0,054	13082420,97	21221877,87
2062	116336,66		46534,67	0,054	13082420,97	21646315,42
2063	118081,71		94465,37	0,054	20512730,97	20922985,59
2064	119852,94		95882,35	0,054	19772397,36	20167845,31
2065	121650,73		97320,59	0,054	18999998,26	19379998,23
2066	123475,50		98780,40	0,054	18194633,47	18558526,14
...
2079	149843,99		119875,19	0,054	4273336,08	4358802,81
2080	152091,65		121673,32	0,054	2898722,98	2956697,44
2081	154373,02		123498,42	0,054	1474716,41	1504210,74
2082	156688,62		125350,90	0,054	0,00	0,00

по состоянию на 2022 г. Так, поступление страховых взносов на обязательное пенсионное страхование в 2022 г. составило 6 189 млрд руб., а расходы на выплату пенсий равны 9 598,9 млрд руб. Недостающие средства компенсируются из федерального бюджета за счет бюджетных доходов, размер которых составил 9 598,9 млрд руб. — 6 189 млрд руб. = 3 409,9 млрд руб. Таким образом, доплаты из бюджета, приходящиеся на одного пенсионера в месяц, равны 3 409,9 млрд руб.: 36 629 000 человек: 12 (число месяцев в году) = 7 757,74 руб., что и указано в столбце 3 табл. 5–7.

Согласно открытым данным СФР средний размер страховой пенсии по старости равен 19003 руб., что и указано в первой строке столбца 4 табл. 5–7. При внедрении прорывной технологии пенсионного обеспечения граждан России на основе индивидуальных (персонифицированных)

пенсионных счетов моделируется равномерное ежегодное увеличение средней пенсии в течение пяти лет до размера, составляющего 40% средней заработной платы в соответствующем году (параметр r_t в модели (9)–(19)), так как за этот период ожидается выход граждан трудоспособного возраста из «тени». Через пять лет, начиная с 2028 г., средняя страховая пенсия в месяц составляет 40% средней заработной платы в соответствующем году. Следует обратить внимание на то, что в 2031 г. средняя страховая пенсия в месяц с учетом соотношения числа работающих и пенсионеров, на которых распространяется солидарная система, составляет уже 60% средней заработной платы. Поэтому, начиная с 2031 г., средняя страховая пенсия для пенсионеров, которые участвуют в солидарной системе пенсионного обеспечения, станет равной 60% средней заработной платы в соответствующем году, а те средства, которые превышают эту величину, поступают в накопительную часть пенсии работающих граждан, тем самым значительно ее увеличивая. Начиная с пенсионного возраста, средняя пенсия равна 80% средней заработной платы в соответствующем году.

КДН с учетом выхода пенсионеров из солидарной системы (столбец 5 табл. 5–7) взят из последнего столбца табл. 4.

В столбце 6 табл. 5–7 представлена накопительная часть пенсии на одного работающего на конец года нарастающим итогом, равная разности между средствами, перечисляемыми в СФР на пенсионное обеспечение от одного работающего, с учетом бюджетных доходов на одного пенсионера и средней страховой пенсией, а в столбце 7 табл. 5–7 дана накопленная часть пенсии, приходящаяся на одного работающего, с учетом капитализируемых процентов по вкладу на конец года, определяемая по формуле (13).

Зависимость между темпом роста пенсий и темпом роста заработной платы представлена на рис. 9. График показывает, что с увеличением темпов роста заработной платы темпы роста пенсий также возрастают, и наоборот. Выше (см. рис. 8) было отмечено, что годовой темп роста средней заработной платы после 2016 г. в России оценивается в 8,47%. Такому значению соответствуют темпы роста пенсий, равные 6,167% (рис. 9). Также отметим, что при значениях темпов роста заработной платы ниже 5,2% пенсия растет быстрее, а свыше 5,2% — пенсия растет более медленными темпами.

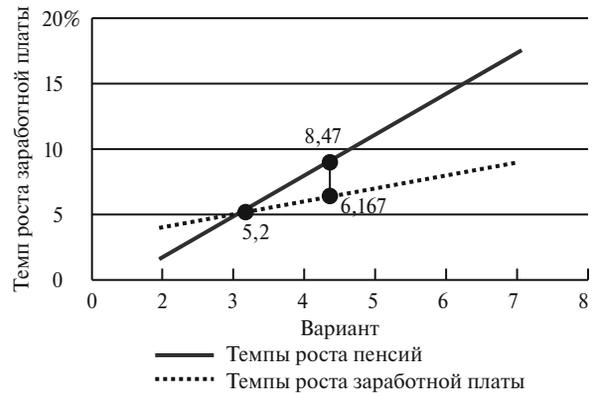


Рис. 9. Зависимости между темпами роста заработной платы и темпами роста пенсий в России

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты практической реализации экономико-математической модели (17)–(19) представлены в табл. 8.

Таблица 8. Результаты практической реализации экономико-математической модели (17)–(19), при которых обеспечивается сбалансированность пенсионных поступлений и расходов на пенсию граждан

Показатель	Обозначение показателя	Исходное значение показателя	Минимальное значение показателя, при котором $J_2(n) - L(m) = 0$
Норма доходности, %	R	2	1,408
Среднемесячная заработная плата, руб.	w	65 094	22 949,39
Ставка взносов в СФР на пенсионное обеспечение, %	c	22	18,813

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Прогнозирование численности населения России трудоспособного возраста с помощью уравнения полиномиальной регрессии четвертой степени характеризуется средней погрешностью 0,227%, а прогнозирование численности населения старше трудоспособного возраста с помощью уравнения Ферхюльста имеет среднюю погрешность 1,084%. Поэтому данные модели используются для прогнозирования численности соответствующих категорий граждан на период с 2023 по 2031 г. (девять лет) и расчета на основе полученных значений КДН.

Разработана экономико-математическая модель (17)–(19) для расчета пенсионных доходов и расходов граждан при внедрении индивидуальных (персонифицированных) пенсионных счетов граждан, учитывающая прогнозные значения КДН, и осуществлен стресс-анализ модели на основе оценки влияния следующих параметров модели: ставки пенсионных взносов c ; среднемесячной заработной платы w ; средней ставки инвестиционного дохода по операциям с пенсионными средствами граждан R (нормы доходности) и темпов роста заработной платы s , при которых обеспечивается сбалансированность пенсионных поступлений и расходов на пенсию граждан, т.е. при которых достигается равенство $J_2(n) - L(m) = 0$.

Так, по результатам моделирования, представленным в табл. 8, минимальное значение нормы доходности, при котором обеспечивается сбалансированность пенсионных поступлений и расходов на пенсию граждан, равно 1,408%. Минимальная среднемесячная заработная плата составляет 22 949,39 руб.; а ставка взносов в СФР на пенсионное обеспечение равна 18,813%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

- Алексашенко С.В.** (2019). Русское экономическое чудо: что пошло не так? М.: АСТ. 320 с. [Aleksashenko S.V. (2019). *Russian economic miracle: What went wrong?* Moscow: AST. 320 p. (in Russian).]
- Биткина И.К.** (2020). К вопросу об эффективности накопительных элементов пенсионной системы: международный опыт // *Финансы: теория и практика*. № 5. С. 24–40. DOI: 10.26794/2587-5671-2020-24-5-24-40 [Bitkina I.K. (2020). Efficiency of the funded elements of the pension system: International practices. *Finance: Theory and Practice*, 5, 24–40 (in Russian).]
- Головкина А.Г., Козыниченко В.А., Клименко И.С.** (2022). Метод последовательных приближений для построения модели динамической полиномиальной регрессии // *Вестник Санкт-Петербургского университета*. Т. 18. Вып. 4. С. 487–500. [Golovkina A.G., Kozychenko V.A., Klimenko I.S. (2022). Method of successive approximations for the dynamic polynomial regression model building. *Saint-Petersburg University Bulletin*, 4, 18, 487–500 (in Russian).]
- Гурвич Е.Т.** (2019). Развилки пенсионной реформы: российский и международный опыт // *Вопросы экономики*. № 9. С. 5–39. [Gurvich E.T. (2019). Pension reform developments: Russian and international experience. *Voprosy Ekonomiki*, 9, 5–39 (in Russian).]
- Костырин Е.В., Дрынкин С.Г.** (2023). Экономический эффект от внедрения персонифицированных пенсионных счетов в систему пенсионного обеспечения граждан России // *Экономика и управление: проблемы, решения*. Т. 3. № 9. С. 129–144. [Kostyrin E.V., Drynkin S.G. (2023). Economic effect of the introduction of personalized pension accounts into the pension system of Russian citizens. *Economics and Management: Problems, Solutions*, 3, 9, 129–144 (in Russian).]
- Питиляк Д.А., Драненко Л.П., Базиль Т.В., Черняева М.А.** (2019). Оценка и применение незадействованных резервов стабилизации пенсионной системы // *Экономика. Налоги. Право*. № 12 (3). С. 103–115. [Pitilyak D.A., Dranenko L.P., Bazil T.V., Chernyaeva M.A. (2019). Assessment and utilization of uncommitted reserves of the pension system stabilization. *Economics, Taxes & Law*, 12 (3), 103–115 (in Russian).]
- Соколов Е.В., Костырин Е.В.** (2021). Экономический эффект от использования персонифицированных пенсионных счетов вместо существующей системы пенсионного обеспечения граждан России // *Экономика и управление: проблемы, решения*. Т. 1. № 3. С. 78–85. [Sokolov E.V., Kostyrin E.V. (2021). Economic effect from the use of personalized pension accounts instead of the existing system of pension provision for Russian citizens. *Economics and Management: Problems, Solutions*, 1, 3, 78–85 (in Russian).]
- Фатхлисламова Г.Ф.** (2019). Сравнительный анализ развития накопительной компоненты пенсионной системы и негосударственного пенсионного страхования России // *Экономическое развитие России*. № 26. С. 65–75. [Fatkhislamova G.F. (2019). Comparative analysis of the development of the accumulative component of the pension system and non-governmental pension insurance of Russia. *Economic Development of Russia*, 26, 65–75 (in Russian).]

- Bloom D.E., Canning D., Moore M.** (2014). Optimal retirement with increasing life expectancy. *Scandinavian Journal of Economics*, 116 (3), 838–858. DOI: 10.2139/ssrn.1857565
- Borgschulte M., Heeppung C.** (2018). Minimum wages and retirement. *Discussion Paper Series*, 11728, 18–20.
- Cai D.H., Zhu C.Y., Han W.J.** (2017). Life cycle model with optimal working years and leisure time. *Journal of Wuhan University*, 63 (6), 533–537 (in Chinese). [蔡东汉, 朱长艳, 韩文晶 (2017). 具有最优工作年限与闲暇的生命周期模型. *武汉大学学报理学版*, 63(6), 533–537.]
- Chen X., Xiao L.** (2020). Improving logistic models and population forecasts in China. *Journal of Chengdu University of Information Engineering*, 35 (2), 239–243 (in Chinese). [陈霞, 肖岚 (2020). Logistic 模型的改进与中国人口预测. *成都信息工程大学学报*, 35 (2), 239–243.]
- Holzmann R., Palmer E.** (2006). Pension reform: Issues and prospects for non–financial defined contribution (NDC) schemes. *The World Bank*, 601–660.
- Honerlein E.M.** (2019). Pension indexation for retirees revisited — normative patterns and legal standards. *Global Social Policy*, 19 (8), 246–265. DOI: 10.1177/1468018119842028
- Hong S., Jin F., Yu Ya.W.** (2021). The effect of reducing the social security contribution rate on corporate social security contributions and labor force hiring. *Economic Studies*, 01, 90–104 (in Chinese). [宋弘, 封进, 杨婉璇 (2021). 社保缴费率下降对企业社保缴费与劳动力雇佣的影响, *经济研究*, 第1期, 90–104.]
- Ma S., Meng X., Gan L.** (2014). Analysis of the impact of contributions of pension insurance companies on wages and employment of workers. *Economics*, 03, 969–1000 (in Chinese). [马双, 孟宪芮, 甘犁 (2014). 养老保险企业缴费对员工工资, 就业的影响分析. *经济学*, 第3期, 969–1000.]
- Malthus T.R.** (1978). *Population: First essay*. Ann-Arbor: University of Michigan Press.
- Sánchez-Romero M., Prskawetz A.** (2016). Education, lifetime labor supply and improvement of life expectancy. *Journal of Economic Dynamics and Management*, 73, 118–141.
- Shi C., Yin X.** (2021). Study of population size based on Leslie and logistic models. *Journal of Liaoning Institute of Science and Technology*, 23 (6), 89–91 (in Chinese). [史纯阳, 尹鑫鑫 (2021). 基于leslie和logistic模型的人口数量研究. *辽宁科技学院学报*, 23 (6), 89–91.]
- Verhulst P.F.** (1975). *Mathematical investigations on the law of increasing population growth*. Brussels: New Memoirs of the Royal Academy of Sciences and Fiction Brussels. Available at: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF02309004>. First published in 1838 in *Correspondence in Mathematical Physics*, 10, 113–121. Transl. from French.
- Xinyan D., Jianwei G., Shuqing L.** (2022). The impact of deferred retirement on workers' utility maximization — an analysis based on the utility function “S”. *Population and Economy*, 1, 106–120 (in Chinese). [段欣言, 高建伟, 李淑清 (2022). 延迟退休对职工效用最大化的影响 — 基于“S”型效用函数的分析. *人口与经济*, 第1期, 106–120 (in Chinese).]
- Zhao J., Lu Z.** (2018). Does the share of pension insurance contributions affect the productivity of enterprises. *Economic Studies*, 10, 97–112 (in Chinese). [赵健宇, 陆正飞 (2018). 养老保险缴费比例会影响企业生产效率吗? *经济研究*, 第10期, 97–112.]
- Zhou J., Qi X., Jiao J.** (2008). *MATLAB from entry to mastery*. Beijing: People's Post and Telecommunication Press. 467 p. (in Chinese). [周建兴, 岂兴明, 矫津毅 (2008). MATLAB从入门到精通. 北京人民邮电出版社, 467.]
- Zhao R., Fan Z.** (2020). Pension coordination reform, tax incentives and corporate contribution rates. *China Industrial Economics*, 9, 29–43 (in Chinese). [赵仁杰, 范子英 (2020). 养老金统筹改革, 征管激励与企业缴费率. *中国工业经济*, 第9期, 29–43.]

Modeling of pension income and expenditures based on the Verhulst equation and polynomial regression with demographic projections

© 2024 S. Suo, E.V. Kostyrin

S. Suo,

Bauman Moscow State Technical University (National Research University), Moscow, Russia; e-mail: sisuo1997@gmail.com

E.V. Kostyrin,

Bauman Moscow State Technical University (National Research University) Moscow, Russia; e-mail: kostyrinev@bmstu.ru

Received 01.02.2023

Abstract. To calculate the demographic load factor in this work, the forecasting of the working-age population of Russia was carried using the polynomial regression equation of the fourth degree with an accuracy of 0.227% and forecasting the number of people older than working age using the Verhulst equation (prediction accuracy of 1.084%) for the period from 2023 to 2031 (9 years). An economic and mathematical model was developed for calculating pension income and expenses for the implementation of individual (personalized) pension accounts of citizens and a stress analysis of the model was carried out based on an assessment of the impact of the pension contribution rate, average monthly salary, average investment income rate for transactions with pension funds of citizens (rate of return) and growth rates salaries, ensuring a balance between pension income and pension expenses of citizens. The practical implementation of the developed economic and mathematical model shows that the minimum value of the rate of return, ensuring balance between pension income and pension expenses of citizens, is 1.408%. The minimum average monthly salary is 22,949.39 rubles; the contribution rate to the Pension fund is estimated at 18.813%.

Keywords: Verhulst equation, polynomial regression, population size, demographic load factor, pension contribution rate, salary, pension, personalized retirement account, rate of return.

JEL Classification: C53, C63, J11, J26.

UDC: 336.233.2, 369.542.2, 314.93.

For reference: **Suo S., Kostyrin E.V.** (2024). Modeling of pension income and expenditures based on the Verhulst equation and polynomial regression with demographic projections. *Economics and Mathematical Methods*, 60, 2, 50–66. DOI: 10.31857/S0424738824020054 (in Russian).

НАРОДНОХОЗЯЙСТВЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ

Прогнозирование доходов и расходов Социального фонда России по обязательному социальному страхованию на случай временной нетрудоспособности и в связи с материнством

© 2024 г. В.А. Удод, О.В. Касачева

В.А. Удод,

ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский государственный университет», Томск;
e-mail: pr.udod@mail.ru

О.В. Касачева,

ООО «Газпром трансгаз Томск», Томск; e-mail: ovkasacheva@mail.ru

Поступила в редакцию 17.01.2023

Аннотация. В статье приводится краткое описание деятельности Фонда социального страхования Российской Федерации (ФСС) до момента его слияния (1 января 2023 г.) с Пенсионным фондом Российской Федерации (ПФР) в единый Социальный фонд России (СФР). Объектом исследования являлось обязательное социальное страхование на случай временной нетрудоспособности и в связи с материнством (ОСС на ВНиМ), а предметом исследования — оценка сбалансированности в ближайшей перспективе бюджета СФР на ОСС на ВНиМ. Предложена математическая модель прогнозирования доходов и расходов СФР на данный вид страхования. В качестве исходного статистического материала для построения модели использованы данные из отчетов об исполнении бюджета ФСС за период с 2008 г. по 2022 г., утвержденных соответствующими федеральными законами. В качестве основного математического аппарата была использована линейная однородная система второго порядка обыкновенных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами. Полученная модель прошла проверку на адекватность и при этом имеет высокую точность аппроксимации и хорошую точность ретропрогноза. На основе построенной модели сделан прогноз указанных расходов и доходов на 2023–2025 гг., из которого следует, что в данном промежутке времени расходы будут превышать доходы. Исходя из полученных результатов, даны некоторые рекомендации для ликвидации (уменьшения) потенциальной дестабилизации бюджета СФР на данный вид страхования.

Ключевые слова: модель прогнозирования, обязательное социальное страхование, временная нетрудоспособность.

Классификация JEL: С32, I13.

УДК: 369.

Для цитирования: Удод В.А., Касачева О.В. (2024). Прогнозирование доходов и расходов Социального фонда России по обязательному социальному страхованию на случай временной нетрудоспособности и в связи с материнством // *Экономика и математические методы*. Т. 60. № 2. С. 67–79. DOI: 10.31857/S0424738824020067

ВВЕДЕНИЕ

Выплаты, предусмотренные обязательным социальным страхованием на случай временной нетрудоспособности и в связи с материнством (далее — ОСС на ВНиМ), играют важную роль в сохранении, реализации и воспроизводстве человеческого капитала как ключевого фактора национального богатства страны (Ali et al., 2018; Zhou, Huang, 2019; Kamilova, 2022; Ma et al., 2021; Wang et al., 2022; Подвойский, 2022). С позиции активных в экономическом отношении граждан России данные выплаты представляют собой форму реализации важнейших конституционных прав: права на социальное обеспечение в случае болезни, материнства, для воспитания детей и пр. Страховщиком по данному виду страхования до 1 января 2023 г. выступал Фонд социального страхования Российской Федерации (далее — ФСС). Гарантированность указанных прав была непосредственно обусловлена эффективностью функционирования ФСС, которая, в свою очередь, напрямую зависела от сбалансированности его бюджета.

Источником формирования доходной части бюджета ФСС для ОСС на ВНиМ являлись страховые взносы работодателей, лиц, добровольно вступивших в правоотношения по обязательному социальному страхованию, и дотации государства (Мигранова, Роик, 2020; Рябичева, Гаджиева, 2020). Для

плательщиков страховых взносов по ОСС на ВНиМ был установлен тариф с предельной величины базы для исчисления страховых взносов в размере 2,9% (Мигранова, Роик, 2020).

Из описания содержания деятельности ФСС (Алексеева, 2018; Гусейханова, 2019; Малютина, Дырченкова, 2021; Рябичева, Гаджиева, 2020) следует, что его функционирование было сопряжено с определенными сложностями, в частности:

- 1) дестабилизация бюджета ФСС по ОСС на ВНиМ: установленные тарифы не покрывали закрепленных за ФСС функциональных расходов обязательств;
- 2) как следствие п. 1 — поэтапная отмена определенных направлений деятельности ФСС (например, исключение в 2003 г. санаторно-курортного лечения работников, а в 2010 г. — оздоровления их детей) и ограничение выплат по ряду обязательств;
- 3) несоблюдение такого страхового принципа, как отсутствие автономности (самодостаточности), зависимость бюджета ФСС по ОСС на ВНиМ от трансфертов из Федерального бюджета на сбалансирование его доходов и расходов.

С 1 января 2023 г. официально начал работать Социальный фонд России (далее — СФР), который объединил два других фонда: Пенсионный фонд и Фонд социального страхования. При этом ОСС на ВНиМ сохранилось и в СФР как одно из приоритетных направлений его деятельности.

Цель настоящей статьи — оценка сбалансированности в ближайшей перспективе бюджета СФР по ОСС на ВНиМ на основе построения модели прогнозирования доходов и расходов по данному виду страхования. По результатам прогнозирования, полученным на основе данной модели, могут быть предложены конкретные рекомендации, направленные на обеспечение финансовой устойчивости (стабилизации бюджета) СФР по ОСС на ВНиМ.

МЕТОДЫ

В исследовании использованы методы анализа и прогнозирования временных рядов (Бережная, Бережной, 2006; Кацко, Ярошенко, Задорожный, 2023; Льюис, 1986; Сасаев, 2020; Экономико-математические методы ..., 2002; Эконометрика ..., 2007) и дифференциальные уравнения (Ганичева, 2021; Краснов, Киселев, Макаренко, 1978).

Исходные данные. В качестве исходных статистических данных для построения модели используем данные из отчетов об исполнении бюджета Фонда социального страхования Российской Федерации за период с 2008 по 2022 г., утвержденных федеральными законами (табл. 1 и рис. 1)¹.

Таблица 1. Расходы и доходы ФСС по ОСС на ВНиМ за период с 2008–2022 гг.

Год	Номер года, t	Расходы, $x(t)$, млрд руб.	Доходы, $y(t)$, млрд руб.
2008	0	267,2	233,9
2009	1	320,9	304,3
2010	2	353,6	319,4
2011	3	350,8	393,1
2012	4	369,3	456,2
2013	5	395,8	413,4
2014	6	431,7	437,4
2015	7	479,9	388,8
2016	8	524,4	468,9
2017	9	529,1	526,0
2018	10	556,2	558,1
2019	11	583,8	582,2
2020	12	819,6	607,4
2021	13	844,2	770,0
2022	14	820,8	762,6

Источник: составлено авторами на основе данных из отчетов об исполнении бюджета ФСС.

¹ Федеральные законы: от 14.02.2010 № 8-ФЗ (за 2008 г.); от 04.10.2010 № 257-ФЗ (за 2009 г.); от 06.10.2011 № 267-ФЗ (за 2010 г.); от 02.10.2012 № 153-ФЗ (за 2011 г.); от 30.09.2013 № 257-ФЗ (за 2012 г.); от 14.10.2014 № 297-ФЗ (за 2013 г.); от 05.10.2015 № 280-ФЗ (за 2014 г.); от 31.10.2016 № 380-ФЗ (за 2015 г.); от 16.10.2017 № 289-ФЗ (за 2016 г.); от 11.10.2018

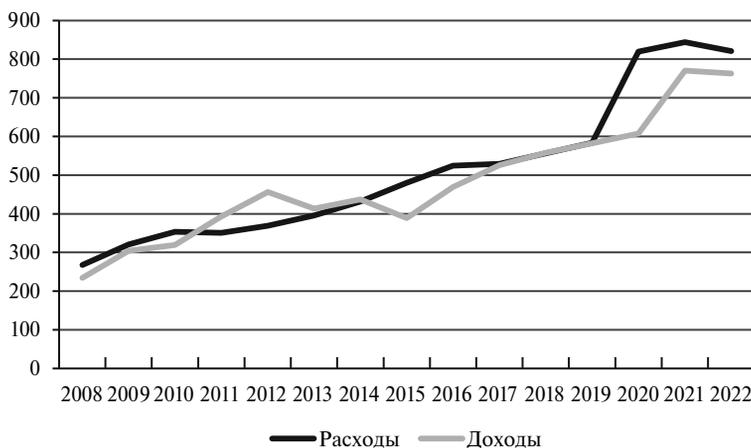


Рис. 1. Расходы и доходы ФСС по ОСС на ВНиМ за период 2008–2022 гг., млрд руб.

Источник: составлено авторами на основе данных из отчетов об исполнении бюджета ФСС.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

Построение модели прогнозирования. Совокупности упорядоченных во времени значений расходов и доходов ФСС по ОСС на ВНиМ, приведенные в табл. 1, представляют собой два временных ряда $x(t), y(t) (t = 0, \dots, n - 1)$, где число наблюдений $n = 15$.

В настоящее время для описания динамики нескольких взаимосвязанных друг с другом временных рядов широко используются модели векторной авторегрессии (VAR-модели). Исходя из этого, построим модель данного вида для исследуемых рядов.

VAR-модели применяются к стационарным временным рядам (Кацко, Яроменко, Задорожный, 2023). Вместе с тем из табл. 1 видно, что ряды $x(t), y(t), t = 0, \dots, n - 1$, содержат тенденции (тренды), а значит, не являются стационарными. Вследствие этого преобразуем их сначала к стационарному виду путем перехода к рядам из первых разностей:

$$\Delta x(t) = x(t) - x(t - 1), \quad \Delta y(t) = y(t) - y(t - 1), \quad t = 1, \dots, n - 1.$$

Результаты использования теста Дики–Фуллера подтвердили стационарность рядов из первых разностей при 5%-ном уровне значимости (табл. 2). При тестировании критические значения тестовых статистик брались из таблиц в (Магнус, Катышев, Пересецкий, 2007; Эконометрика ..., 2007), если использовались тестовые регрессии без свободного члена, а в случае применения тестовых регрессий со свободным членом они вычислялись по формуле (Эконометрика ..., 2007):

$$t_{0,95}^{DF} = -2,86 - 2,74 / n - 8,36 / n^2.$$

Учитывая малый объем имеющихся статистических данных ($n = 15$), ограничимся построением простейшей VAR-модели для рядов из первых разностей, т.е. модели вида (Сасаев, 2020):

$$\begin{cases} \Delta x(t) = a_0 + a_1 \Delta x(t - 1) + a_2 \Delta y(t - 1) + u_1(t), \\ \Delta y(t) = b_0 + b_1 \Delta x(t - 1) + b_2 \Delta y(t - 1) + u_2(t), \end{cases} \quad (1)$$

Таблица 2. Результаты использования теста Дики–Фуллера для рядов из первых разностей при 5%-ном уровне значимости

Ряд	Тестовая регрессия	Значение тестовой статистики	Критическое значение тестовой статистики
$\Delta x(t)$	Без свободного члена	-2,62	-1,95
$\Delta x(t)$	Со свободным членом	-3,36	-3,1
$\Delta y(t)$	Без свободного члена	-3,11	-1,95
$\Delta y(t)$	Со свободным членом	-4,38	-3,1

Источник: составлено авторами.

№ 358-ФЗ (за 2017 г.); от 16.10.2019 № 335-ФЗ (за 2018 г.); от 15.10.2020 № 315-ФЗ (за 2019 г.); от 25.10.2021 № 363-ФЗ (за 2020 г.); от 14.07.2022 № 252-ФЗ (за 2021 г.); от 24.07.2023 № 332-ФЗ (за 2022 г.).

Таблица 3. Результаты оценивания модели (1)

Ряд	Коэффициент детерминации	Оценки параметров		p -значение	Значимость параметров ($\alpha = 0,05$)	Значимость уравнения ($\alpha = 0,05$)
$\Delta x(t)$	0,105	\hat{a}_0	58,51	0,063	Незначим	Незначимо (значимость $F = 0,574$)
		\hat{a}_1	-0,108	0,740	Незначим	
		\hat{a}_2	-0,37	0,311	Незначим	
$\Delta y(t)$	0,494	\hat{b}_0	16,16	0,406	Незначим	Значимо (значимость $F = 0,033$)
		\hat{b}_1	0,603	0,017	Значим	
		\hat{b}_2	-0,186	0,438	Незначим	

Источник: составлено авторами.

где a_0, b_0 — свободные члены уравнений; a_1, a_2, b_1, b_2 — коэффициенты авторегрессии; $u_1(t), u_2(t)$ — не коррелированные друг с другом белые шумы.

Для оценивания параметров (свободных членов и коэффициентов авторегрессии) модели (1) был применен метод наименьших квадратов (МНК) к каждому уравнению в данной модели. Для этого использовался ППП Microsoft Excel (инструмент анализа «Регрессия»). Результаты оценивания приведены в табл. 3.

Как следует из данных табл. 3, модель (1) имеет низкое качество, а значит, непригодна для применения. Вследствие этого возникает необходимость использовать иные подходы для построения модели прогнозирования исследуемых временных рядов $x(t), y(t), t = 0, \dots, n-1$.

В (Ганичева, 2021) описано моделирование работы автомастерской на основе системы уравнений вида

$$\begin{cases} x' = ay + cx, \\ y' = bx + dy. \end{cases} \quad (2)$$

Здесь $x = x(t)$ — расходы на ремонт автомобилей; $y = y(t)$ — доходы от ремонта автомобилей; t — время; a, b, c, d — коэффициенты пропорциональности.

Мы предлагаем воспользоваться данным математическим аппаратом, т.е. системой уравнений (1) для построения модели прогнозирования расходов и доходов СФР по ОСС на ВНиМ. Исходя из этого, будем полагать в дальнейшем, что в системе (2) $x = x(t)$ и $y = y(t)$ — соответственно расходы и доходы ФСС по ОСС на ВНиМ.

Система (2), согласно (Краснов, Киселев, Макаренко, 1978), представляет собой линейную однородную систему второго порядка обыкновенных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами. Достоинством этой системы является возможность получения ее точного аналитического решения в общем виде. Это решение, наряду с общим решением задачи Коши для данной системы, представлено нами в Приложении.

Возможный подход к применению системы (2) для построения модели прогнозирования может заключаться, на наш взгляд, в том, чтобы использовать общее решение данной системы (либо общее решение задачи Коши для данной системы) в качестве аддитивных детерминированных трендов в спецификации модели временных рядов $x(t), y(t), t = 0, \dots, n-1$, а именно:

$$\begin{cases} x(t) = f(t; a, b, c, d, C_1, C_2) + u_1(t), \\ y(t) = \varphi(t; a, b, c, d, C_1, C_2) + u_2(t). \end{cases} \quad (3)$$

Здесь пара функций $f(t; a, b, c, d, C_1, C_2), \varphi(t; a, b, c, d, C_1, C_2)$ есть общее решение системы (2) (конкретный вид указанных функций зависит от значения параметра a , соотношения параметров a, b, c, d и приведен в Приложении в виде совокупности из пяти формул (П6), (П9), (П11), (П13) и (П15); C_1, C_2 — произвольные постоянные.

Следует заметить, что описанный подход к использованию дифференциальных уравнений в прикладных социально-экономических исследованиях является достаточно распространенным. Он применялся, в частности, в (Хавинсон, 2017) при построении модели численности занятых

по возрастным группам и в (Беспалько и др., 2018) — при построении модели динамики народонаселения Тверской области.

Для оценивания параметров в модели (3) используем МНК, а именно — значения данных параметров, по аналогии с (Хавинсон, 2017), выберем таким образом, чтобы минимизировалась функция

$$P(a, b, c, d, C_1, C_2) = \sum_{t=0}^{n-1} (x(t) - f(t; a, b, c, d, C_1, C_2))^2 + \sum_{t=0}^{n-1} (y(t) - \varphi(t; a, b, c, d, C_1, C_2))^2. \quad (4)$$

Здесь $x(t)$, $y(t)$, $t = 0, \dots, n-1$ — исследуемые временные ряды (фактические данные, т.е. данные из табл. 1).

После оценивания параметров a, b, c, d, C_1, C_2 в качестве модели-претендента для дальнейшего использования будет выбрана одна из пяти моделей вида (3) (соответствующих пяти различным «частным» формам (П6), (П9), (П11), (П13), (П15) общего решения системы (2)), а именно — та, которая будет иметь максимальную точность.

Однако процесс численной минимизации функции (4) оказался неустойчивым и, вследствие этого, не дал приемлемого результата. Это обусловлено, в частности, тем, что компонента φ общего решения системы (2) является разрывной функцией от параметра a (формулы (П6), (П9) и (П11)) либо от параметров c и d (формула (П13)). К аналогичному отрицательному результату приходим и в том случае, когда в модели (3) вместо общего решения системы (2) используется общее решение задачи Коши для данной системы.

Выход из данной ситуации может заключаться в замене параметров a, b, c, d, C_1, C_2 в общем решении системы (2) (т.е. функций f и φ) на обобщенные параметры, относительно которых эти функции будут непрерывными. Проведя указанное действие, в итоге получаем следующие три спецификации модели исследуемых временных рядов:

$$\begin{cases} x(t) = (p + qt)e^{Lt} + u_1(t), \\ y(t) = (r + st)e^{Lt} + u_2(t); \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} x(t) = pe^{L_1 t} + qe^{L_2 t} + u_1(t), \\ y(t) = re^{L_1 t} + se^{L_2 t} + u_2(t); \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} x(t) = e^{Lt}(p \cos gt + q \sin gt) + u_1(t), \\ y(t) = e^{Lt}(r \cos gt + s \sin gt) + u_2(t), \end{cases} \quad (7)$$

где $p, q, r, s, g, L, L_1, L_2$ — параметры, подлежащие оцениванию.

Модели (5)–(7) по эконометрической терминологии являются внутренне нелинейными, т.е. не могут быть сведены к линейным моделям с помощью различных преобразований и замены переменных.

Оценим параметры данных моделей также с помощью МНК, т.е. будем выбирать их из условия минимума функций (сумм квадратов отклонений), аналогичных по виду с функцией (4).

Результаты оценивания с использованием ППП Microsoft Excel (инструмент анализа «Поиск решения») приведены в табл. 4. Там же для каждой модели (5)–(7) указано минимальное значение Σ_{min}^2 суммы квадратов отклонений фактических данных от расчетных (теоретических), соответствующее оцененным параметрам.

Как следует из данных табл. 4, среди моделей (5)–(7) с оцененными параметрами наилучшей по значению Σ_{min}^2 является модель (6). Исходя из этого, возьмем ее за основу для дальнейшего исследования.

Таблица 4. Оценки параметров моделей (5)–(7) и соответствующие им значения Σ_{min}^2

Модель	\hat{p}	\hat{q}	\hat{r}	\hat{s}	\hat{g}	\hat{L}	\hat{L}_1	\hat{L}_2	Σ_{min}^2
(5)	268,9	1,247	279,7	-1,863		0,0778			52682,9
(6)	139,6	148,7	179,3	121,4			0	0,1135	49711,3
(7)	283,5	0	264,1	0	0	0,0768			56606,9

Источник: составлено авторами.

Таким образом, согласно данным табл. 4 лучшая модель имеет вид

$$\begin{cases} \hat{x}(t) = \hat{p} + \hat{q}e^{Lt}, \\ \hat{y}(t) = \hat{r} + \hat{s}e^{Lt}, \end{cases}$$

или (заменяя, из соображений упрощения символической записи, L_2 на L)

$$\begin{cases} \hat{x}(t) = \hat{p} + \hat{q}e^{Lt}, \\ \hat{y}(t) = \hat{r} + \hat{s}e^{Lt}. \end{cases} \quad (8)$$

Здесь согласно данным табл. 4

$$\hat{p} = 139,6; \hat{q} = 148,7; \hat{r} = 179,3; \hat{s} = 121,4; \quad (9)$$

$$\hat{L} = 0,1135. \quad (10)$$

Модель (8) представляет собой векторную (двумерную) трендовую модель с единственной факторной переменной e^{Lt} .

Оценим теперь значимость модели (8) и оцененных параметров (9) (для параметра \hat{L} проверка значимости весьма затруднительна).

Сделать это можно следующим образом. Значение параметра \hat{L} (равное 0,1135) оставляем неизменным, а остальные параметры \hat{p} , \hat{q} , \hat{r} , \hat{s} варьируем (делаем переменными). Далее, используя ППП Microsoft Excel (инструмент анализа «Регрессия»), построим две регрессии, а именно — регрессии $x(t)$ и $y(t)$ на константу и экспоненту e^{Lt} (при $\hat{L} = 0,1135$). Результаты построения указанных регрессий приведены в табл. 5.

Оценим теперь качество лучшей модели (8)–(10). Качество модели определяется ее адекватностью исследуемому процессу и точностью (Бережная, Бережной, 2006). Для временного ряда $z(t)$ ($t = 0, \dots, n-1$) его модель $\hat{z}(t)$ ($t = 0, \dots, n-1$) считается адекватной, если остаточная компонента (остаточная последовательность, остаточный ряд) $e(t) = z(t) - \hat{z}(t)$ ($t = 0, \dots, n-1$) удовлетворяет свойствам случайной компоненты временного ряда (Экономико-математические методы ..., 2002; Бережная, Бережной, 2006): случайности колебаний уровней остаточной последовательности, соответствия распределения случайной компоненты нормальному закону распределения, равенству математического ожидания случайной компоненты нулю, независимости значений уровней случайной компоненты (отсутствие существенной автокорреляции в остаточной последовательности). Исходя из этого, адекватность модели (8)–(10) будем оценивать по остаточным рядам:

$$e_x(t) = x(t) - \hat{x}(t), e_y(t) = y(t) - \hat{y}(t), \quad t = 0, \dots, n-1. \quad (11)$$

Нами была выполнена проверка вышеописанных свойств у остаточных рядов (11) на основе критериев, описанных в (Бережная, Бережной, 2006; Прошин, Сидоров, 2022; Экономико-математические методы ..., 2002; Эконометрика ..., 2007). Результаты проверки для 5%-ного уровня значимости представлены в табл. 6. При этом использованы следующие обозначения: K — протяженность самой длинной серии; v — общее число серий; d_L и d_U — соответственно нижнее и верхнее пороговые значения статистики критерия Дарбина–Уотсона.

Как видно из данных табл. 6, остаточные ряды (11) удовлетворяют всем свойствам случайной компоненты временного ряда. Кроме того, коэффициент корреляции между ними равен 0,003, и при этом значение статистики критерия Стьюдента равно 0,01, а ее критическое значение равно 2,16 (для 5%-ного уровня значимости и числа степеней свободы, равном $n - 2 = 13$), откуда следует, что корреляция между остаточными рядами незначима. Следовательно, модель (8)–(10) адекватна.

Таблица 5. Результаты построения регрессий $x(t)$ и $y(t)$ на константу и экспоненту e^{Lt} (при $\hat{L} = 0,1135$)

Ряд	Коэффициент детерминации	Оценки параметров		p -значение	Значимость параметров ($\alpha = 0,05$)	Значимость уравнения ($\alpha = 0,05$)
$x(t)$	0,949	\hat{p}	139,6	0,00013978	Значим	Значимо (значимость $F = 8,3E-10$)
		\hat{q}	148,7	8,3E-10	Значим	
$y(t)$	0,927	\hat{r}	179,3	1,09996E-05	Значим	Значимо (значимость $F = 8,9E-09$)
		\hat{s}	121,4	8,9E-09	Значим	

Источник: составлено авторами.

Таблица 6. Результаты проверки свойств у остаточных рядов (11)

Свойство остаточного ряда (нулевая гипотеза)	Критерий проверки	Значение статистики критерия				Критическое значение статистики критерия ($\alpha = 0,05$)	Наличие свойства	
		Для ряда $e_x(t)$		Для ряда $e_y(t)$				
Случайность колебаний уровней	Критерий серий	K	3	K	4	7	Да	
		v	7	v	8	4		
Соответствие нормальному закону распределения	Шапиро–Уилка	0,946		0,967		0,881	Да	
Отсутствие автокорреляции	Дарбина–Уотсона	1,9		1,56		d_L	1,08	Да
						d_U	1,36	
Равенство математического ожидания нулю	Стьюдента	1,3E–05		1,6E–05		2,14	Да	

Источник: составлено авторами.

Оценим теперь точность модели (8)–(10).

Для временного ряда $\hat{z}(t)$ ($t = 0, \dots, n - 1$) одним из наиболее распространенных показателей точности его модели $z(t)$ ($t = 0, \dots, n - 1$), согласно (Экономико-математические методы..., 2002), является средняя относительная ошибка аппроксимации:

$$\varepsilon = \frac{1}{n} \sum_{t=0}^{n-1} |(z(t) - \hat{z}(t)) / z(t)| \times 100\% . \tag{12}$$

Принято считать, что модель $\hat{z}(t)$ ($t = 0, \dots, n - 1$) обладает приемлемой точностью, если значение ошибки (12) для этой модели не превышает определенного порога $\varepsilon_{\text{пор}}$ (Хавинсон, 2017). Вместе с тем, судя по ряду литературных источников, в настоящее время величина этого порога строго не определена и варьирует в достаточно широких пределах. Так, например, приводятся следующие значения $\varepsilon_{\text{пор}}$: 10% (Хавинсон, 2017); 5–7% (Эконометрика ..., 2007); 20% (Бердникова, Осенняя, Хахук, 2021). Наряду с этим, в (Льюис, 1986) представлены типичные значения ошибки аппроксимации ε и их интерпретация (табл. 7).

В дальнейшем для определенности при оценке точности моделей будем придерживаться табл. 7.

Для модели (8)–(10) ошибки аппроксимации (12) оказались равны

$$\varepsilon_x = 5,28\%; \quad \varepsilon_y = 7,65\% . \tag{13}$$

В соответствии с табл. 7 значения ошибок (13) свидетельствуют о высокой точности модели (8)–(10). На рис. 2, 3 представлены результаты аппроксимации по модели (8)–(10) расходов и доходов ФСС по ОСС на ВНиМ за период 2008–2022 гг.

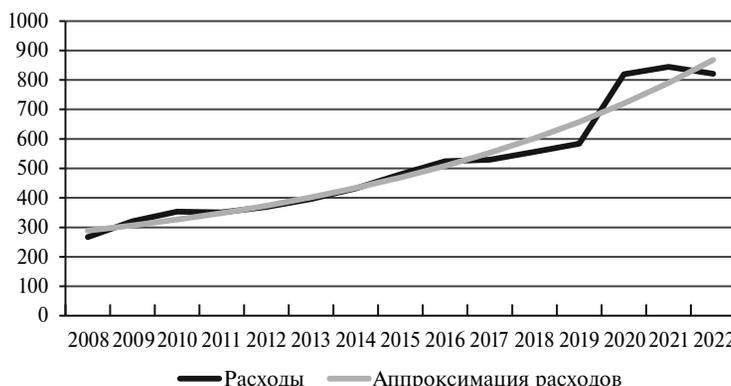


Рис. 2. Расходы ФСС по ОСС на ВНиМ за период 2008–2022 гг. и их аппроксимация по модели (8)–(10), млрд руб.

Источник: составлено авторами.

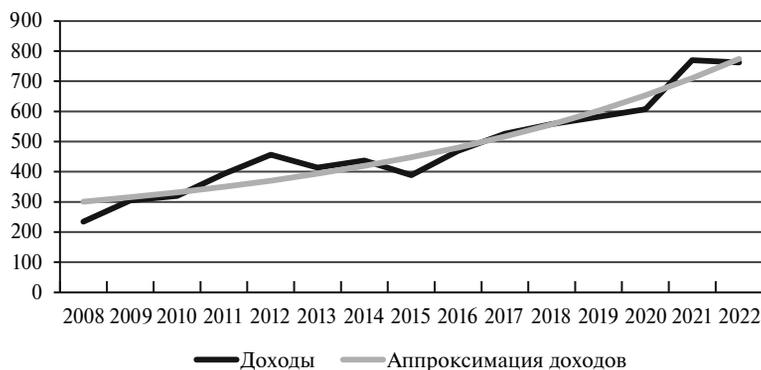


Рис. 3. Доходы ФСС по ОСС на ВНиМ за период 2008–2022 гг. и их аппроксимация по модели (8)–(10), млрд руб.

Источник: составлено авторами.

Таблица 8. Результаты построения регрессий $x(t)$ и $y(t)$ на константу и экспоненту $e^{\hat{L}t}$ (при $\hat{L} = 0,1135$) по обучающей выборке

Ряд	Коэффициент детерминации	Оценки параметров		p-значение	Значимость параметров ($\alpha = 0,05$)	Значимость уравнения ($\alpha = 0,05$)
		\hat{p}	\hat{q}			
$x(t)$	0,959	\hat{p}	180,4	1,15E–06	Значим	Значимо (значимость $F = 2,7E-08$)
		\hat{q}	124,1	2,74E–08	Значим	
$y(t)$	0,844	\hat{r}	184,9	0,00034	Значим	Значимо (значимость $F = 2,4E-05$)
		\hat{s}	118,5	2,42E–05	Значим	

Источник: составлено авторами.

Таблица 9. Результаты ретропрогноза на тестовую выборку

Год	Номер года, t	Расходы $x(t)$, млрд руб.		Доходы $y(t)$, млрд руб.	
		Факт	Прогноз	Факт	Прогноз
2020	12	819,6	664,8	607,4	647,5
2021	13	844,2	723,1	770,0	703,1
2022	14	820,8	788,3	762,6	765,4

Источник: составлено авторами.

Между тем, поскольку данная модель предназначена для прогнозирования, то целесообразно оценить ее прогнозную точность, используя ретропрогноз. Для этого разделим каждый исходный временной ряд на две части: на обучающую (соответствующую значениям $t = 0, \dots, 11$) и тестовую (соответствующую значениям $t = 12, 13, 14$) выборки. Далее, полагая в модели (8) значение параметра \hat{L} (равное 0,1135) неизменным, варьируем (считаем переменными) остальные параметры \hat{p} , \hat{q} , \hat{r} , \hat{s} и находим их оценки по обучающей выборке. Для этого, используя ППП Microsoft Excel (инструмент анализа «Регрессия»), строим регрессии $x(t)$ и $y(t)$ на константу и экспоненту $e^{\hat{L}t}$ (при $L = 0,1135$) по обучающей выборке. Результаты построения указанных регрессий приведены в табл. 8. В табл. 9 приведены результаты ретропрогноза на тестовую выборку.

Средние относительные ошибки ретропрогнозов, вычисленные по формуле аналогичной (12) для $n = 3$ (объем тестовой выборки) и $t = 12, 13, 14$, оказались равны

$$\varepsilon_{rx} = 12,4\%; \varepsilon_{ry} = 5,2\%. \quad (14)$$

Таким образом, построенная модель (8)–(10) является адекватной, имеет высокую точность аппроксимации (формула (13)) и достаточно высокую точность ретропрогноза (формула (14)), а значит, может быть использована для прогнозирования расходов и доходов СФР по ОСС на ВНиМ на период упреждения.

Результаты прогнозирования. Результаты прогнозирования расходов и доходов СФР по ОСС на ВНиМ по модели (8)–(10) для периода упреждения прогноза в три года представлены в табл. 10.

Таблица 10. Прогнозы расходов и доходов СФР по ОСС на ВНиМ по модели (8)–(10)

Год	Номер года, t	Прогноз	
		Расходы $\hat{x}(t)$, млрд руб.	Доходы $\hat{y}(t)$, млрд руб.
2023	15	955,9	845,6
2024	16	1054,0	925,7
2025	17	1164,0	1015,4

Источник: составлено авторами.

Как следует из данных табл. 10, в ближайшей перспективе ожидаемые значения доходов СФР по ОСС на ВНиМ будут значительно меньше расходов. Разница между ними, согласно полученным прогнозам, составит: 110,3 млрд руб. — в 2023 г.; 128,3 млрд руб. — в 2024 г. и 148,6 млрд руб. — в 2025 г. Это дает определенные основания для формирования соответствующей финансовой стратегии СФР по ОСС на ВНиМ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Построена модель прогнозирования доходов и расходов СФР по ОСС на ВНиМ на основе линейной однородной системы второго порядка обыкновенных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами. Полученная модель прошла проверку на адекватность и при этом имеет высокую точность аппроксимации и достаточно высокую точность ретропрогноза. На ее основе были получены прогнозы доходов и расходов СФР по ОСС на ВНиМ, позволившие оценить сбалансированность бюджета СФР по данному виду страхования в ближайшей перспективе. Согласно полученным прогнозам в 2023–2025 гг. по ОСС на ВНиМ ожидается превышение обязательств СФР над их финансовым обеспечением.

Для устранения (уменьшения) потенциального дисбаланса бюджета СФР по ОСС на ВНиМ на горизонте прогнозирования (2023–2025 гг.), на наш взгляд, первоочередным является *изыскание внутренних резервов* СФР. В этой связи представляется рациональной, в частности, реализация следующих мероприятий. Во-первых, включить пособия по временной нетрудоспособности в перечень доходов, не подлежащих (освобожденных) налогообложению, путем внесения соответствующих изменений в ст. 217 Налогового кодекса РФ при одновременном установлении пониженного на 13% размера компенсации утраченного дохода. Во-вторых, предусмотреть в бюджетировании пособия по уходу за ребенком до 1,5 лет два источника формирования финансовых ресурсов: первый — Федеральный бюджет в части выплаты базового размера пособия, гарантированного всем в соответствии с законодательством, второй — ОСС на ВНиМ в части доплаты до 40% утраченного заработка.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Дана линейная однородная система второго порядка обыкновенных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами:

$$\begin{cases} x' = ay + cx, \\ y' = bx + dy. \end{cases} \quad (П1)$$

Здесь $x = x(t)$, $y = y(t)$ — некоторые дифференцируемые функции; t — время; a, b, c, d — коэффициенты пропорциональности. Требуется найти общее решение данной системы.

Процесс отыскания решения разобьем на два случая — когда коэффициент $a \neq 0$ и когда коэффициент $a = 0$. В случае когда коэффициент $a \neq 0$, решение системы (П1) может быть найдено методом исключения (Краснов, Киселев, Макаренко, 1978). Согласно данному методу продифференцируем по переменной t первое уравнение системы (П1). Затем, используя уравнения все той же системы (П1), исключим из правой части полученного уравнения переменную y и ее производную. Выполняя последовательно данные действия, будем иметь:

$$\begin{aligned} x'' &= ay' + cx'; & x'' &= a(bx + dy) + cx'; & x'' &= a(bx + d(x' - cx) / a) + cx'; \\ x'' &= abx + d(x' - cx) + cx'; & x'' &= abx + dx' - dcx + cx'; & x'' &= (c + d)x' + (ab - cd)x. \end{aligned}$$

Отсюда окончательно получаем уравнение

$$x'' - (c+d)x' + (cd-ab)x = 0, \quad (\text{П2})$$

которое представляет собой линейное однородное дифференциальное уравнение второго порядка с постоянными коэффициентами. Соответствующее ему (равно как и системе (П1)) характеристическое уравнение имеет вид

$$\lambda^2 - (c+d)\lambda + cd - ab = 0, \quad (\text{П3})$$

где λ — неизвестное число.

Как известно из теории дифференциальных уравнений (Краснов, Киселев, Макаренко, 1978), вид общего решения уравнения (П2) зависит от корней характеристического уравнения (П3). При этом принципиально возможны три разных случая, которые различаются между собой знаком дискриминанта

$$D = (c+d)^2 - 4(cd-ab) \quad (\text{П4})$$

уравнения (П3).

Случай 1. Дискриминант (П4) положительный. Тогда корни $\lambda_1 = 0,5(c+d+\sqrt{D})$, $\lambda_2 = 0,5(c+d-\sqrt{D})$ уравнения (П3) являются действительными различными числами, а общее решение уравнения (П2) имеет вид $x(t) = C_1 e^{\lambda_1 t} + C_2 e^{\lambda_2 t}$. Здесь C_1, C_2 — произвольные постоянные. При этом вторая компонента решения системы (П1) (функция $y(t)$) получается согласно первому уравнению системы (П1) по формуле

$$y(t) = (x'(t) - cx(t)) / a. \quad (\text{П5})$$

Таким образом, в рассматриваемом случае общее решение системы (П1) имеет вид

$$\begin{cases} x(t) = C_1 e^{\lambda_1 t} + C_2 e^{\lambda_2 t}, \\ y(t) = \frac{\lambda_1 - c}{a} C_1 e^{\lambda_1 t} + \frac{\lambda_2 - c}{a} C_2 e^{\lambda_2 t}. \end{cases} \quad (\text{П6})$$

Если для системы (П1) решается задача Коши с начальными условиями

$$x(0) = x_0, \quad y(0) = y_0, \quad (\text{П7})$$

то постоянные в (П6), выбираемые в соответствии с этими начальными условиями, будут таковы:

$$C_1 = ((c - \lambda_2)x_0 + ay_0) / (\lambda_1 - \lambda_2), \quad C_2 = ((\lambda_1 - c)x_0 - ay_0) / (\lambda_1 - \lambda_2). \quad (\text{П8})$$

Случай 2. Дискриминант (П4) равен нулю. Тогда уравнение (П3) имеет два одинаковых действительных корня $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda = 0,5(c+d)$, а общее решение уравнения (П2) имеет вид $x(t) = (C_1 + C_2 t)e^{\lambda t}$. Отсюда, с учетом (П5), получаем общее решение системы (П1):

$$\begin{cases} x(t) = (C_1 + C_2 t)e^{\lambda t}, \\ y(t) = [C_2 + (\lambda - c)(C_1 + C_2 t)]e^{\lambda t} / a. \end{cases} \quad (\text{П9})$$

Если для системы (П1) решается задача Коши с начальными условиями (П7), то постоянные в (П9), выбираемые в соответствии с этими начальными условиями, определяются по формуле:

$$C_1 = x_0, \quad C_2 = ay_0 - (\lambda - c)x_0. \quad (\text{П10})$$

Случай 3. Дискриминант (П4) отрицательный. Тогда корни характеристического уравнения (П3) являются комплексными числами $\lambda_{1,2} = 0,5(c+d) \pm 0,5i\sqrt{-D}$, а общее решение уравнения (П2) имеет вид

$$x(t) = e^{0,5(c+d)t} (C_1 \cos(0,5t\sqrt{-D}) + C_2 \sin(0,5t\sqrt{-D})).$$

Отсюда, с учетом (П5), получаем общее решение системы (П1):

$$\begin{cases} x(t) = e^{0,5(c+d)t} (C_1 \cos(0,5t\sqrt{-D}) + C_2 \sin(0,5t\sqrt{-D})), \\ y(t) = \frac{1}{2a} e^{0,5(c+d)t} \left[((d-c)C_1 + \sqrt{-D}C_2) \cos(0,5t\sqrt{-D}) + ((d-c)C_2 - \sqrt{-D}C_1) \sin(0,5t\sqrt{-D}) \right]. \end{cases} \quad (\text{П11})$$

Если для системы (П1) решается задача Коши с начальными условиями (П7), то постоянные в (П11), выбираемые в соответствии с этими начальными условиями, будут равны

$$C_1 = x_0, \quad C_2 = (2ay_0 + (c-d)x_0) / \sqrt{-D}. \quad (\text{П12})$$

В случае когда коэффициент $a = 0$, решение системы (П1) может быть получено последовательным интегрированием сначала первого, а затем второго уравнения системы (П1) (с учетом полученного решения первого уравнения). При этом возможны два случая — $c \neq d$ и $c = d$.

Выполнив указанные действия, получаем следующее решение системы (П1), когда $a = 0$ и $c \neq d$:

$$\begin{cases} x(t) = C_1 e^{ct}, \\ y(t) = (bC_1 / (c - d)) e^{ct} + C_2 e^{dt}. \end{cases} \quad (\text{П13})$$

Если для системы (П1) решается задача Коши с начальными условиями (П7), то постоянные в (П13), выбираемые в соответствии с этими начальными условиями, будут равны

$$C_1 = x_0, \quad C_2 = y_0 - bx_0 / (c - d). \quad (\text{П14})$$

Для случая когда $a = 0$ и $c = d$, решение системы (П1) будет иметь вид

$$\begin{cases} x(t) = C_1 e^{ct}, \\ y(t) = (bC_1 t + C_2) e^{ct}. \end{cases} \quad (\text{П15})$$

Если для системы (П1) решается задача Коши с начальными условиями (П7), то постоянные в (П15), выбираемые в соответствии с этими начальными условиями, будут равны

$$C_1 = x_0, \quad C_2 = y_0. \quad (\text{П16})$$

Таким образом, общее решение системы (П1), а также общее решение задачи Коши для данной системы представимо в виде совокупности соотношений (П6)–(П16).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

- Алексеева Е.В.** (2018). Современное состояние обязательного социального страхования. Всероссийская научно-практическая конференция (с международным участием) «Актуальные проблемы интеграции науки и образования в регионе». Бузулук: БНТИ (филиал ОГУ). С. 180–184. [Alekseeva E.V. (2018). The current state of compulsory social insurance. *All-russian scientific-practical conference (with international participation) "Actual problems of the integration of science and education in the region"*. Buzuluk: Buzuluk Humanit. & Technolog. Inst., 180–184 (in Russian).]
- Бердникова В.Н., Осенняя А.В., Хахук Б.А.** (2021). Построение качественной модели оценки кадастровой стоимости недвижимости // *Экономика и математические методы*. Т. 57. № 2. С. 73–84. DOI: 10.31857/S042473880014895-3 [Berdnikova V.N., Osennyaya A.V., Khakhuk B.A. (2021). Construction of a qualitative model for assessing the cadastral value of real estate. *Economics and Mathematical Methods*, 57, 2, 73–84. DOI: 10.31857/S042473880014895-3 (in Russian).]
- Бережная Е.В., Бережной В.И.** (2006). Математические методы моделирования экономических систем. Учеб. пособие. 2-е изд. М.: Финансы и статистика. 432 с. [Berezhnaya E.V., Berezhnoi V.I. (2006). *Mathematical methods for modeling economic systems: Schoolbook*. 2nd ed. Moscow: Finance & Statistics. 432 p. (in Russian).]
- Беспалько Е.В., Кудинов А.Н., Михеев С.А., Редчиц В.П., Рыжиков В.Н., Цветков В.П., Цветков И.В.** (2018). Динамика народонаселения Тверской области // *Вестник ТвГУ. Серия «Экономика и управление»*. № 1. С. 81–91. [Bespalko E.V., Kudinov A.N., Mikheev S.A., Redchitch V.P., Ryzikov V.N., Tsvetkov V.P., Tsvetkov I.V. (2018). Population dynamics in Tver Region. *Bulletin of TvSU. Series "Economics and Management"*, 1, 81–91 (in Russian).]
- Ганичева А.В.** (2021). Основы теории функции комплексной переменной. Операционное исчисление. СПб.: Лань. 148 с. [Ganicheva A.V. (2021). *Fundamentals of theory of functions of a complex variable. Operational calculus*. Saint Petersburg: Lan'. 148 p. (in Russian).]
- Гусейханова С.С.** (2019). Анализ и оценка деятельности Фонда социального страхования РФ // *Экономика и бизнес: теория и практика*. № 12-1 (58). С. 121–124. DOI: 10.24411/2411-0450-2019-11455 [Guseykhanova S.S. (2019). Analysis and evaluation of the activities of the social insurance fund of the Russian Federation. *Economy and Business: Theory and Practice*, 12-1 (58), 121–124. DOI: 10.24411/2411-0450-2019-11455 (in Russian).]
- Кацко И.А., Яроменко Н.Н., Задорожный Д.А.** (2023). Алгоритм построения диагностики моделей векторной авторегрессии или VAR-моделей в программном пакете GRETЛ // *Экономика и предпринимательство*. № 5. С. 1185–1191. [Katsko I.A., Yaromenko N.N., Zadorozhny D.A. (2023). Algorithm for constructing diagnostics of vector autoregression models or VAR models in the GRETЛ software package. *Economics and Entrepreneurship*, 5, 1185–1191 (in Russian).]
- Краснов М.Л., Киселев А.И., Макаренко Г.И.** (1978). Сборник задач по обыкновенным дифференциальным уравнениям: Учеб. пособие для вузов. 3-е изд. М.: Высшая школа. 287 с. [Krasnov M.L., Kiselev A.I., Makarenko G.I. (1978). *Collection of problems on ordinary differential equations: A textbook for universities*. 3rd ed. Moscow: Higher School. 287 p. (in Russian).]

- Makarenko G.I.** (1978). *Problem book on ordinary differential equations: Schoolbook*. 3rd ed. Moscow: Vysshaja Shkola. 287 p. (in Russian).]
- Льюис К.Д.** (1986). Методы прогнозирования экономических показателей. Пер. с англ. и предисл. Е.З. Демиденко. М.: Финансы и статистика. 133 с. [**Lewis C.D.** (1986). *Industrial and business forecasting methods*. Transl. from English and preface E.Z. Demidenko. Moscow: Finansy i statistika. 133 p. (in Russian).]
- Магнус Я.Р., Катышев П.К., Пересецкий А.А.** (2007). Эконометрика. Начальный курс: Учебник. 8-изд. М.: Дело. 504 с. [**Magnus Y.R., Katyshev P.K., Peresetsky A.A.** (2007). *Econometrics. Beginning course: Textbook*. 8th ed. Moscow: Delo. 504 p. (in Russian).]
- Малютина М.В., Дырченкова Ю.А.** (2021). Анализ состава и структуры доходов и расходов Фонда социального страхования РФ // *Современная научная мысль*. № 3. С. 175–183. DOI: 10.24412/2308-264X-2021-3-175-183 [**Malyutina M.V., Dyrchekova Y.A.** (2021). Analysis of the composition and structure of income and expenses of the social insurance fund of the Russian Federation. *Modern Scientific Thought*, 3, 175–183. DOI: 10.24412/2308-264X-2021-3-175-183 (in Russian).]
- Мигранова Л.А., Роик В.Д.** (2020). Социальное страхование в России: состояние, современные вызовы и ответы на них // *Научное обозрение. Серия 1: Экономика и право*. № 1–2. С. 75–95. DOI: 10.26653/2076-4650-2020-1-2-07 [**Migranov L.A., Roik V.D.** (2020). Social insurance in Russia: State, current challenges and responses to them. *Scientific Review. Series 1. Economics and Law*, 1–2, 75–95. DOI: 10.26653/2076-4650-2020-1-2-07 (in Russian).]
- Подвойский Г.Л.** (2022). Вопросы воспроизводства человеческого потенциала в условиях новых вызовов // *Мир новой экономики*. Т. 16. № 3. С. 63–74. DOI: 10.26794/2220-6469-2022-16-3-63-74 [**Podvoisky G.L.** (2022). Human potential reproduction in the context of new challenges. *The World of New Economy*, 16, 3, 63–74. DOI: 10.26794/2220-6469-2022-16-3-63-74 (in Russian).]
- Прошин В.И., Сидоров В.Г.** (2022). Анализ результатов измерений в экспериментальной физике. Учеб. пособие. СПб.: Лань. 172 с. [**Proshin V.I., Sidorov V.G.** (2022). *Analysis of measurement results in experimental physics. Schoolbook*. Saint Petersburg: Lan'. 172 p. (in Russian).]
- Рябичева О.И., Гаджиева Л.Э.** (2020). Современное состояние и перспективы развития системы обязательного социального страхования в России // *Экономика и управление: проблемы, решения*. Т. 5. № 11 (107). С. 104–107. DOI: 10.36871/ek.up.p.r.2020.11.05.018 [**Ryabicheva O.I., Gadzhieva L.E.** (2020). Current state and prospects for development of the mandatory social insurance system in Russia. *Economics and Management: Problems, Solutions*, 5, 11 (107), 104–107. DOI: 10.36871/ek.up.p.r.2020.11.05.018 (in Russian).]
- Сасаев Н.И.** (2020). Первичная оценка экономической эффективности стратегических направлений развития газовой отрасли России // *Экономика и математические методы*. Т. 56. № 2. С. 52–65. DOI: 10.31857/S042473880009219-9 [**Sasaev N.I.** (2020). Primary assessment of the economic effectiveness of strategic directions for the development of the gas industry in Russia. *Economics and Mathematical Methods*, 56, 2, 52–65. DOI: 10.31857/S042473880009219-9 (in Russian).]
- Хавинсон М.Ю.** (2017). Моделирование нелинейной динамики уровня занятости в регионе (на примере регионов юга дальнего востока России) // *Вестник Пермского университета. Экономика*. Т. 12. № 4. С. 575–591. DOI: 10.17072/1994-9960-2017-4-575-591 [**Khavinson M. Yu.** (2017). Modeling of nonlinear dynamics of employment rate in a region (in the case study of the regions of the south of the Russian Far East). *Perm University Herald. Economy*, 12, 4, 575–591. DOI: 10.17072/1994-9960-2017-4-575-591 (in Russian).]
- Эконометрика: учебник (2007). И.И. Елисеева (общ. ред.). 2-е изд. М.: Финансы и статистика. 576 с. [*Econometrics: Schoolbook* (2007). I.I. Eliseeva (ed). 2nd ed. Moscow: Finansy i statistika. 576 p. (in Russian).]
- Экономико-математические методы и прикладные модели. Учеб. пособие для вузов (2002). В.В. Федосеев (общ. ред.). М.: ЮНИТИ. 391 с. [*Economic and mathematical methods and applied models: Schoolbook* (2002). V.V. Fedoseev (ed.). Moscow: YUNITI. 391 p. (in Russian).]
- Ali M., Egbetokun A., Memon M.H.** (2018). Human capital, social capabilities and economic growth. *Economies*, 6 (1), 1–18. DOI: 10.3390/economies6010002
- Kamilova N.** (2022). Human capital as the main factor of innovative development of the modern economy. *Web of Scholars: Multidimensional Research Journal*, 1, 5, 136–140. DOI: 10.17605/OSF.IO/FJ2DV
- Ma J., Montenegro-Marin C.E., Crespo R.G.** (2021). Effective high-quality economic growth based on human capital structure. *Expert Systems*, e12863. DOI: 10.1111/exsy.12863
- Wang S., Lin X., Xiao H., Bu T., Li Y.** (2022). Empirical study on human capital, economic growth and sustainable development: Taking Shandong province as an example. *Sustainability*, 14 (12), 7221. DOI: 10.3390/su14127221
- Zhou D., Huang M.** (2019). The research on coupling level difference and path of human capital and economic growth in China's five urban agglomerations. *Atlantis Press. Advances in Economics, Business and Management Research, Proceedings of the 2nd International Conference on Economy, Management and Entrepreneurship (ICOEME2019)*, 85, 223–234. DOI: 10.2991/icoeme-19.2019.44

Forecasting income and expenses of the Social Fund of Russia on compulsory social insurance in case of temporary disability and in connection with motherhood

© 2024 V.A. Udod, O.V. Kasacheva

V.A. Udod,

National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia; e-mail: pr.udod@mail.ru

O.V. Kasacheva,

LLC Gazprom transgaz Tomsk, Tomsk, Russia; e-mail: ovkasacheva@mail.ru

Received 17.01.2023

Abstract. The article provides a brief description of the activities of the Social Insurance Fund of the Russian Federation (SIFR) until its merger (January 1, 2023) with the Pension Fund of the Russian Federation into the unified Social Fund of Russia (SFR). The object of the study was compulsory social insurance in case of temporary disability and in connection with maternity, and the subject of the study was an evaluation of the balance in the short term of the SFR budget for this type of insurance. A mathematical model is proposed for forecasting the income and expenses of the SFR for this type of insurance. To construct the mathematical model the data from reports on the implementation of the SIFR budget for the periods from 2008 to 2022 was used. A second-order linear homogeneous system of ordinary differential equations with constant coefficients was used as the basic mathematical apparatus. The model obtained was tested for adequacy. At the same time the model demonstrated high approximation accuracy and good retro-forecast accuracy. Based on the constructed model, a forecast of the indicated expenses and incomes for 2023–2025 was designed, from which it follows that in a given period, expenses will exceed incomes. Based on the results obtained, some recommendations are given to eliminate (reduce) the potential destabilization of the SFR budget for this type of insurance.

Keywords: forecasting model, income and expenses, compulsory social insurance, temporary disability, motherhood, budget, payments, benefits.

JEL Classification: C32, I13.

UDC: 369.

For reference: **Udod V.A., Kasacheva O.V.** (2024). Forecasting income and expenses of the Social Fund of Russia on compulsory social insurance in case of temporary disability and in connection with motherhood. *Economics and Mathematical Methods*, 60, 2, 67–79. DOI: 10.31857/S0424738824020067 (in Russian).

Перспективы развития обрабатывающих производств в Республике Башкортостан в новых экономических условиях

© 2024 г. Д.А. Гайнанов, Р.Ф. Гатауллин, С.Ш. Аслаева

Д.А. Гайнанов,

Институт социально-экономических исследований, УФИЦ РАН, Уфа; e-mail: 2d2@inbox.ru

Р.Ф. Гатауллин,

Институт социально-экономических исследований, УФИЦ РАН, Уфа;

e-mail: gataullin.r2011@yandex.ru

С.Ш. Аслаева,

Институт социально-экономических исследований, УФИЦ РАН, Уфа; e-mail: salima2006A@mail.ru

Поступила в редакцию 30.06.2023

Данное исследование выполнено в рамках государственного задания № 075-01134-23-00 на 2023 г. и на плановый период 2024 и 2025 г.

Аннотация. В настоящее время обрабатывающие производства страны формируют 16% ВВП, обеспечивая занятость около 10 млн человек. В новых экономических реалиях опережающий рост обрабатывающей промышленности определен в качестве одной из ключевых задач экономики России. Целью исследования является определение перспектив развития видов экономической деятельности (ВЭД) обрабатывающих производств в Республике Башкортостан на основе специализации, локализации производства, уровня значимости (национального и локального) и технологического развития. Для оценки фактического материала использовались статистический, эконометрический и графический методы. При определении территориальной специализации использовались методы оценки локализации и специализации отраслей. Результаты: 1) выполнен анализ и прогноз развития ведущих и имеющих потенциал роста обрабатывающих производств системообразующих предприятий Республики Башкортостан; 2) определены пространственные аспекты размещения и отраслевой структуры обрабатывающих производств на территории Республики Башкортостан. Выводы: в регионе прогнозируется структурная трансформация обрабатывающих производств, происходит перенаправление развития от ресурсных к высокотехнологичным ВЭД. Преобладающее большинство обрабатывающих производств, присутствующих в данном регионе, относится к среднему и высокому технологичному сектору и обладают значительным потенциалом дальнейшего развития.

Ключевые слова: виды экономической деятельности, высокотехнологичный сектор, коэффициенты локализации, национальная и локальная значимость, прогноз, пространственное развитие, региональная специализация.

Классификация JEL: C52, C40, L52, O21.

УДК: 332.1(410.57), 338.45.

Для цитирования: **Гайнанов Д.А., Гатауллин Р.Ф., Аслаева С.Ш.** (2024). Перспективы развития обрабатывающих производств в Республике Башкортостан в новых экономических условиях // *Экономика и математические методы*. Т. 60. № 2. С. 80–91. DOI: 10.31857/S0424738824020079

ВВЕДЕНИЕ

Обрабатывающие производства являются одной из движущих сил устойчивого роста экономики и технического уровня страны, условием обеспечения национальной безопасности (Сибирская, Овешникова, Шакирова, 2021, с. 75–76). По данным МВФ, который совместно с ООН и Всемирным банком ежегодно составляет рейтинги стран по объему производства ВВП, в 2022 г. Российская Федерация заняла девятое место в мире (Белый, 2023), а ее ВВП составил 151 455 млрд руб. По объему промышленности Российская Федерация заняла восьмое место.

Президент РФ В.В. Путин на заседании Совета по стратегическому развитию и национальным проектам определил укрепление технологического суверенитета и опережающий рост обрабатывающей промышленности в числе ключевых задач на 2023 г.¹

Проблемами развития обрабатывающих производств в регионах занимались российские ученые (см., например, работы (Смешко, Плотников, Вертакова, 2022; Гатауллин, Аслаева, Галикеев, 2018; Гордеев О., Гордеев С., 2007; Дудин и др., 2022; Кулагина и др., 2017; Трещевский, Пирогова, 2022; Растворцева, 2022; и др.)).

На уровень и динамику развития экономики регионов влияет промышленная специализация (Гребенкин, 2022, с. 69, 72). Обрабатывающие производства являются ядром промышленности, многие его виды в Республике Башкортостан позиционируются как отрасли локальной и национальной значимости, поэтому целью исследования является определение перспектив развития обрабатывающих производств в Республике Башкортостан с учетом специализации. Актуальность исследования заключается в необходимости использования преимуществ специализации и локализации производств в регионе в новой экономической модели развития России. В современных условиях специализация связана с замедлением развития наиболее благополучных и отставанием периферийных территорий при происходящей социально-экономической дифференциации регионов (Бондаренко, Губарев, 2020, с. 54). В 2007 г. департаментом Еврокомиссии утверждена концепция «умной специализации», которая устанавливает приоритеты конкурентного преимущества регионов и предлагает развивать экономику регионов в ограниченном наборе направлений. Методика исследования в данной статье основывается на тех же принципах определения функционального развития обрабатывающих производств с учетом уровня значимости и потенциала их развития, а также пространственного размещения предприятий.

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ

В работе был использован системный подход к исследованию проблем развития обрабатывающих производств с учетом специализации, экономической (национальной или локальной) и технологической (высокотехнологичной) значимости ВЭД. Для оценки фактического материала использовались статистический, эконометрический и графический методы. При определении территориальной специализации использовались методы оценки локализации и специализации отраслей, методы определения уровня значимости (национального и локального) и технологического развития производств. Комплексное применение методов позволило получить объективные, обоснованные, состоятельные и актуальные результаты. Информационную базу исследования представляли данные Росстата и Башстата. Анализ ВЭД выполнен на результатах деятельности обрабатывающих производств Республики Башкортостан за 2017–2022 гг.

Исследования перспектив развития обрабатывающих производств (ОП) проведены в следующей последовательности.

Выполнен сравнительный анализ текущей ситуации, выявлены проблемы и тенденции развития обрабатывающих производств Российской Федерации (РФ) и Республики Башкортостан (РБ). Далее исследованы функциональные и пространственные аспекты развития обрабатывающих производств в Республике Башкортостан.

Для оценки аспектов функционального развития территорий определены изменения показателей: увеличение объемов производства и численности занятых, инновационное совершенствование с последующей комплексной группировкой видов деятельности в статике (по объему производства) и динамике (по среднегодовым темпам роста). Специализация ВЭД обрабатывающих производств региона определена на основе коэффициентов локализации, которые представляют собой отношение удельного веса вида обрабатывающих производств в регионе к аналогичному показателю в стране. Если коэффициент локализации больше единицы ($LQ > 1$), то вид производства относится к зоне повышенной локализации, т.е. рассматриваемое производство локализовано в регионе выше среднего по стране (Гайнанов, Гатауллин, Аслаева, 2019, с. 69). Интенсивность локализации LIQ определена отношением коэффициентов локализации оборота к локализации занятых по видам ОП (Головин, 2022, с. 52). На основе полученных расчетов проведена

¹ «Об обеспечении научно-технологического развития Российской Федерации в целях достижения технологического суверенитета», Постановление от 22 февраля 2023 г. (<http://council.gov.ru/activity/documents/143029/>).

классификация предприятий Республики по ВЭД в соответствии с их значимостью: национальные и локальные, национальные, локальные (Абашкин, Гохберг, Еферин, 2021, с. 156), а также в соответствии с классификатором высокотехнологичных секторов экономики Росстата².

На основе эконометрического моделирования динамики производства с учетом имеющихся ресурсов и целесообразности разработана стратегия развития видов обрабатывающих производств в регионе. Тенденцию производства по видам можно отследить с помощью уравнения динамики $y_i = f(t_i) + \varepsilon_i$, где y_i — выровненные уровни динамического ряда; ε_i — случайное отклонение от тенденции (Mitsek, 2018).

Оценка аспектов пространственного развития, в широком смысле, включает исследования процессов освоения территории, размещения производств, расселение населения, улучшение экономико-географического положения поселений (Лаженцев, 2015, с. 22–24); а в узком — исследование пространственного развития промышленности по видам экономической деятельности (Макаров, 2021, с. 108). Для оценки пространственных аспектов развития обрабатывающих производств в регионе рассматривается их территориальное размещение с учетом полученных ранее функциональных характеристик.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Обрабатывающие производства играют ведущую роль как в экономике Российской Федерации, так и в экономике Республики Башкортостан. Рассмотрим тенденцию развития обрабатывающих производств в России и Башкортостане с 2005 г. на основе базисных темпов роста с учетом инфляции (рис. 1).

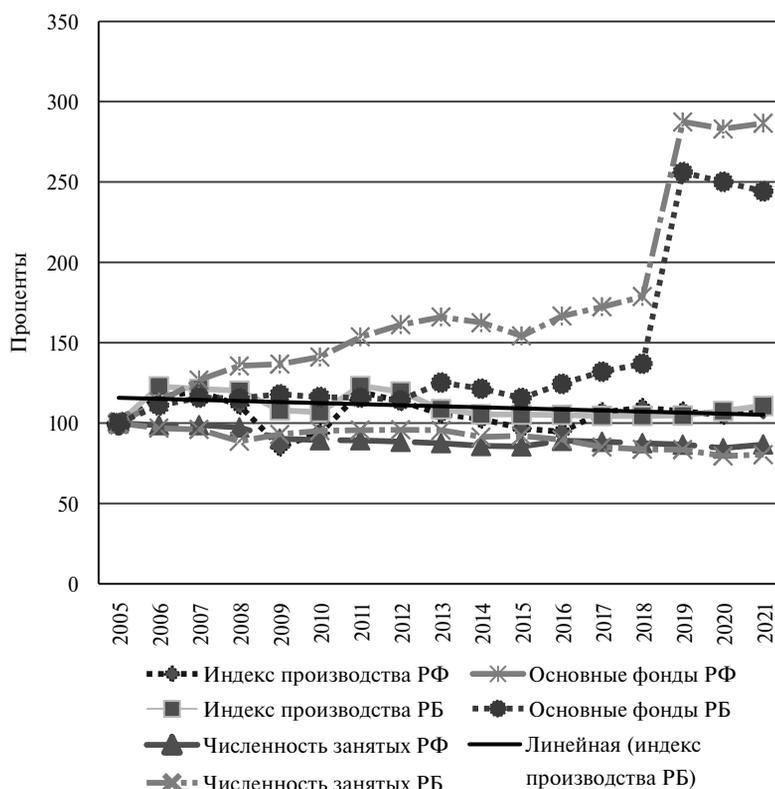


Рис. 1. Обрабатывающие производства в Российской Федерации и Республике Башкортостан, % к уровню 2005 г.

Источник: расчеты авторов.

² Приказ Росстата от 15.12.2017 № 832 «Об утверждении Методики расчета показателей “Доля продукции высокотехнологичных и наукоемких отраслей в валовом внутреннем продукте”» (<https://docs.cntd.ru/document/556157980?ysclid=1w86q9vuda877152831>).

Обрабатывающие производства в Российской Федерации и Республике Башкортостан имеют схожие тренды развития. В 2000–2008 гг. происходил восстановительный рост промышленности после беспрецедентного падения в начале 1990-х годов, в 2009 г. случилось их кризисное падение. Основными препятствиями для промышленного развития являлись низкий спрос и конкурирующий импорт, состояние основных фондов, качество кадрового состава (Корнев, Максимцова, 2020, с. 108). В кризисный для экономики страны 2014 г. сохранился достигнутый уровень обрабатывающих производств, так как произошло смещение государственного курса с открытой политики, направленной на занятие ниши в международном воспроизводственном процессе, на поддержку внутреннего производства в приоритетных отраслях. Высокими темпами стала увеличиваться стоимость основных фондов в обрабатывающих производствах, но динамика ввода принципиально новых передовых технологий осталась очень скромной, сохранилась тенденция сокращения численности занятых. При этом ввод капиталоемких технологий не является основанием для сокращения занятых. Согласно анализу О.С. Сухарева, высвобождение труда в данной отрасли происходит в результате того, что процессы, которые в ней применяются, обладают большей степенью риска и меньшей доходностью. Вместе с тем это положение должно направлять инженеров на создание новых технологий, способствуя формированию специального технологического сектора (Сухарев, 2023, с. 80).

Обрабатывающие производства Республики Башкортостан с 2021 г. по динамике роста основных фондов отстают от Российской Федерации. С 2015 г. численность занятых в производстве сократилась больше, чем в РФ, хотя уровень производства в республике увеличился, а в 2020–2021 гг. темпы ее роста были выше, чем по стране в целом.

Анализ видов обрабатывающих производств Республики Башкортостан по объемам производства по среднегодовым темпам роста и по обороту организаций приведен в табл. 1.

В Республике по объему производства лидируют ВЭД: химические вещества и продукты, кокс и нефтепродукты, но при этом они же имеют самые низкие темпы роста. Итоги анализа специализации обрабатывающих производств в регионе на основе коэффициентов локализации и интенсивности локализации приведены в табл. 2.

Ведущими видами обрабатывающих производств региона являются отрасли, доля производства которых не ниже средней по стране, а коэффициенты локализации больше 1. В зависимости от значения коэффициента интенсивности локализации виды ОП распределяем по зонам: повышенной эффективности локализации ($LIQ > 1$) и низкой эффективности локализации ($LIQ < 1$)

Таблица 1. Группировка видов ОП в Республике Башкортостан по обороту организаций в 2017–2022 гг.

Темп прироста, %	Доля оборота организаций		
	от 0 до 1%	от 1 до 5%	свыше 5%
1,2–1,43	Производство текстильных изделий. Производство прочих готовых изделий	Производство медицинских препаратов и изделий. Производство изделий из дерева	–
1,1–1,2	Производство мебели. Производство одежды. Производство электрического оборудования. Производство бумажных изделий	Ремонт и монтаж машин и оборудования. Производство компьютеров. Производство автотранспортных средств и прицепов. Производство металлургическое. Производство резиновых и пластмассовых изделий. Производство металлических изделий, кроме машин и оборудования	Производство пищевых продуктов
0–1,1	Производство изделий из кожи. Деятельность полиграфическая	Производство неметаллической минеральной продукции. Производство напитков. Производство машин и оборудования, не включенные в другие группы	Производство прочих транспортных средств и оборудования. Производство химических веществ и продуктов. Производство кокса и нефтепродуктов

Источник: расчеты авторов.

Таблица 2. Коэффициенты локализации видов обрабатывающих производств в РБ в 2017 и 2021 г.

Обрабатывающее производство	Коэффициент локализации оборота организации		Коэффициент локализации численности населения		Коэффициент интенсивности локализации	
	2017 г.	2021 г.	2017 г.	2021 г.	2017 г.	2021 г.
Пищевых продуктов	0,54	0,85	0,90	0,90	0,60	0,94
Напитков	1,10	1,23	1,07	0,95	1,03	1,29
Текстильных изделий	0,65	2,11	0,62	0,80	1,04	2,65
Одежды	1,00	1,51	0,68	1,01	1,47	1,49
Кожи и изделий из кожи	0,41	0,51	0,73	0,78	0,56	0,66
Изделий из дерева	0,92	1,83	0,86	0,70	1,07	2,63
Бумажных изделий	0,35	0,50	0,76	0,51	0,46	0,98
Деятельность полиграфическая	0,44	0,39	0,66	0,74	0,66	0,53
Кокса и нефтепродуктов	3,03	3,27	4,27	5,31	0,71	0,62
Химических веществ и продуктов	2,72	2,28	2,33	2,23	1,17	1,03
Медицинских препаратов и изделий	1,84	3,24	1,42	1,20	1,29	2,70
Резиновых и пластмассовых изделий	0,88	0,83	1,63	1,23	0,54	0,68
Прочей неметаллической минеральной продукции	1,55	1,69	1,22	1,17	1,27	1,45
Металлургическое	0,25	0,26	0,55	0,51	0,46	0,51
Металлических изделий, кроме машин и оборудования	0,55	0,55	0,73	0,65	0,75	0,83
Компьютеров, электронных и оптических изделий	0,33	0,45	0,43	0,54	0,76	0,83
Электрического оборудования	0,36	0,69	0,47	0,54	0,77	1,26
Машин и оборудования, не включенных в другие группы	1,95	1,50	1,36	1,21	1,44	1,24
Автотранспортных средств и прицепов	0,48	1,01	0,86	1,10	0,56	0,90
Прочих транспортных средств и оборудования	2,36	2,69	1,77	1,92	1,34	1,40
Мебели	0,58	0,86	1,05	0,96	0,55	0,89
Прочих готовых изделий	0,35	0,74	0,63	0,67	0,56	1,10
Ремонт и монтаж машин и оборудования	0,72	1,14	0,92	0,86	0,78	1,32

Источник: расчеты авторов на основе данных Росстата.

(Гайнанов, Гатауллин, Аслаева, 2019, с. 69). В зону повышенной эффективности локализации (коэффициент локализации оборота организации больше единицы ($LQ_o > 1$)) входят производства: напитков; одежды; кокса и нефтепродуктов; химических веществ и продуктов; лекарств; прочей неметаллической минеральной продукции; прочих транспортных средств, машин и оборудования. В зону повышенной локализации в 2020 г. вошел один вид деятельности — ремонт машин и оборудования, а в 2021 г. — производство автотранспортных средств и прицепов.

Классифицируем виды обрабатывающих производств региона по их значимости в масштабах страны и региона: национальные, национальные и локальные. В каждой группе разделим отрасли:

1) на ведущие (объем производства не ниже среднего и $LQ_o > 1$), которые сгруппируем: а) на ведущие виды обрабатывающих производств, находящиеся в зоне эффективной локализации ($LIQ > 1$); б) ведущие виды обрабатывающих производств, находящиеся в зоне низкой эффективности локализации ($LIQ < 1$); в) виды обрабатывающих производств, находящиеся в зоне эффективной локализации, с недостатком локализации числа занятых ($LIQ > 1$, $LQ_e < 1$);

2) имеющие потенциал (положительная динамика в зоне низкой эффективности локализации ($LIQ < 1$)).

Таблица 3. Группировка по значимости ведущих и имеющих потенциал развития видов обрабатывающих производств

1. Отрасли национальной и локальной значимости	
Ведущие виды обрабатывающих производств, находящиеся в зоне эффективной локализации	Производство лекарственных препаратов и изделий для медицины Производство химических веществ и продуктов Производство прочего транспортного оборудования
Ведущие виды обрабатывающих производств, находящиеся в зоне низкой эффективности локализации	Производство кокса и нефтепродуктов Производство автотранспортных средств и прицепов
ВЭД, имеющие потенциал развития	
Рост в зоне низкой эффективности локализации	Производство резиновых и пластмассовых изделий Производство прочих готовых изделий
2. Отрасли национальной значимости	
Ведущие виды обрабатывающих производств, находящиеся в зоне эффективной локализации	Производство напитков Производство прочей неметаллической минеральной продукции Производство машин и оборудования, не включенные в другие группы Производство одежды
Виды обрабатывающих производств, находящиеся в зоне эффективной локализации, с недостатком локализации численности занятых	Производство текстильных изделий Ремонт и монтаж машин Обработка древесины и производство изделий из дерева
ВЭД, имеющие потенциал развития	
Рост в зоне низкой эффективности локализации	Производство пищевых продуктов Производство бумажных изделий Производство компьютеров и электронных изделий Производство электрического оборудования Производство готовых металлических изделий, кроме машин и оборудования

Источник: расчеты авторов.

Результаты группировки представлены в табл. 3. В Республике Башкортостан развиты отрасли высокотехнологического сектора: медицинских препаратов и изделий, летательных аппаратов, включая соответствующее оборудование, которые являются отраслями локальной и национальной значимости.

Виды экономической деятельности национальной и локальной значимости обрабатывающих производств в республике имеют значительную долю: 66,67% в объеме производства, где заняты 39,13% работников. Такая диспропорция в отраслях национальной и локальной значимости по обороту производства и численности занятых наблюдается из-за основной отрасли — производства кокса и нефтепродуктов, на которую приходится 43,65% объема обрабатывающих производств, где занято только 7,73%. Среди обрабатывающих производств национально значимыми являются — 26,89% с значительной численностью занятых — 52,89%.

Рассмотрим перспективы пространственного развития ведущих и имеющих потенциал роста развития обрабатывающих производств в Республике Башкортостан. Структура пространственного развития зависит от сочетания существующих видов производств, природно-климатических, технологичных факторов и имеющейся инфраструктуры (Коломак, 2019, с. 87).

Размещение обрабатывающих производств, их структура, факторы и направления сдвига на экономическом каркасе региона представлены на рис. 2.

Северо-запад и юг республики характеризуются невысоким уровнем плотности населения и отсутствием обрабатывающих производств. Ввод в строй автомобильной магистрали «Москва — Пекин» способен внести оживление в экономическое развитие северных и северо-восточных районов

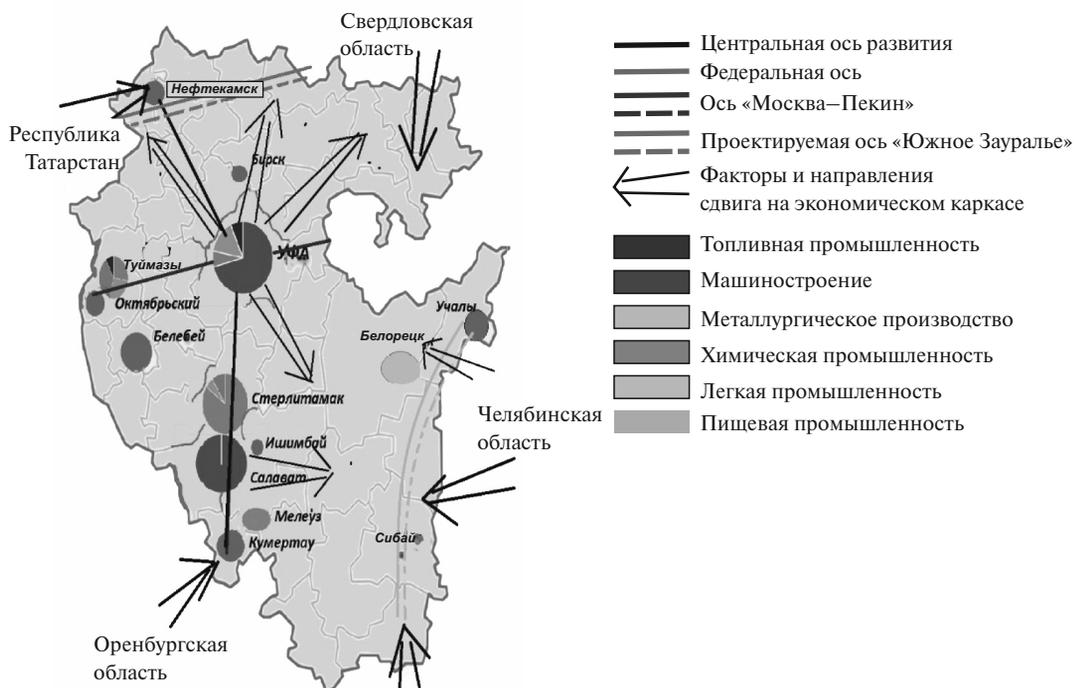


Рис. 2. Пространственное развитие видов обрабатывающих производств в Республике Башкортостан

Источник: расчеты авторов.

республики. Произойдет усиление значений северо-западных районов и городов Нефтекамск и Агидель — как транспортных узлов для обработки грузов из региона. Укрепление связей (железнодорожных и автомагистралей) Башкирского Зауралья и промышленных центров Челябинской области будет способствовать более полному использованию их производственного потенциала.

В самых крупных промышленных центрах республики — городах Уфа и Салават — наибольшую долю производства занимает топливная промышленность (производство нефтепродуктов). Химическая промышленность развита в г. Стерлитамак. Центры развития промышленности располагаются в городах, расположенных вдоль пространственной центральной оси региона «Нефтекамск — Уфа — Стерлитамак — Салават» (Гатауллин, Исянбаев, Сафиуллин, 2016). Вдоль федеральной оси «Самара — Челябинск» находится основная часть предприятий нефтеперерабатывающего комплекса. На вертикальных и горизонтальных осях развития сформирован интегрированный промышленный каркас республики, в которых производится не только самый большой объем обрабатывающих производств, но проживает наибольшая доля населения и располагаются центры подготовки кадров высшей квалификации. Предприятия, занятые в машиностроении, размещены в относительно небольших городах республики: Нефтекамск, Бирск, Белебей, Октябрьский, Учалы, Кумертау, расположенных внутри экономического каркаса. При этом в Кумертау градообразующее предприятие специализируется на производстве вертолетов. В перспективе важным фактором развития может стать укрепление экономических связей с крупными центрами соседних регионов, городами: Магнитогорск, Орск, Оренбург, Екатеринбург, Набережные Челны, Альметьевск.

Конкретизируем пространственное развитие по системообразующим предприятиям с учетом технологического уровня развития и значимости на национальном и локальном уровнях по городским округам республики. Технологический уровень обрабатывающих производств определяется на основе классификации Росстата.

Значимую долю в объеме обрабатывающей промышленности в республике занимает топливная промышленность, показатели которой в основной части формирует ПАО АНК «Башнефть»: в 2022 г. доля «Башнефти» в общероссийском объеме переработки составила 6%, у компании также имеются незадействованные мощности переработки. Главный офис располагается в промышленном центре Республики Башкортостан — Уфе. Здесь же продолжают эффективно развиваться предприятия национальной и локальной значимости высокого технологического уровня,

занимающиеся производством медицинских препаратов и изделий (ОАО «Фармстандарт — Уфа-вита», «Иммунопрепарат»); производством оборудования для летательных аппаратов (ПАО «ОДК — УМПО», АО «УАП “Гидравлика”»), а также предприятия высокого среднетехнологического³ уровня, занимающиеся производством химических веществ и продуктов (ПАО «Уфаоргсинтез», АО «ПОЛИЭФ», ООО «НВП “БашИнком”»). Среди предприятий национальной значимости можно выделить предприятия, относящиеся к тяжелому машиностроению: ООО «Уфагидромаш», ООО «Нефтегазинжиниринг», ООО «Корпорация Уралтехнострой», ООО «ЕСМ», ООО «НПП ОЗНА-Инжиниринг».

Во втором по величине городе республики, Стерлитамаке, успешно развиваются предприятия национальной и локальной значимости высокого среднетехнологического уровня, занимающиеся производством химических веществ и продуктов: АО «Башкирская содовая компания», ОАО «Синтез-Каучук», ОАО «Стерлитамакский нефтехимический завод», ООО «Башпласт», ООО «Финансовая группа “Дога”»; национальной значимости, занимающиеся производством станков (ООО НПО «Станкостроение»), машиностроением (ООО «РИВС»).

В городе Салават эффективно развиваются предприятия национальной и локальной значимости высокого среднетехнологического уровня, занимающиеся производством химических веществ и продуктов (АО «Салаватский химический завод»); национальной значимости, занимающиеся тяжелым машиностроением (ОАО «Салаватнефтемаш», ООО «СалаватГидравлика»). Также там располагаются предприятия национальной значимости, занимающиеся производством стекла (АО «Салаватстекло»).

В городе Кумертау успешно развивается предприятие национальной и локальной значимости высокого технологического уровня, занимающееся производством летательных аппаратов и соответствующего оборудования: АО «Кумертауское авиационное производственное предприятие».

В городе Нефтекамск эффективно развиваются предприятия национальной и локальной значимости высокого среднетехнологического уровня, занимающиеся производством автотранспорта и прицепов (ПАО «Нефтекамский автозавод»); национальной значимости, занимающиеся тяжелым машиностроением (ООО «НКМЗ-Групп»).

В городе Октябрьский находятся предприятия национальной значимости высокого технологического уровня, занимающиеся силовыми установками (АО «Озна»), оборудованием для добычи полезных ископаемых и строительства (ООО НПФ «Пакер»).

При сохранении или изменении в лучшую сторону внешних условий тренд успешного развития выше представленных предприятий сохранится.

ОБСУЖДЕНИЕ

В результате происходящей трансформации экономики изменяется структура обрабатывающих производств в регионе. Прогнозные значения структурных составляющих определены на основе целевых показателей «Сводной стратегии развития обрабатывающей промышленности Российской Федерации»⁴, «Прогноза социально-экономического развития Республики Башкортостан» с учетом происходящих изменений в производстве и анализа временных рядов. При выполнении корреляционного-регрессионного анализа временного ряда были построены корректные, статистически значимые экономико-математические модели оборота организаций и численности занятых по видам обрабатывающих производств. Согласно прогнозу индекс производства обрабатывающей промышленности в РФ составит: 114% — в 2024 г., 124% — в 2025 г. и 155% — в 2030 г. к уровню 2022 г. Аналогично в Республике Башкортостан прогнозируются следующие значения индекса производства обрабатывающей промышленности: 113% — в 2024 г., 124% — в 2025 г. и 140% — в 2030 г. к уровню 2022 г. Представим структуру оборота организаций и численности занятых, а также прогнозных значений по видам обрабатывающих производств. Последние значения

³ Пояснение из Википедия (wikipedia.org): «К высокотехнологичному сектору экономики относят отрасли высокого, высокого среднетехнологического уровня и наукоемкие сервисы. Высокотехнологичные отрасли отличаются высокой интенсивностью затрат на научные исследования и разработки (НИОКР), высока доля занятых с высшим образованием, а также более высокой инновационной активностью».

⁴ «Сводная стратегия развития обрабатывающей промышленности Российской Федерации до 2024 года и на период до 2035 года». Распоряжение Правительства Российской Федерации от 06.06.2020 № 1512-п (<http://static.government.ru/media/files/Qw77Aau6IOSEluQqYnvR4tGMCy6rv6Qm.pdf>).

Таблица 4. Доли оборота организаций и численности занятых обрабатывающих производств в Республике Башкортостан, %

Обрабатывающее производство	Доля оборота организаций			Доля численности занятого населения		
	2017 г.	2022 г.	Прогноз 2030 г.	2017 г.	2021 г.	Прогноз 2030 г.
Пищевых продуктов	4,43	7,46	10,24	14,56	15,37	16,30
Напитков	1,43	1,55	1,52	1,76	1,48	0,86
Текстильных изделий	0,21	0,93	1,52	0,86	1,23	2,16
Одежды	0,34	0,55	0,70	2,74	3,89	6,32
Изделия из кожи	0,05	0,05	0,05	0,47	0,56	0,83
Изделия из дерева	0,81	1,61	2,81	4,49	4,01	2,17
Бумажные изделия	0,53	0,66	0,85	1,07	0,81	0,23
Полиграфическая деятельность	0,17	0,12	0,07	1,57	1,16	0,39
Кокса и нефтепродуктов	54,03	43,65	31,08	6,08	7,73	11,77
Химических веществ и продуктов	11,35	10,94	11,35	9,10	9,09	9,08
Медицинских препаратов и изделий	1,48	3,01	5,99	1,33	1,26	1,15
Резиновых и пластмассовых изделий	1,44	1,83	2,14	5,28	4,23	2,30
Прочей неметаллической минеральной продукции	3,56	4,16	4,69	6,74	6,05	4,42
Металлургическое	2,21	2,87	3,65	3,02	2,82	2,68
Металлических изделий, кроме машин и оборудования	2,09	2,57	2,51	5,25	5,67	5,92
Компьютеров и электронных изделий	0,67	1,05	1,37	1,91	2,33	3,42
Электрического оборудования	0,60	0,93	1,37	1,58	1,61	1,81
Машин и оборудования, не включенных в другие группы	4,27	3,64	2,61	8,88	6,09	0,66
Автотранспортных средств и прицепов	1,80	2,53	3,70	3,78	4,26	4,94
Прочих транспортных средств и оборудования	7,23	7,45	8,14	11,37	11,78	12,86
Мебели	0,21	0,40	0,58	3,04	3,43	4,91
Прочих готовых изделий	0,11	0,25	0,50	0,60	0,78	1,15
Ремонта и монтажа машин и оборудования	0,98	1,77	2,56	4,51	4,38	3,66

Источник: рассчитано авторами на основе данных Росстата.

рассчитаны на основе 48 адекватных и статистически значимых уравнений регрессии, учитывая имеющиеся ресурсы и целесообразность их развития, представленные по предприятиям региона выше (табл. 4).

Как видно из данных, представленных в табл. 3, долевые значения оборота организаций и численности занятых в структуре обрабатывающей промышленности региона распределены крайне неравномерно. Самую большую долю в регионе (43,65%) занимает производство кокса и нефтепродуктов, но при этом доля численности занятых в нем составляет только 8%. Второе по доле оборота (10,94%) и численности занятых (9,09%) — химическое производство. Третье по доле оборота (7,46%) — производство пищевых продуктов, а по численности занятых — 15,37%. Это свидетельствует о существовании больших различий как в техническом уровне, так и в производительности труда в данных производствах.

При реализации политики импортозамещения, роста спроса на рынках за счет реализации новых инвестиционных проектов прогнозируется значительное увеличение производства в следующих производствах: пищевой промышленности, машиностроении, обработки древесины, металлургической промышленности. Прогнозируется незначительное увеличение доли легкой, химической и медицинской промышленности, производства мебели. Лидерские позиции, несмотря на то что доля оборота производства сокращается, сохранятся за топливной промышленностью.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследования: 1) был выполнен анализ и прогноз развития ведущих и имеющих потенциал обрабатывающих производств системообразующих предприятий Республики Башкортостан; 2) определены пространственные аспекты размещения и отраслевой структуры обрабатывающих производств на территории Республики Башкортостан; 3) представлена карта пространственного размещения обрабатывающих производств в Республике Башкортостан и определены основные направления пространственного развития (сдвигов).

Национальная цель развития Российской Федерации в новых экономических реалиях будет обеспечиваться ростом обрабатывающих производств, созданием высокопроизводительных видов деятельности на основе внедрения современных технологий и высококвалифицированным персоналом. На основе функционально-пространственного анализа развития обрабатывающих производств Республики Башкортостан определены перспективы их развития. В республике сохранят преобладающее значение отрасли национального и локального значения (кокса и нефтепродуктов, химических веществ и продуктов, автотранспортных средств и прицепов, транспортных средств) и производства национального значения (пищевых продуктов, минеральной продукции) и деятельность, имеющая критическое значение для региона — обработка древесины. Научно-технологический прогресс и имеющийся научный потенциал позволяют спрогнозировать появление в республике таких видов обрабатывающих производств, как тонкая химия, био- и нанотехнологии, а также производство компьютерных и электронных изделий.

Центры развития промышленности в Республике Башкортостан располагаются в городах вдоль пространственной центральной оси региона (вертикальной) «Нефтекамск — Уфа — Стерлитамак — Салават» и федеральной оси (горизонтальной) «Самара — Челябинск». На этих осях развития сформирован интегрированный промышленный каркас Республики, в котором располагаются предприятия национальной, национальной и локальной значимости. Происходит перенаправление развития от ресурсных к высокотехнологичным видам экономической деятельности.

Высокотехнологичный сектор сконцентрирован в столице городе Уфа и точно — в городе Кумертау. Предприятия отрасли высокого технологического уровня рассредоточены по городам Республики, как и предприятия национальной и локальной, национальной значимости. При этом высокотехнологичный сектор региона продолжает успешно развиваться, его доля в структуре производства неуклонно растет.

Необходимо активизировать государственные меры поддержки обрабатывающих производств, основанных на комплексе отраслевых стратегий, увеличивая объем инноваций, научно-исследовательской и опытно-конструкторской работы, а также развития высокотехнологичных основных фондов.

Кроме того, создание новых мощностей инфраструктуры может служить основой для привлечения капиталов на развитие промышленности с учетом территориального фактора. Грамотное использование преимуществ специализации позволит выйти экономике на качественно новый уровень.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

- Абашкин В.Л., Гохберг Л.М., Еферин Я.Ю.** (2021). Атлас экономической специализации регионов России. Под ред. Л.М. Гохберга, Е.С. Куценко. М.: НИУ ВШЭ. 264 с. [**Abashkin V.L., Gokhberg L.M., Eferin Ya.Yu.** (2021). *Atlas of economic specialization of Russian regions*. L.M. Gokhberg, E.S. Kutsenko (eds.). Moscow: Scientific Research University "Higher School of Economics". 264 p. (in Russian).]
- Белый К.** (2023). ВВП стран мира — 2022. Рейтинг и доля стран в мировом ВВП. Режим доступа: <https://fingeniy.com/vvp-stran-mira-2022-rejting-i-dolya-stran-v-mirovom-vvp/#vvp-rossii-9-mesto> (дата обращения: 02.04.2023). [**Belyi K.** (2023). *GDP of the countries of the world — 2022. Rating and share of countries in world GDP*. Available at: <https://fingeniy.com/vvp-stran-mira-2022-rejting-i-dolya-stran-v-mirovom-vvp/#vvp-rossii-9-mesto> (in Russian).]
- Бондаренко Н.Е., Губарев Р.В.** (2020). Проблемы регионального неравенства социально-экономического развития Российской Федерации // *Вестник Российского экономического университета им. Г.В. Плеханова*. Т. 17. № 5 (113). С. 56–68. DOI: 10.21686/2413-2829-2020-5-56-68 [**Bondarenko N.E., Gubarev R.V.** (2020). Problems of regional inequality of socio-economic development of the Russian Federation. *Vestnik of the Plekhanov Russian University of Economics*, 17, 5 (113), 56–68. DOI: 10.21686/2413-2829-2020-5-56-68 (in Russian).]

- Гайнанов Д.А., Гатауллин Р.Ф., Аслаева С.Ш. (2019). Локализация и эффективность видов экономической деятельности в Республике Башкортостан // *Вестник Томского государственного университета. Экономика*. № 47. С. 67–79. [Gainanov D.A., Gataullin R.F., Aslaeva S. Sh. (2019). Localization and efficiency of economic activities in the Republic of Bashkortostan. *Tomsk State University Journal of Economics*, 47, 67–79 (in Russian).]
- Гатауллин Р.Ф., Исянбаев М.Н., Сафиуллин Р.Г. (2016). Структуризация экономического пространства региона: сущность, факторы, проектирование: монография. Р.Ф. Гатауллин (общ. ред.). Уфа: Институт социально-экономических исследований (ИСЭИ) Уфимского федерального исследовательского центра (УФИЦ) РАН. 216 с. [Gataullin R.F., Isyanbaev M.N., Safiullin R.G. (2016). *Structurization of the region's economic space: Essence, factors, design: Monograph*. R.F. Gataullin (gen. ed.). Ufa: Institute for Socio-Economic Research of the Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences RAS. 216 p. (in Russian).]
- Гатауллин Р.Ф., Аслаева С.Ш., Галикеев Р.Н. (2018). Концентрация промышленного производства в регионах // *Инновации и инвестиции*. № 12. С. 276–282. [Gataullin R.F., Aslaeva S. Sh., Galikeev R.N. (2018). Concentration of industrial production in the regions. *Innovations and Investments*, 12, 276–282 (in Russian).]
- Головин В.А. (2022). Идентификация и оценка развития региональных экономических кластеров // *Вестник Института экономики Российской академии наук*. № 5. С. 47–65. DOI: 10.52180/2073-6487_2022_5_47_65 [Golovin V.A. (2022). Identification and evaluation of the development of regional economic clusters. *Bulletin of the Institute of Economics of the Russian Academy of Sciences*, 5, 47–65. DOI: 10.52180/2073-6487_2022_5_47_65 (in Russian).]
- Гордеев О.И., Гордеев С.О. (2007). Развитие промышленности региона в условиях перехода к подъему экономики: стратегия, политика и средства обеспечения. СПб.: НПК «РОСТ». 365 с. [Gordeev O.I., Gordeev S.O. (2007). *The development of the region's industry in the context of the transition to economic recovery: Strategy, policy and means of support*. Saint Petersburg: NPC “ROST” (in Russian).]
- Гребёнкин И.В. (2020). Тенденции изменения промышленной специализации и динамика развития российских регионов // *Экономика региона*. Т. 16. Вып. 1. С. 69–83. DOI: 10.17059/2020-1-6 [Grebonyonkin I.V. (2020). Trends in industrial specialization and development dynamics of Russian regions. *Economy of Region*, 16, 1, 69–83. DOI: 10.17059/2020-1-6 (in Russian).]
- Дудин М.Н., Шкодинский С.В., Продченко И.А., Усманов Д.И. (2022). Экономический суверенитет государства в цифровой эпохе: теоретические и прикладные аспекты: монография. М.: РУСАЙНС. 244 с. [Dudin M.N., Shkodinskii S.V., Prodchenko I.A., Usmanov D.I. (2022). *Economic sovereignty of the state in the digital era: Theoretical and applied aspects: Monograph*. Moscow: RUSCIENCE (in Russian).]
- Коломак Е.А. (2019). Пространственное развитие России в XXI в. // *Пространственная экономика*. Т. 15. № 4. С. 85–106. DOI: 10.14530/se.2019.4.085–106 [Kolomak E.A. (2019). Spatial development of Russia in the XXI century. *Spatial Economics*, 15, 4, 85–106. DOI: 10.14530/se.2019.4.085-106 (in Russian).]
- Корнев А.К., Максимова С.И. (2020). Как обеспечить рост производства продукции обрабатывающей промышленности // *Проблемы прогнозирования*. № 5 (182). С. 108–119. DOI: 10.1134/S107570072005010X [Kornev A.K., Maksimtsova S.I. (2020). How to ensure the growth of manufacturing production. *Studies on Russian Economic Development*, 5 (182), 108–119. DOI: 10.1134/S107570072005010X (in Russian).]
- Кулагина Н.А., Дадькин В.С., Дадькина О.В., Саттаров Е.А. (2017). Управление минерально-сырьевым потенциалом в системе экономической безопасности региона // *Экономический журнал*. № 5. С. 78–86. [Kulagina N.A., Dadykin V.S., Dadykina O.V., Sattarov E.A. (2017). Management of the mineral resource potential in the system of economic security of the region. *Ekonomicheskyy Zhurnal*, 5, 78–86 (in Russian).]
- Лажентцев В.Н. (2015). Теоретические итоги исследований по тематике пространственного и территориального развития (с примерами по Европейскому Северу России) // *Экономика региона*. № 4. С. 21–29. [Lazhentsev V.N. (2015). Theoretical results of research on the subject of spatial and territorial development (with examples from the European North of Russia). *Economy of Region*, 4, 21–29 (in Russian).]
- Макаров М.В. (2021). Методические подходы к оценке сбалансированности и уровней промышленного развития регионов: возможности и ограничения // *Регион: системы, экономика, управление*. № 1. С. 118–116. DOI: 10.22394/1997-4469-2021-52-1-108-117 [Makarov M.V. (2021). Methodological approaches to assessing the balance and levels of industrial development of regions: Opportunities and limitations. *Region: Systems, Economics, Management*, 1, 118–116. DOI: 10.22394/1997-4469-2021-52-1-108-117 (in Russian).]
- Растворцева С.Н. (2018). Экономическая активность регионов России // *Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз*. Т. 11. № 1. С. 84–99. DOI: 10.15838/esc.2018.1.55.6 [Rastvortseva S.N. (2018). Economic activity of Russian regions. *Economic and Social Changes: Facts, Trends, Forecast*, 11, 1, 84–99. DOI: 10.15838/esc.2018.1.55.6 (in Russian).]
- Сибирская Е.В., Овешникова Л.В., Шакирова Д.Ф. (2021). Стратегическое планирование развития обрабатывающих производств Российской Федерации // *Федерализм*. № 26 (3). С. 75–104. DOI: 10.21686/2073-1051-2021-3-75-104 [Sibirskaya E.V., Oveshnikova L.V., Shakirova D.F. (2021). Strategic planning for the development of manufacturing industries in the Russian Federation. *Federalism*, 26 (3), 75–104. DOI: 10.21686/2073-1051-2021-3-75-104 (in Russian).]

- Смешко О.Г., Плотников В.А., Вертакова Ю.В.** (2022). Перспективы Российской экономики: новые вызовы экономической безопасности и перестройка государственного управления // *Экономика и управление*. Т. 28. № 6. С. 524–537. DOI: 10.35854/1998-1627-2022-6-524-537 [Smeshko O.G., Plotnikov V.A., Vertakova Yu.V. (2022). Prospects for the Russian economy: new challenges to economic security and restructuring of public administration. *Economics and Management*, 28, 6, 524–537. DOI: 10.35854/1998-1627-2022-6-524-537 (in Russian).]
- Сухарев О.С.** (2023). Технологический дуализм российской экономики и структурная политика новой модели ее роста // *Вестник Института экономики Российской академии наук*. № 1. С. 75–89. DOI: 10.52180/2073-6487_2023_1_75_89 [Sukharev O.S. (2023). Technological dualism of the Russian economy and the structural policy of a new model of its growth. *Bulletin of the Institute of Economics of the Russian Academy of Sciences*, 1, 75–89. DOI: 10.52180/2073-6487_2023_1_75_89 (in Russian).]
- Трещевский Ю.И., Пирогова Л.В.** (2022). Промышленная политика регионов: содержание, стратегические приоритеты, инструментарий: монография. Воронеж: Истоки. 208 с. [Treshchevsky Yu.I., Pirogova L.V. (2022). *Industrial policy of the regions: Content, strategic priorities, tools: Monograph*. Voronezh: Origins. 208 p. (in Russian).]
- Mitsek S.A.** (2018). Econometric model of Russian Federation: Analysis and forecasts for 2018–2019. *IFAC-PapersOnLine*, 51 (32), 395–400.

Prospects for the development of manufacturing industries in the Republic of Bashkortostan under the new economic conditions

© 2024 D.A. Gainanov, R.F. Gataullin, S. Sh. Aslaeva

D.A. Gainanov,

Institute for Socio-Economic Research of the Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences, Ufa, Republic of Bashkortostan, Russian Federation; e-mail: 2d2@inbox.ru

R.F. Gataullin,

Institute for Socio-Economic Research of the Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences, Ufa, Republic of Bashkortostan, Russian Federation; e-mail: gataullin.r2011@yandex.ru

S.Sh. Aslaeva,

Institute for Socio-Economic Research of the Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences, Ufa, Republic of Bashkortostan, Russian Federation; e-mail: salima2006A@mail.ru

Received 30.06.2023

This study was carried out as part of the state order No. 075-01134-23-00 for 2023 and for the planning period of 2024 and 2025.

Abstract. Currently the country's manufacturing industries form 16% of GDP, about 10 million people work there. In the new economic realities, the outstripping growth of the manufacturing industry is the main task for the Russian economy. The aim of our study was to determine the prospects for the development of different types of manufacturing industries in the Republic of Bashkortostan, based on the definition of specialization, localization of production, level of significance (national and local) and technological development. Methods of comparative, structural-logical, economic-statistical analysis, econometric modeling were used to evaluate the factual material and build a forecast. To determine the specialization of the territory, methods for assessing the localization and specialization of industries were used. 1. The analysis and forecast of the development of the leading and having the potential for the development of manufacturing industries of the main enterprises of the Republic of Bashkortostan was carried out. 2. The aspects of spatial distribution are determined and the sectoral structure of manufacturing industries in the Republic of Bashkortostan is determined. So there is a conclusion: a structural transformation of manufacturing industries in the region is predicted. The development is being redirected from resource-based to high-tech types of economic activity. Significant types of manufacturing industries in the region are mostly in the medium and high technology sector and have a high potential for development.

Keywords: types of economic activity, high-tech sector, localization coefficients, national and local significance, forecast, spatial development, region, specialization.

JEL Classification: C52, C40, L52, O21.

UDC: 332.1(410.57), 338.45.

For reference: **Gainanov D.A., Gataullin R.F., Aslaeva S.Sh.** (2024). Prospects for the development of manufacturing industries in the Republic of Bashkortostan under the new economic conditions. *Economics and Mathematical Methods*, 60, 2, 80–91. DOI: 10.31857/S0424738824020079 (in Russian).

ОТРАСЛЕВЫЕ ПРОБЛЕМЫ

Оценка прямых эксплуатационных расходов для перспективных воздушных судов с альтернативными типами силовых установок

© 2024 г. И.В. Урюпин, А.О. Власенко

И.В. Урюпин,

Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук, Москва; e-mail: uryupin93@yandex.ru

А.О. Власенко,

Общество с ограниченной ответственностью «Межотраслевой аналитический центр», Москва; e-mail: andrej.vlasenko84@gmail.com

Поступила в редакцию 06.06.2023

Аннотация. В настоящее время с учетом сложившейся геополитической ситуации одной из важных задач Российской Федерации является создание отечественных перспективных воздушных судов. Важным требованием при проектировании нового воздушного судна становится себестоимость его эксплуатации. В настоящей работе найдены новые регрессионные зависимости между мощностью / тягой силовой установки и ее стоимостью, уровнем расходов на техническое обслуживание и ремонт. Эти зависимости дают возможность рассматривать стоимость силовой установки и стоимость планера обособленно друг от друга. Это также позволит получить сравнимые между собой оценки себестоимости перевозки не только для существующих, но и гипотетических / перспективных самолетов следующих поколений с классическими газотурбинными двигателями и с гибридными и электрическими силовыми установками. В работе приведена методика оценки прямых эксплуатационных расходов для перспективных самолетов малой авиации. Расчет эксплуатационных расходов и структуры затрат демонстрируется на примере электрического самолета «Eviation Alice» и схожих с ним действующих функциональных аналогов, относящихся к самолетам малой авиации вместимостью 9–19 мест.

Ключевые слова: математическое моделирование, авиационная техника, эксплуатационные расходы, конкурентоспособность, малая авиация.

Классификация JEL: C51, L93, O32.

УДК: 338.45.

Для цитирования: **Урюпин И.В., Власенко А.О.** (2024). Оценка прямых эксплуатационных расходов для перспективных воздушных судов с альтернативными типами силовых установок // *Экономика и математические методы*. Т. 60. № 2. С. 92–104. DOI: 10.31857/S0424738824020087

ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение авиатранспортной системы воздушными суднами (ВС) является важным направлением социально-экономического развития любой страны. С учетом введенных в отношении Российской Федерации санкций на использование, приобретение и поддержание летной годности иностранных ВС в парке российских авиакомпаний, а также отсутствие в настоящее время самолета малой авиации (МА), целиком производимого в России, становится крайне актуальной задачей создания перспективных отечественных самолетов.

Создание перспективного ВС — сложный, многоэтапный процесс, в котором ключевое место занимает задача определения требований (Власенко, Сухарев, Урюпин, 2023), предъявляемых к разрабатываемому самолету. При решении такой задачи активно используются модели оценки стоимости ВС (Fregnani, Mattos, Hernandez, 2019; Roy et al., 2019; Woehler et al., 2019). Снижение стоимости эксплуатации ВС позволяет повысить не только конкурентоспособность, но и увеличить спрос на авиаперевозки. Критерием, учитываемым основным затратам на эксплуатацию самолета, служат прямые эксплуатационные расходы (ПЭР), которые определяется как *себестоимость летного часа* (Опрышко Н., Опрышко Ю., Рубан, 2013) или *себестоимость кресло-километра* (Манвелидзе, 2018).

Одним из значимых факторов, влияющих на ПЭР, является развитие технологий авиастроения, позволяющих не только качественно повысить характеристики будущих ВС, но и снизить и перераспределить статьи расходов в структуре ПЭР. Наибольшее влияние на ПЭР может оказать разработка новых силовых установок (СУ). В настоящее время мировым научным сообществом все чаще рассматриваются концепты ВС с альтернативными СУ — гибридные (ГСУ), электрические (ЭСУ) и силовые установки на водородном топливе (Халютин, Давидов, Жмуров, 2017; Hoelzen et al., 2022). В перспективе применение таких СУ позволит снизить потребление топлива и увеличить потребность в электродвигателях и аккумуляторных батареях (АКБ), что отразится на стоимости эксплуатации ВС и в впоследствии может привести к снижению тарифов и росту объемов авиаперевозок. Таким образом, возникает задача оценки ПЭР для гипотетических / перспективных ВС с разными типами СУ. Решение исходной задачи потребует учитывать как прогнозные значения развития ключевых характеристик ВС, влияющих на себестоимость перевозки, так и сеть применения гражданской авиатехники.

Замена традиционной СУ на альтернативную не позволяют применять классические подходы оценки себестоимости (Кородюк, Гринев, 2019; Fioriti, Vercella, Viola, 2018), так как происходит существенное изменение характеристик ВС (в том числе и массовых). Это сказывается на уровне и структуре ПЭР (Finger et al., 2019).

В случае с ГСУ и ЭСУ затраты на топливо сокращаются или исключаются совсем, однако возникает необходимость учитывать расходы на электроэнергию и аккумуляторные батареи, что требует рассмотрения расходов СУ отдельно от ВС. В целом все подобные расходы могут быть отнесены к стандартным укрупненным статьям затрат, однако в рамках универсального подхода к оценке ПЭР отдельное рассмотрение планера и СУ должно проводиться для всех ВС с разными типами СУ, включая газотурбинные двигатели (ГТД). Таким образом, целью работы является создание универсальной методики оценки ПЭР для перспективных и существующих ВС МА, дающей сравнимые оценки для различных типов СУ, рассчитанные на области их применения.

Для разработки методики авторами получены новые регрессионные зависимости между мощностью / тягой силовой установки и ее стоимостью, уровнем расходов на техническое обслуживание и ремонт силовой установки. Найденные зависимости дают возможность рассматривать стоимости силовой установки и планера обособленно друг от друга, что унифицирует подход к оценке себестоимости как для существующих ВС, так и для гипотетических / перспективных самолетов следующих поколений с разными типа СУ. Расчет эксплуатационных расходов и структуры затрат демонстрируется на примере электрического самолета «Eviation Alice» и схожих с ним действующих функциональных аналогов, относящихся к самолетам МА вместимостью 9–19 мест.

1. ОЦЕНКА УРОВНЯ КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТИ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ

Для оценки уровня конкурентоспособности перспективных самолетов МА предлагается методика, основанная на моделировании эксплуатации ВС на сети применения¹. В методике используются экономико-математические модели (Иванилов, Лотов, 1979; Клочков, Русанова, Максимовский, 2010; Washington et al., 2020), описывающие применение ВС для перевозки пассажиров, грузов и выполнения авиационных работ.

Входными параметрами модели являются технико-экономические характеристики сравниваемых ВС, участвующие в оценке конкурентоспособности, и характеристики сферы применения авиационной техники.

Методика содержит три основных этапа.

1. *Формирование списка сравниваемых ВС.* Конкурентная группа ВС, относящихся к одной сфере применения и имеющих сопоставимые функциональные возможности. Атрибутами служат летно-технические, технико-экономические характеристики ВС, а также характеристики двигателей.

2. *Определение сети (профиля) применения ВС.* Профиль применения описывается существующей или перспективной сетью применения или набором типовых рейсов, на основе статистических данных, экспертных оценок или прогнозов. Атрибутами служат аэропорты вылета и прилета, дальности и продолжительности полета, число рейсов, средние загрузки на рейсах, стоимости

¹ Сеть применения — выборка целевых линий применения воздушного судна, удовлетворяющая ограничениям по дальности и частоте выполняемых рейсов в год.

топлива/энергии в аэропортах сети; ставки сборов за аэронавигационное обслуживание на маршруте и в зоне аэропортов; тарифы и сборы за обслуживание в аэропортах сети.

3. *Оценка эффективности сравниваемых ВС.* В результате моделирования эксплуатации сравниваемых типов ВС на всех линиях сети применения определяются значения рейсовых затрат по каждой статье операционных расходов, суммарные расходы по линиям и удельные расходы.

Расчет интегральных показателей конкурентоспособности для сравниваемых типов ВС производится путем взвешивания показателей на каждой линии сети применения. Интегральными показателями расходов рассматриваются средние взвешенные значения удельных расходов в расчете на рейс и на кресло-километр (тонно-километр), соответствующие сети применения (средневзвешенному рейсу на сети применения ВС конкурентной группы).

2. РАСЧЕТ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТИ ДЛЯ СРАВНИВАЕМЫХ ТИПОВ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ

Суммарные расходы $C_i^{\text{рейс}}$ для модели i ВС на усредненный рейс определяются как сумма средних взвешенных на рейсе расходов по каждой статье k :

$$C_i^{\text{рейс}} = \sum_k \bar{C}_i^k = \bar{C}_i^{AP} + \bar{C}_i^{NAV} + \bar{C}_i^{F\&E} + \bar{C}_i^{Maint} + \bar{C}_i^{Lab} + \bar{C}_i^{Const},$$

где \bar{C}_i^{AP} — среднее взвешенное значение суммарных рейсовых расходов в аэропорту; \bar{C}_i^{NAV} — средние взвешенные рейсовые расходы на аэронавигационное обеспечение на маршруте; $\bar{C}_i^{F\&E}$ — средние взвешенные рейсовые расходы на горюче-смазочные материалы (авиаГСМ) и энергию на усредненный рейс; \bar{C}_i^{Maint} — средние взвешенные рейсовые расходы на техническое обслуживание и ремонт (ТОиР); \bar{C}_i^{Lab} — средние взвешенные расходы на оплату труда экипажей; \bar{C}_i^{Const} — средние взвешенные расходы на владение, страховку и прочие постоянные расходы.

Поскольку транспортные возможности сравниваемых ВС могут отличаться от требований сети применения, при проведении моделирования необходимо скорректировать объем фактически перевозимой на модели ВС полезной нагрузки. Для этого могут быть использованы формулы:

$$\begin{aligned} n_{ij}^{pax} &= n_j^{pax} PL_{ij}^{\text{рейс}} / PL_j, & W_{ij}^{\text{freight}} &= W_j^{\text{freight}} PL_{ij}^{\text{рейс}} / PL_j, & (1) \\ \bar{n}_{i_{\text{рейс}}}^{pax} &= \left(\sum_{j \in L} n_{ij}^{pax} N_j \right) / \sum_{j \in L} N_j, & \bar{W}_{i_{\text{рейс}}}^{\text{freight}} &= \left(\sum_{j \in L} W_{ij}^{\text{freight}} N_j \right) / \sum_{j \in L} N_j, \\ PL_j &= n_j^{pax} W + W_j^{\text{freight}}, & PL_{ij}^{\text{рейс}} &= \min(PL_{ij}; PL_j), & (2) \end{aligned}$$

где n_j^{pax} — среднее число пассажиров на рейс на линии j ; W — средний вес пассажира с багажом²; W_j^{freight} — средний вес груза на рейс на линии j ; $PL_{ij}^{\text{рейс}}$ — средняя масса полезной нагрузки на рейс, доступная для модели i на линии j ; PL_j — максимальная допустимая полезная нагрузка на рейс; n_{ij}^{pax} — среднее число пассажиров на рейс для модели i на линии j ; W_{ij}^{freight} — средний вес груза на рейс на линии j , доступный для перевозки моделью i ВС; $\bar{n}_{i_{\text{рейс}}}^{pax}$ — среднее число пассажиров на рейс для модели i ; $\bar{W}_{i_{\text{рейс}}}^{\text{freight}}$ — средний вес грузов и почты на рейс для модели i ВС; PL_j — средняя полезная нагрузка на рейс для сравниваемых типов ВС.

Максимальная допустимая полезная нагрузка PL_{ij} , если $l_j < l_{\text{max}L}$, определяется как

$$PL_{ij} = \max \left[0; \min \left(\frac{PL_i^{\text{maxFuel}} - PL_i^{\text{maxPL}}}{l_i^{\text{maxFuel}} - l_i^{\text{maxPL}}} (l_j - l_i^{\text{maxPL}}) + PL_i^{\text{maxPL}}; \frac{0 - PL_i^{\text{maxFuel}}}{l_i^{\text{maxL}} - l_i^{\text{maxFuel}}} (l_j - l_i^{\text{maxFuel}}) + PL_i^{\text{maxFuel}}; PL_i^{\text{maxPL}} \right) \right], \quad (3)$$

где PL_i^{maxFuel} — максимальная допустимая масса загрузки при максимальной заправке топливом; PL_i^{maxPL} — максимальная масса полезной нагрузки; l_i^{maxPL} — дальность полета с максимальной полезной нагрузкой; l_i^{maxFuel} — дальность полета с максимальной доступной полезной нагрузкой при максимальном запасе топлива; l_i^{maxL} — дальность полета с максимальным объемом топлива без полезной нагрузки (перегоночная дальность).

² В качестве среднего веса пассажира с багажом принимаются значения от 90 кг до 102 кг.

Средние аэропортовые расходы рассчитываются на базе взвешенных значений. Вес каждого аэропорта определяется пропорционально числу взлет-посадок ВС конкурентной группы на сети применения. Расходы в аэропорту складываются из расходов, зависящих от числа пассажиров и/или грузов, и фиксированных для типа ВС (т.е. не зависящих от загрузки). К фиксированным расходам относятся: сбор за взлет-посадку; обеспечение авиационной безопасности; аэронавигационное обеспечение в зоне аэропорта; обеспечение бортовым питанием, доставка пассажиров и экипажа; предоставление трапа; встреча—выпуск ВС; уборка и экипировка ВС; прочие расходы (если предусмотрено в аэропорту).

Итоговое значение средних расходов в аэропорту на рейс находится из формулы

$$\bar{C}_i^{AP} = \sum_k \frac{\sum_{j \in L} C_{jk}^{AP_{\max}} n_{ij}^{\max} N_j}{\sum_{j \in L} N_j} + \frac{\sum_{j \in L} C_{jk}^{AP_{Fr}} W_{ij}^{\text{freight}} N_j}{\sum_{j \in L} N_j} + \frac{\sum_{j \in L} C_{ijk}^{AP} N_j}{\sum_{j \in L} N_j},$$

где \bar{C}_i^{AP} — суммарное значение средних расходов в аэропорту для модели i ; C_{ijk}^{AP} — фиксированные расходы в аэропорту для рейса модели i на линии j по статье k , не зависящей от числа пассажиров и веса груза; $C_{jk}^{AP_{\max}}$ — средняя ставка за пассажира для статьи k , не зависящей от типа ВС; $C_{jk}^{AP_{Fr}}$ — ставка за 1 кг груза для статьи k , не зависящей от типа ВС.

Расходы за аэронавигационное обслуживание на маршруте рассчитываются исходя из дальности полета, числа рейсов и средних ставок за аэронавигационное обслуживание на линиях с учетом характеристик каждой модели, сравниваемых ВС. Средние расходы за рейс на аэронавигационное обеспечение на маршруте определяются как

$$\bar{C}_i^{NAV} = \left(\sum_{j \in L} c_{ij}^{NAV} N_j \max(0; l_j - 20) / 100 \right) / \sum_{j \in L} N_j,$$

где l_j — протяженность линии j ³; c_{ij}^{NAV} — значение средней ставки на аэронавигационное обеспечение за 100 км.

Расходы на авиаГСМ / энергию рассчитываются для каждой модели сравниваемых ВС и каждой линии сети применения исходя из средней стоимости топлива/энергии с учетом дополнительных расходов (хранение, обеспечение заправки) и потребной массы топлива, необходимой для выполнения рейса и обусловленной характеристиками сравниваемых ВС⁴, а также дальностью и продолжительностью полета.

Средние за рейс расходы на авиаГСМ / энергию рассчитываются по формуле

$$\bar{C}_i^{F\&E} = \frac{\sum_{j \in L} CF_j F_{ij} N_j}{\sum_{j \in L} N_j} + \frac{\sum_{j \in L} CE_j E_{ij} N_j}{\sum_{j \in L} N_j},$$

где CF_j — значение средней стоимости авиаГСМ / топлива на линии j с учетом средних дополнительных расходов на обеспечение заправки и хранение авиаГСМ в регионе эксплуатации; CE_j — значение средней стоимости энергии на линии j с учетом средних дополнительных расходов на обеспечение заправки и хранение в регионе эксплуатации; F_{ij} — потребный объем топлива для выполнения рейса; E_{ij} — потребное число энергии для выполнения рейса.

Оценка F_{ij} может быть найдена через средний часовой расход топлива $F_{ij} = Fuel_{ij}^{\max R} t_{ij} / t_{ij}^{\max R}$, где $Fuel_{ij}^{\max R}$ — максимальная масса топлива, расходуемого на выполнение рейса со значением загрузки $PL_{ij}^{\text{рейс}}$ на предельную дальность; $t_{ij}^{\max R}$ — продолжительность полета на предельную дальность $l_j^{\max R}$ со значением загрузки $PL_{ij}^{\text{рейс}}$ и максимальным объемом топлива; t_{ij} — продолжительность полета со значением загрузки $PL_{ij}^{\text{рейс}}$ на дальность l_j линии j .

Предельная дальность $l_j^{\max R}$ модели i с заданной коммерческой нагрузкой $PL_{ij}^{\text{рейс}}$ и при максимальном запасе топлива определяется как

$$l_j^{\max R} = \min \left(\frac{l_i^{\max Fuel} - l_i^{\max PL}}{PL_i^{\max Fuel} - PL_i^{\max PL}} (PL_{ij}^{\text{рейс}} - PL_i^{\max PL}) + l_i^{\max PL}; \frac{l_i^{\max L} - l_i^{\max Fuel}}{0 - PL_i^{\max Fuel}} (PL_{ij}^{\text{рейс}} - PL_i^{\max Fuel}) + l_i^{\max Fuel} \right),$$

где $PL_i^{\max Fuel}$ — максимальная допустимая масса загрузки при максимальной заправке топливом; $PL_i^{\max PL}$ — максимальная масса полезной нагрузки; $l_i^{\max PL}$ — дальность полета с максимальной

³ При расчете АНО на маршруте из расстояния исключаются 20 км зоны аэропортов.

⁴ В случае перспективных моделей используются предполагаемые или заявленные летно-технические характеристики.

полезной нагрузкой; $I_i^{maxFuel}$ — дальность полета с максимальной доступной полезной нагрузкой при максимальном запасе топлива; I_i^{maxL} — дальность перегонки.

Максимальная масса расходуемого топлива для заданной нагрузки $PL_{ij}^{пейс}$ при полете на предельную дальность вычисляется из весовой сводки модели ВС:

$$Fuel_{ij}^{maxR} = \left(\min \left(MRW_i - OEW_i - PL_{ij}^{пейс}, Fuel_i^{max} \right) - Fuel_i^{res} \right),$$

где MRW_i — максимальная рулежная масса модели i ; OEW_i — масса пустого снаряженного ВС; $Fuel_i^{max}$ — максимальная масса топлива ВС; $Fuel_i^{res}$ — масса резервов топлива самолета. Величины t_{ij}^{maxR} и t_{ij} хорошо описываются формулой от дальности l и крейсерской скорости $v_i^{кр}$ по формуле $t_i = (\alpha_i l + \beta_i) / v_i^{кр}$, где $\alpha_i \approx 1$, $\beta_i > 0$ — коэффициенты, определяемые статистически из профиля полета модели i .

Оценка E_{ij} зависит от формата использования электрической составляющей СУ в процессе полета. В случае если она задействована только на часть полета (например, при взлете и начальном наборе высоты), то заправка электричеством на каждый полет будет максимальной. Если же электрическая составляющая тяги работает весь полет, то потребное заправляемое количество (объем) энергии E_{ij} может быть оценено аналогично топливу:

$$E_{ij} = \left(E_i^{max} / \min(t_i^{maxR}, t_i^{maxEl}) \right) \min(t_{ij}, t_i^{maxEl}),$$

где E_i^{max} — максимальное количество (объем) энергии для модели i ; t_i^{maxEl} — максимальное время работы электрической составляющей СУ.

Расходы на техническое обслуживание и ремонт оцениваются отдельно для каждой сравниваемой модели в расчете на летный час за весь жизненный цикл ВС. Для перспективных летательных аппаратов, по которым нет данных, используются экспертные оценки на основе данных по аналогичным типам самолетов, а также данные открытых источников.

Расходы на ТОиР на усредненный рейс \bar{C}_i^{Maint} для каждой модели определяются исходя из фактических продолжительностей рейсов на каждом элементе сети применения ВС конкурентной группы:

$$\bar{C}_i^{Maint} = \left(\sum_{j \in L} t_{ij} N_j / \sum_{j \in L} N_j \right) ch_i^{Maint} = \bar{t}_i^{пейс} ch_i^{Maint}, \tag{4}$$

где ch_i^{Maint} — ставка на ТОиР модели i за летный час, которая складывается из средней ставки за проведение периодического (линейного) ТОиР и средних резервов на проведение капитально-ремонта.

Помимо затрат на проведение линейного ТОиР существенный объем расходов авиакомпаний приходится на проведение тяжелых форм технического обслуживания двигателей (например, капитальный ремонт), резервы на которые обычно формируются в ходе эксплуатации ВС, что связано с высокой стоимостью проведения конкретного вида работ. Для оценки затрат на капитальный ремонт существующих и перспективных ГТД, в частности турбовинтовых двигателей (ТВД), на основе данных Conclin & DeDecker⁵, найдена зависимость от максимальной мощности ТВД (рис. 1)⁶.

В случае применения ЭСУ — резервы на замену электрической части двигательной установки добавляются отдельным слагаемым $ch_i^{Maint} = ch_i^{M_{Line}} + ch_i^{M_{EngRes}} + ch_i^{M_{El}}$, где $ch_i^{M_{Line}}$ — ставка за проведение

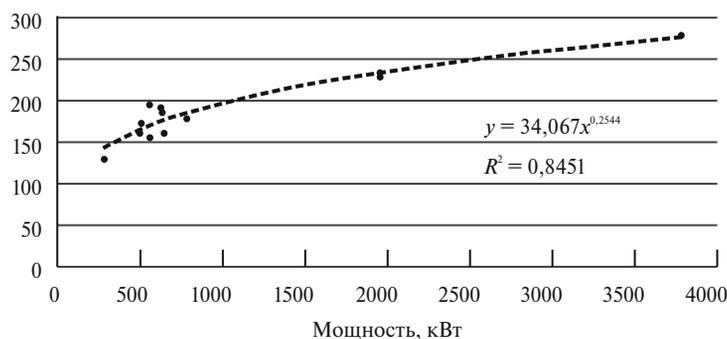


Рис. 1. Затраты на капитальный ремонт ТВД, долл/л.ч

⁵ <https://conklindedecker.jetssupport.com/>

⁶ В статье на рис. 1–6 денежные затраты исчисляются в долларах США.

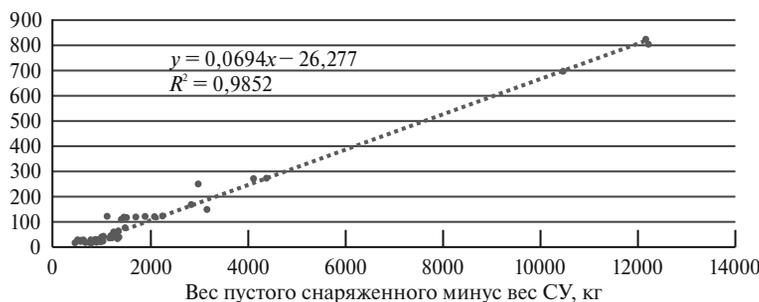


Рис. 2. Зависимость затрат на линейное ТОиР от веса пустого снаряженного ВС без СУ, долл./л.ч

линейного ТОиР за летный час; $ch_i^{M_{EngRes}}$ — резервы на проведение капитального ремонта неэлектрической части установки за летный час; $ch_i^{M_{El}}$ — резервы на замену электрической части установки за летный час.

Поскольку через каждые 2000 циклов должна производиться замена аккумуляторной батареи (АКБ) (Ribeiro et al., 2020), в методике предусмотрен учет резервов на амортизацию АКБ, которые могут быть оценены с учетом удельной стоимости АКБ за кВт × ч. Резервы на капитальный ремонт остальных элементов электрической составляющей двигательной установки на данном этапе в предположении не рассматриваются, потому что ресурсы электродвигателей, контроллеров и генераторов сопоставимы с ресурсом летательного аппарата в целом.

Оценка часовой ставки периодических расходов на ТОиР хорошо описывается линейной зависимостью ставки от веса пустого снаряженного ВС без веса СУ (рис. 2).

При использовании полученных зависимостей следует учитывать, что помимо рассмотренных переменных, на оценку расходов на ТОиР могут оказывать влияние такие ситуационные факторы, как, например: 1) соотношение ремонтных мощностей и располагаемого авиапарка, базирующегося в регионе; 2) модель организации техобслуживания, выбранная конкретной авиакомпанией (инсорсинг или аутсорсинг); 3) структура издержек авиакомпании или поставщика услуг ТОиР. Указанные факторы могут приводить к увеличению дисперсии затрат на ТОиР, относительно оцениваемых по представленной модели, не меняя, тем не менее, принципиального порядка величин относительно получаемых по ней оценок.

Расходы на оплату труда летного и cabinного экипажей оцениваются по расценкам региона и рассматриваемого класса авиационной техники исходя из требований к их составу и ставкам за летный час. Необходимо учитывать, что суммарная продолжительность полетного времени для члена экипажа не может превышать законодательно заданных значений⁷. Расходы на оплату труда экипажей на усредненный рейс $\bar{C}_{i,Lab}$ определяются исходя из продолжительностей рейсов на линиях:

$$\bar{C}_{i,Lab} = \sum_{j \in L} t_{ij} N_j (ch_i^{лЭ} + ch_i^{кЭ}) / \sum_{j \in L} N_j = \bar{t}_i^{рейс} \cdot (ch_i^{лЭ} + ch_i^{кЭ}),$$

где $ch_i^{лЭ}$ — суммарная ставка оплаты труда летного экипажа в час; $ch_i^{кЭ}$ — суммарная ставка оплаты труда cabinного экипажа в час.

Расходы на владение складываются из амортизационных отчислений, лизинговых платежей или финансирования привлеченного для покупки ВС кредита и пропорциональны рыночной стоимости каждой сравниваемой модели. Расходы на страховку определяются исходя из рыночной стоимости каждой сравниваемой модели.

Для применения методики к оценке стоимости перспективных ВС предлагается рассматривать стоимость СУ и стоимость всего остального самолета (планера и авиационных систем) отдельно.

⁷ Приказ Минтранса России от 21 ноября 2005 г. № 139 «Об утверждении Положения об особенностях режима рабочего времени и времени отдыха членов экипажей воздушных судов гражданской авиации Российской Федерации».

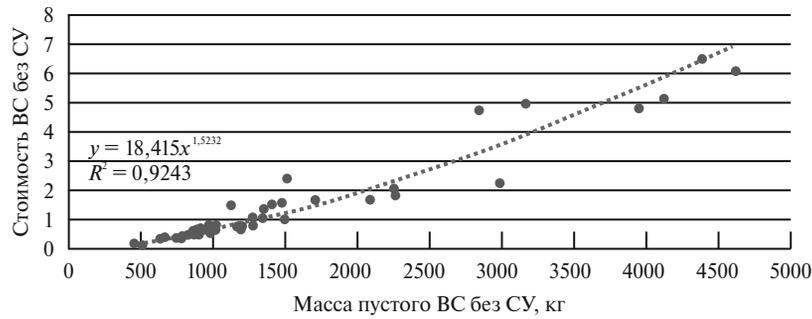


Рис. 3. Зависимость стоимости ВС без СУ от веса пустого снаряженного ВС без СУ, млн долл.

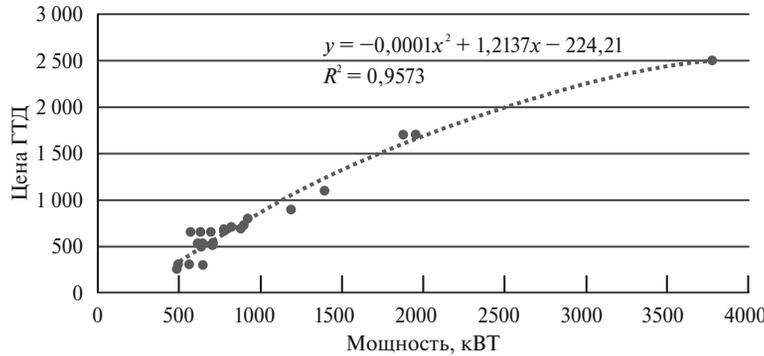


Рис. 4. Зависимость стоимости ГТД от мощности, тыс. долл.

Стоимость самолета МА без СУ хорошо описывается зависимостью от веса пустого снаряженного самолета минус вес СУ (рис. 3).

Стоимость СУ складывается из стоимостей ГТД и электрических составляющих ГСУ. Стоимость ГТД зависит от тяги (мощности) двигателей (рис. 4). Стоимость электрической составляющей двигательной установки оценивается через удельную стоимость ее основных составных компонентов (электродвигателей, генераторов, контроллеров, АКБ и т.д.) с учетом имеющихся прогнозов снижения удельной стоимости компонентов.

Годовые расходы на владение c_{i1} зависят от цены ВС CMP_i через статистический размер лизинговой ставки или через формулу аннуитетного платежа в предположении, что самолеты приобретаются в лизинг на n лет со ставкой p процентов годовых и долей авансового платежа t :

$$c_{i1} = CMP_i(1-t)p(1+p)^n / ((1+p)^n - 1). \tag{5}$$

Расходы на страховку определяются рыночной стоимостью каждой сравниваемой модели ВС. Средние расходы на страховку оцениваются в расчете на рейс как $1,6 \times 10^{-6}$ рыночной стоимости ВС плюс 4,7 долл. (Stoll, Veble Mikic, 2016): $c_i^{ins} = CMP_i x + s$, где c_i^{ins} — стоимость страховки в расчете на рейс; x, s — заданные коэффициенты.

Прочие статьи расходов, не зависящие от конкретной модели ВС и являющиеся постоянными, оцениваются экспертным путем с учетом структуры расходов авиакомпаний. Согласно (5) усредненные расходы на владение, страховку и прочие статьи постоянных расходов на рейс \bar{C}_i^{Const} рассчитываются по формуле $\bar{C}_i^{Const} = \sum_k c_{ik} / N_i + c_i^{ins}$, где c_{ik} — годовое значение расходов по статье k постоянных расходов.

Удельные расходы на кресло-километр (ккм) определяются по формулам:

$$C_i^{ккм} = \frac{C_i^{рейс}}{\sum_{j \in L} K_{ij} N_j / \sum_{j \in L} N_j} \times \frac{\bar{n}_{i,рейс}^{max} W}{\bar{n}_{i,рейс}^{max} W + \bar{W}_{i,рейс}^{freight}}, \quad K_{ij} = \min(MaxSeats_i; (Pl_{ij} - W_{ij}^{freight}) / W) l_j,$$

где $C_i^{ккм}$ — средние суммарные расходы на кресло-километр модели i на сети применения L ; K_{ij} — максимально возможный объем работы модели i ВС, выраженный в доступных кресло-километрах, который может быть выполнен за один рейс на линии j с учетом протяженности полета и функциональных возможностей самолета; $MaxSeats_i$ — пассажировместимость модели i .

3. ПРИМЕР РАСЧЕТА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ РАСХОДОВ

Применение методики для расчета ПЭР рассмотрим на примере электрического самолета «Eviation Alice» текущего и перспективного поколений, а также функционально схожих с ними самолетов МА вместимостью 9–19 мест и формирующих конкурентную группу. При расчете учитывались следующие исходные данные, допущения и оценки.

1. При оценке заработных плат летного экипажа были использованы данные о средней оплате труда командиров и вторых пилотов ВС существующих моделей⁸, скорректированные с учетом относительного уровня заработных плат летных экипажей в РФ⁹. Для самолетов пассажировместимостью 19 мест численность экипажа определена в два человека, для 9-местных самолетов — 1 человек. Оплата труда для одночленного экипажа составляет 54 долл. за 1 л.ч. (летный час), а для двухчленного — 66 долл. за 1 л.ч.

2. Текущая оценочная стоимость электрического самолета «Eviation Alice» оценивается в 4 млн долл. Можно ожидать, что в 2030-е годы, по мере выхода на рынок конкурирующих продуктов и/или с ростом серийности цена на самолет снизится (Stoll, Veble Mikic, 2016). Оценка стоимости самолета «Eviation Alice» для 2030-х годов получена при условии сохранения ее текущей весовой сводки — максимальной взлетной массы и массы пустого снаряженного ВС (предполагаемое улучшение удельных весов элементов переведено в дополнительные модули АКБ, что приведет к росту дальности полета с 815 км до 1330 км) и составит 2,48 млн долл., из которых стоимость ВС без СУ — 2,2 млн долл., а стоимость электрической СУ — 280 тыс. долл. На рис. 5 представлены результаты оценки рыночных стоимостей для сравниваемых самолетов исходя из их параметров (весовой сводки, мощности ГТД и состава электрической части СУ).

3. Стоимость электрической составляющей двигательной установки определяется стоимостью компонентов при следующих допущениях (Stoll, Veble Mikic, 2016): стоимость генератора принята равной 200 долл. за 1 кВт мощности; стоимость контроллера электродвигателя — 100 долл. за 1 кВт мощности; электродвигателя — 50 долл. за 1 кВт мощности. Оценка стоимости АКБ получена на основе прогнозов (Mauler et al., 2021), а цена 1 кВт × ч АКБ в сборке на период 2020-х гг. может оцениваться в 94 долл., а в 2030-е годы — 62 долл.

4. Поскольку в рассмотрении участвуют перспективные самолеты с ЭСУ, в расчетах принято допущение, что используемая в ГСУ аккумуляторная батарея должна быть заменена через каждые 2000 циклов. Для электрического самолета «Eviation Alice» резервы на замену АКБ составят 39 долл. за рейс в период 2020-х годов и 43 долл. за рейс в 2030-х годов (увеличение расходов на АКБ для

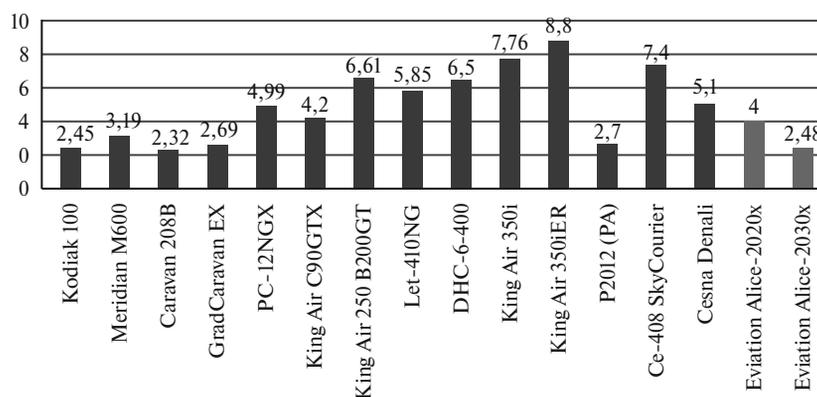


Рис. 5. Расчетные цены ВС конкурентной группы, млн долл.

⁸ <https://www.propilotmag.com/arc/>

⁹ <https://www.kommersant.ru/doc/4816292>

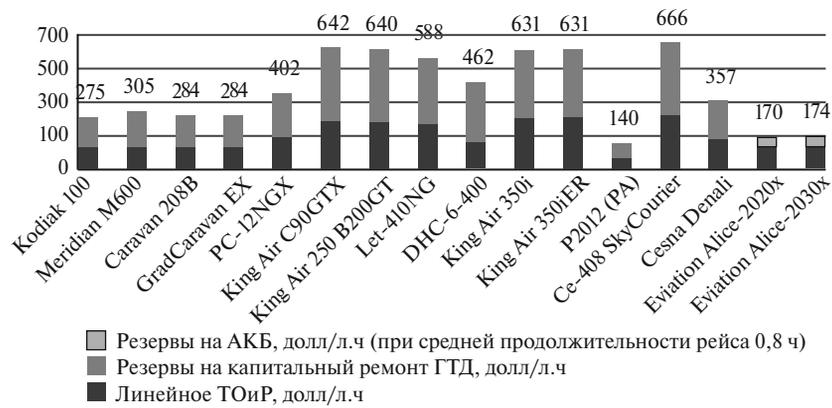


Рис. 6. Затраты на ТОиР для сравниваемых моделей самолетов, долл./л.ч

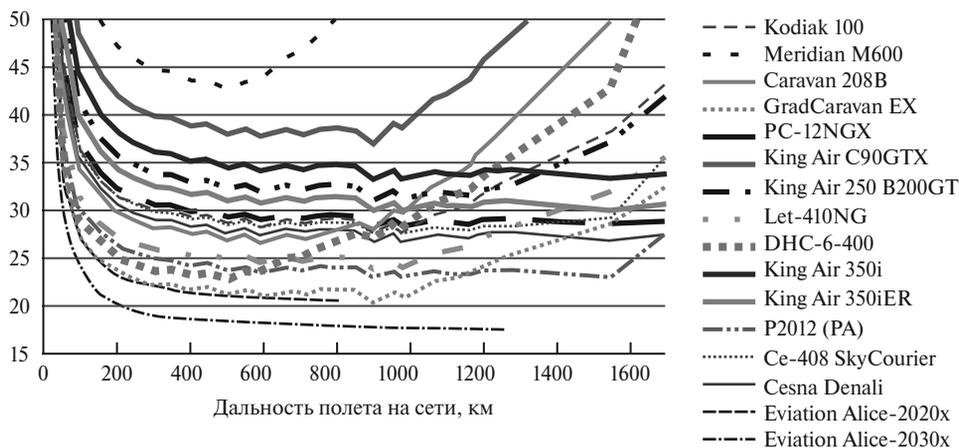


Рис. 7. Средние расходы на кресло-километр (ккм) от дальности при средних ценах на топливо, руб.

«Eviation Alice» связано с увеличением емкости АКБ на 63% и снижением ее удельной стоимости на 34%). На рис. 6 представлены результаты оценки затрат на ТОиР для сравниваемых самолетов.

5. Тарифы на услуги в аэропорту учтены комплексно и определены как средние взвешенные значения по аэропортам сети применения.

6. С учетом перспективы существенного изменения стоимости авиационного керосина к 2035 г. (под влиянием изменения стоимости нефти, расширения использования синтетического авиатоплива и введения различного вида платежей за дополнительные выбросы углерода в атмосферу¹⁰) в качестве допущения стоимость топлива в среднем принята 1100 долл. за 1 т.

7. Поскольку самолеты с ГСУ и электрические самолеты предполагают зарядку АКБ на земле, в расходах на топливо и энергию также необходимо учесть расходы на зарядку электроэнергией. В качестве допущения перспективная стоимость 1 кВт × ч электроэнергии была принята на уровне 7 руб. за 1 кВт × ч (с учетом курса конвертации валют соответствует среднему значению для стоимости энергии в (Stoll, Veble Mikic, 2016)), а эффективность зарядки — на уровне 95%.

На рис. 7 представлен результат расчетов средних удельных расходов на кресло-километр для самолета «Eviation Alice» и его конкурентной группы.

Сравнение удельных расходов показывает, что самолет «Eviation Alice» в технологиях 2020-х годов имеет более низкие удельные расходы на кресло-километр, чем у всех существующих самолетов конкурентной группы, при этом существенно уступая им по дальности полета и по взлетно-посадочным характеристикам. В то же время развитие технологий электромашин и АКБ

¹⁰ Так называемого углеродного налога (Клочков, Охапкин, 2021).

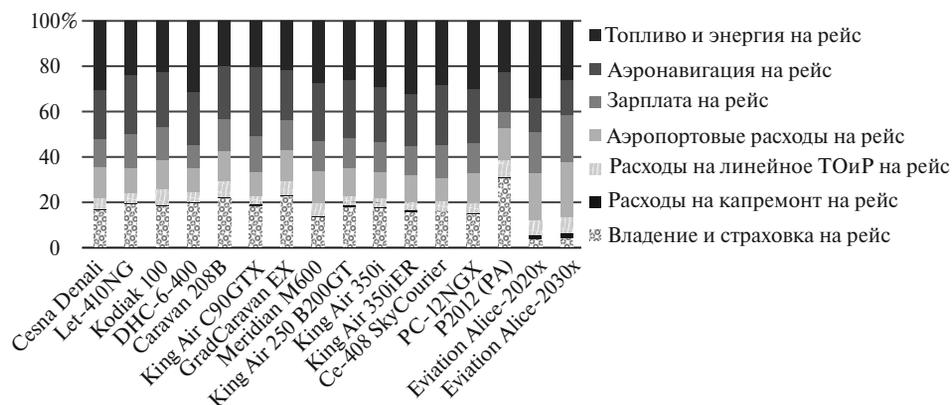


Рис. 8. Структура расходов самолетов МА для средних цен на авиатопливо

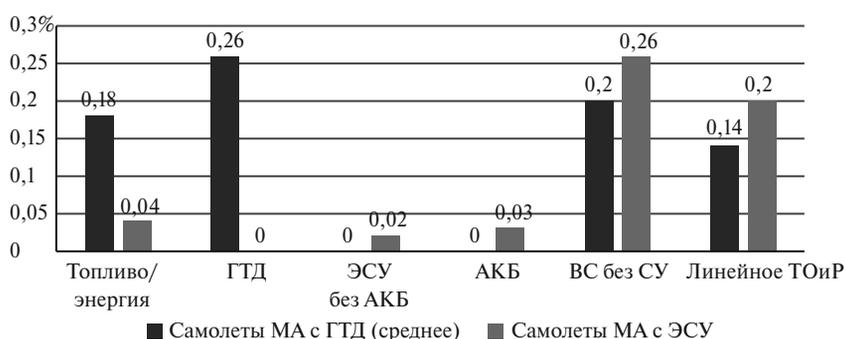


Рис. 9. Чувствительность уровня расходов самолетов МА по факторам стоимости (изменение уровня ПЭР при изменении фактора на 1%), %

в 2030-е годы позволит электрическому самолету «Eviation Alice» без изменения максимальной взлетной массы (МВМ) существенно приблизиться по дальности полета к летно-техническим характеристикам большинства самолетов МА.

Полученная в ходе расчета структура прямых эксплуатационных расходов по статьям представлена на рис. 8. В целом для большинства существующих самолетов МА наблюдается схожее распределение расходов по статьям затрат, из которых наиболее затратными являются техническое обслуживание и владение. Исключение составляет поршневой «Теспат Р2012», обладающий относительно низкой ценой, но большим расходом топлива. Существенные изменения в структуре себестоимости перевозки наблюдаются у электрических самолетов «Eviation Alice» с АКБ. Для них доля расходов на топливо и энергию составит менее 4–5% общей себестоимости перевозки. При этом доля аэропортовых расходов увеличится почти вдвое, поскольку 9-местный электрический самолет обладает МВМ, сопоставимой с МВМ 19-местного ВС.

Анализ чувствительности уровня ПЭР к факторам показал, что самолеты с ГТД обладают высоким потенциалом снижения ПЭР за счет удешевления наиболее дорогого агрегата самолета — СУ (при сокращении стоимости ГТД на 1% снижение ПЭР составит около 0,26%), а также за счет сокращения стоимости ВС без СУ (0,2% снижения ПЭР при снижении стоимости ВС без СУ на 1%) и повышения топливной эффективности (0,18% снижения ПЭР при снижении расходов на топливо на 1%) (рис. 9).

ПЭР электрических самолетов МА обладают низкой чувствительностью к стоимости электроэнергии, электромашин и АКБ. Наибольшее удешевление ПЭР может быть достигнуто за счет факторов, не связанных с ЭСУ, — снижения стоимости ВС без СУ и линейного технического обслуживания.

Чувствительность ПЭР традиционных самолетов к стоимости ГТД выше, чем к расходам на топливо (топливная эффективность). Поскольку затраты на улучшение характеристик по мере зрелости технологии увеличиваются, такое соотношение может свидетельствовать об экономически

обоснованном пределе улучшения характеристик ГТД, достижение которого потребует перехода на новые технологии СУ. Нахождение подобного предела при учете изложенных в статье результатов может служить темой отдельного исследования.

Развитие технологий в области электромашин и АКБ (главным образом, способствующих повышению плотности энергии АКБ) может расширить диапазоны применения самолетов с ЭСУ и сделать все турбовинтовые самолеты неконкурентоспособными на маршрутах протяженностью до 1000 км (основных маршрутах применения таких самолетов). Моделирование показало, что возможна ситуация, когда самолет с ЭСУ, подобный самолету «Eviation Alice» в технологиях 2030-х годов, при пассажироместности 19 мест¹¹ и дальности полета около 900 км будет обладать ПЭР около 8–10 руб/ккм, что превосходит по экономичности перевозки не только всех существующих самолетов МА с традиционной СУ, но и более крупные по вместимости турбовинтовые региональные самолеты (ПЭР около 10–13 руб/ккм).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложена методика оценки ПЭР перспективных самолетов МА с альтернативными типами силовых установок. В основе методики лежат найденные авторами регрессионные зависимости между мощностью силовой установки и ее стоимостью, уровнем расходов на техобслуживание и ремонт силовой установки, стоимостью ВС и расходов на линейное обслуживание самолета от его массовых характеристик. Найденные зависимости позволяют рассматривать расходы, связанные с силовой установкой и остальными составляющими самолета, обособленно друг от друга, что позволит получать сравнимые между собой оценки себестоимости перевозки на сети применения для перспективных ВС.

Предлагаемый в статье подход демонстрируется на примере расчета ПЭР для наиболее перспективного на сегодняшний день электрического самолета МА — «Eviation Alice», вместе с действующими ВС МА его конкурентной группы. Анализ полученных результатов показал, что электрический самолет 2020-х годов обладает более низкими удельными расходами на кресло-километр, чем у всех существующих самолетов конкурентной группы, при этом существенно уступая им по дальности полета и по взлетно-посадочным характеристикам. С учетом развития технологий АКБ в 2030-х годах, без изменения МВМ, электрический самолет «Eviation Alice» сможет существенно приблизиться по дальности полета к своим конкурентам. Отличия могут наблюдаться в структуре себестоимости перевозки между классическими и электрическим ВС: для вторых доля расходов на топливо и энергию значительно сократится и составит менее 4–5% общей себестоимости перевозки, но из-за роста массы ВС почти вдвое вырастут аэропортовые расходы. В перспективе конкурентоспособность всех турбовинтовых самолетов в сегменте до 1000 км будет снижаться.

Предложенная в статье методика может быть использована как инструмент моделирования и оценки прямых эксплуатационных расходов отечественных перспективных ВС разных размерностей как с ГТД, так и с гибридными, и электрическими СУ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

- Власенко А.О., Сухарев А.А., Урюпин И.В.** (2023). Оценка качества функционирования авиатранспортной системы как инструмент формирования требований к перспективной авиационной технике // *Управление большими системами*. Вып. 104. С. 73–99. [Vlasenko A.O., Sukharev A.A., Uryupin I.V. (2023). Developing the air transportation system quality assessment tools to define the main requirements for future aircraft. *Large-Scale Systems Control*, 104, 73–99 (in Russian).]
- Иванилов Ю.П., Лотов А.В.** (1979). Математические модели в экономике. Учебное пособие для вузов. М.: Наука. [Ivanilov Y.P., Lotov A.V. (1979). *Mathematical models in economics. Textbook for universities*. Moscow: Nauka (in Russian).]
- Клочков В.В., Охапкин А.А.** (2021). Международное регулирование в области защиты окружающей среды от воздействия авиации и новые вызовы экономической безопасности России // *Экономическая безопасность*. № 4. С. 1329–1346. [Klochkov V.V., Okhapkin A.A. (2021). International regulation of environmental

¹¹ Увеличение пассажироместности потребует существенного увеличения кабины ВС, которое не рассматривалось в данной прикидочной оценке, но может негативно сказаться на уровне расходов.

protection from the aviation effects and new challenges to the economic security of Russia. *Economic Security*, 4, 1329–1346 (in Russian).]

- Клочков В.В., Русанова А.Л., Максимовский В.И.** (2010). Экономико-математическое моделирование процессов освоения серийного производства новых гражданских самолетов // *Вестник Московского авиационного института*. Т. 17. № 3. С. 235–245. [Klochkov V.V., Rusanova A.L., Maksimovskiy V.I. (2010). Economic-mathematical modeling of new civil aircraft production launching processes. *Aerospace MAI Journal*, 17, 3, 235–245 (in Russian).]
- Кородюк И.С., Гринев Д.М.** (2019). Методические особенности определения себестоимости услуг регулярных пассажирских авиаперевозчиков для различных видов коммерческой загрузки // *Транспортное дело России*. № 1. С. 147–150. [Korodyuk I.S., Grinyov D.M. (2019). Methodical features of determining the cost of services of regular passenger air carriers for various types of commercial load. *Transport Business of Russia*, 1, 147–150 (in Russian).]
- Манвелидзе А.Б.** (2018). Расходы на эксплуатацию воздушных судов крупных американских авиаперевозчиков // *Стратегические решения и риск-менеджмент*. № 4 (107). С. 72–91. [Manvelidze A.B. (2018). Operating expenses for large American air carriers. *Strategic Decisions and Risk Management*, 4, 107, 72–91 (in Russian).]
- Опрышко Н.В., Опрышко Ю.В., Рубан Н.В.** (2013). Динамическая модель оценки затрат на эксплуатацию пассажирского воздушного судна // *Электронный журнал «Труды МАИ»*. № 69. Режим доступа: <https://trudymai.ru/published.php?ID=43301> [Opryshko N.V., Opryshko Y.V., Ruban N.V. (2013). Dynamic model to calculate operating costs of passenger aircraft. *Trudy MAI*, 69. Available at: <https://trudymai.ru/published.php?ID=43301> (in Russian).]
- Халютин С.П., Давидов А.О., Жмуров Б.В.** (2017). Электрические и гибридные самолеты: перспективы создания // *Электричество*. № 9. С. 4–16. [Khalyutin S.P., Davidov A.O., Zhmurov B.V. (2017). Electric and hybrid aircraft development prospects. *Electricity*, 9, 4–16 (in Russian).]
- Finger D.F., Goetten F., Braun C., Cees B.** (2019). Cost estimation methods for hybrid-electric general aviation aircraft. In: *2019 Asia-Pacific International Symposium on Aerospace Technology (APISAT 2019)*, 265–277.
- Fioriti M., Vercella V., Viola N.** (2018). Cost-estimating model for aircraft maintenance. *Journal of Aircraft*, 55, 4, 1564–1575.
- Fregnani J.A., Mattos B.S., Hernandez J.A.** (2019). An innovative approach for integrated airline network and aircraft family optimization. In: *AIAA Aviation 2019 Forum*, 2865. DOI: 10.2514/6.2019-2865
- Hoelzen J., Silberhorn D., Zill T., Bensmann B., Hanke-Rauschenbach R.** (2022). Hydrogen-powered aviation and its reliance on green hydrogen infrastructure-review and research gaps. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47, 5, 3108–3130.
- Mauler L., Duffner F., Zeier W.G., Leker J.** (2021). Battery cost forecasting: A review of methods and results with an outlook to 2050. *Energy & Environmental Science*, 14, 9, 4712–4739.
- Ribeiro J., Afonso F., Ribeiro I., Ferreira B., Policarpo H., Peças P., Lau F.** (2020). Environmental assessment of hybrid-electric propulsion in conceptual aircraft design. *Journal of Cleaner Production*, 247, 119477.
- Roy S., Crossley W.A., Moore K.T., Gray J.S., Martins J.R.** (2019). Monolithic approach for next-generation aircraft design considering airline operations and economics. *Journal of Aircraft*, 56, 4, 1565–1576.
- Stoll A.M., Veble Mikic G.** (2016). Design studies of thin-haul commuter aircraft with distributed electric propulsion. In: *16th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference*, 3765. DOI: 10.2514/6.2016-3765
- Washington S., Karlaftis M.G., Mannering F., Anastasopoulos P.** (2020). *Statistical and econometric methods for transportation data analysis*. CRC press. 496 p.
- Woehler S., Hartmann J., Prenzel E., Kwik H.** (2019). *Preliminary aircraft design for a mid-range reference aircraft taking advanced technologies into account as part of the AVACON project for an entry into service in 2028*. DOI: 10.25967/480224. Available at: <https://www.dglr.de/publikationen/2019/480224.pdf>

Method of estimating direct operating costs for prospective aircraft with alternative propulsion systems

© 2024 I.V. Uryupin, A.O. Vlasenko

I.V. Uryupin,

Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia; e-mail: uryupin93@yandex.ru

A.O. Vlasenko,

Intersectoral analytical center, Moscow, Russia; e-mail: andrey.vlasenko84@gmail.com

Received 06.06.2023

Abstract. At present, in an unstable geopolitical situation, one of the most important tasks for the Russian Federation is the creation of advanced domestic aircraft that will not be inferior to its foreign counterparts. The cost of operating is the main criterion in the design of a new aircraft to ensure competitiveness in air transport systems. This article provides new regression relations between the power or thrust of a propulsion system and its cost — the level of costs for maintenance and repair of the propulsion system. These relationships make it possible to consider the costs of the propulsion system and airframe separately from each other. This approach makes it possible to obtain estimates of the cost of transportation for existing and promising aircraft, both with classic gas turbine engines and with hybrid and electric propulsion systems. The article provides a method for estimating direct operating costs for promising light aircraft based on these relationships. The calculation of operating costs and cost structure using the example of the “Eviation Alice” electric aircraft and similar functional analogs is demonstrated.

Keywords: mathematical modeling, aviation technology, direct operating costs, competitiveness.

JEL Classification: C51, L93, O32.

UDC: 338.45.

For reference: **Uryupin I.V., Vlasenko A.O.** (2024). Method of estimating direct operating costs for prospective aircraft with alternative propulsion systems. *Economics and Mathematical Methods*, 60, 2, 92–104. DOI: 10.31857/S0424738824020087 (in Russian).

Динамические и агентные модели интеллектуальных транспортных систем

© 2024 г. Л.А. Бекларян, Г.Л. Бекларян, А.С. Акопов, Н.К. Хачатрян

Л.А. Бекларян,

ЦЭМИ РАН, Москва; e-mail: beklar@cemi.rssi.ru

Г.Л. Бекларян,

ЦЭМИ РАН, Москва, e-mail: glbeklaryan@gmail.com

А.С. Акопов,

ЦЭМИ РАН, Москва; e-mail: akopovas@umail.ru

Н.К. Хачатрян,

ЦЭМИ РАН, Москва; e-mail: nerses-khachatryan@yandex.ru

Поступила в редакцию 04.07.2023

Аннотация. В статье представлены разработанные авторами математические и имитационные модели интеллектуальных транспортных систем (ИТС) — динамическая модель грузоперевозок и агентная модель ИТС «Манхэттенская решетка». Изучена проблема рационального железнодорожного планирования, относящаяся к исследованию режимов грузоперевозок и соответствующих им грузопотоков в рамках динамической системы. Выполнено моделирование процесса грузоперевозок с учетом механизма взаимодействия основных элементов железнодорожной инфраструктуры. Определены диапазоны изменения параметров, при которых система грузоперевозок может бесперебойно функционировать. На примере ИТС «Манхэттенская решетка» изучены возможности имитационного моделирования транспортных и пешеходных потоков на микроуровне с учетом сложных взаимодействий между гетерогенными агентами, в частности транспортными средствами (ТС) и пешеходами (V2P), ТС и ТС (V2V), ТС и инфраструктурными элементами (светофорами) (V2I) и т.д. Показано, что ИТС с частично регулируемые пешеходными переходами имеет преимущество по уровню суммарного трафика по сравнению с нерегулируемыми переходами, особенно при малоинтенсивном и высокоскоростном движении. Приведенные в статье модели объединяет единство их инструментального описания. Для моделей первого типа все действия на микроуровне строго регламентированы. Поэтому такие системы хорошо характеризуют установившиеся макропоказатели — состояния класса солитонных (решений типа бегущей волны). В моделях второго типа на микроуровне существуют большие флуктуации, которые влияют на безопасность участников движения (образование пробок, аварии и т.д.). Этим объясняется и применение агентных моделей, учитывающих процессы на микроуровне. Макропоказатели являются важнейшими характеристиками для проверки адекватности агентных моделей.

Ключевые слова: интеллектуальные транспортные системы, модели грузоперевозок, Манхэттенская решетка, агентное моделирование транспортных систем, моделирование дорожного движения, динамические транспортные системы, управление железнодорожным транспортом, умные светофоры.

Классификация JEL: C53, C63, R40, R41.

УДК: 519.876.5, 656.073.7, 656.11.

Для цитирования: Бекларян Л.А., Бекларян Г.Л., Акопов А.С., Хачатрян Н.К. (2024). Динамические и агентные модели интеллектуальных транспортных систем // Экономика и математические методы. Т. 60. № 2. С. 105–122. DOI: 10.31857/S0424738824020091

ВВЕДЕНИЕ

Одной из крупнейших базовых отраслей экономики любого государства является транспорт. Он обеспечивает географическую связанность территорий страны и координацию работы всех отраслей экономики. Транспорт создает условие для эффективного функционирования государства, а его развитие является важнейшим условием модернизации экономики. Транспорт помогает развитию международных экономических отношений, освоению новых экономических районов, обеспечению обороноспособности страны.

При описании интеллектуальных транспортных систем выделяют две группы моделей:

- динамические модели транспортных сетей и их загрузки, а также модели динамики грузоперевозок;
- агентные модели интеллектуальных транспортных систем (ИТС).

Для моделей первого типа все действия на микроуровне строго регламентированы. Такие системы хорошо характеризуются установившимися макропоказателями – состояниями класса солитонных решений (решений типа бегущей волны). В моделях второго типа наблюдаются большие флуктуации на микроуровне, влияющие на безопасность участников движения (образование пробок, аварии и т.д.). Чтобы этого избежать, применяются агентные модели, учитывающие процессы на микроуровне. Макропоказатели – состояния типа солитонных решений применяются для проверки адекватности агентных моделей. По сути, установившиеся состояния типа солитонных решений рассматриваются как нулевое приближение истинных состояний, и по ним происходит верификация агентной модели. В рассматриваемых агентных моделях транспортных потоков механизм, описывающий возникновение экстремальных состояний в системе, основан на понятии личного пространства агента. Он зависит от плотности окружающего пространства. Данная характеристика, введенная авторами в работах об управлении поведением толпы в экстремальных ситуациях, оказалась весьма плодотворной также и в моделях управления последствиями выбросов в атмосферу, что позволило описать процессы диффузии и поглощения в динамике атмосферных потоков.

Первая группа транспортных моделей представлена, в частности, такими моделями расчета корреспонденций, как гравитационная (Carrothers, 1956; Wilson, 1971), энтропийная (Harris, Wilson, 1978; Попков, 1995), модели семейства конкурирующих центров (Fotheringham, 1986), а также распределения потоков по сети (Shvetsov, 2009; Lo, Chen, 2000; Bar-Gera, 2002). Отдельно следует выделить класс динамических транспортных моделей, среди которых наиболее известными являются макроскопические (гидродинамические), кинетические (газодинамические) и микроскопические.

Макроскопические модели (Daganzo, 1995; Kuhne, 1984; Kerner, 2009; Гасников и др., 2013) описывают усредненные характеристики транспортного потока. Такие модели также называют гидродинамическими, потому что в них сам поток уподобляется движению несжимаемой жидкости. Макроскопические диаграммы, отображающие взаимосвязь между параметрами производительности (плотность движения, поток транспорта и скорость движения транспортных средств), используются для представления режимов движения и настроек системы (Daganzo, 2008; Geroliminis, Sun, 2011; Cassidy, Jang, Daganzo, 2011). Микроскопические модели описывают движение каждого транспортного средства. Они точнее макроскопических моделей отражают движение на отдельных участках транспортной сети, однако требуют больших вычислительных мощностей.

Первые микроскопические модели были предложены в 1950-е годы (Pipes, 1953; Швецов, 2003). Примерами таких моделей являются модели следования за лидером (Gazis, Herman, Rothery, 1961; Brackstone, McDonald, 2000), оптимальной скорости (Bando et al., 1998; Tomer, Safonov, Havlin, 2000), Трайбера (Treiber, Hennecke, Helbing, 2000), а также модели клеточных автоматов (Cremer, Ludwig, 1986; Chowdhury, Santen, Schadschneider, 2000). Кинетические модели занимают промежуточное место между макроскопическими и микроскопическими моделями. В них поток задается плотностью распределения транспортных средств в фазовом пространстве, при этом динамика фазовой плотности описывается кинетическим уравнением. Оно получается в результате усреднения результатов взаимодействия индивидуальных транспортных средств (Helbing, Treiber, 1998; Nelson, 1995).

Указанные выше модели наиболее приспособлены для исследования автомобильного трафика. В них также присутствуют случайные воздействия, связанные как с большим числом агентов в системе, так и с человеческим фактором.

Для такой географически протяженной страны, как Россия, особую роль играет железнодорожный транспорт. Он обеспечивает надежную и экономичную доставку грузов, особенно когда требуется быстрая доставка больших объемов. Публикации, посвященные железнодорожной логистике, по типу исследуемых задач можно разделить на три группы.

Первая группа представлена задачами проектирования инфраструктуры железнодорожной сети (Ferreira, Murray, 1997; Higgins, Ferreira, Kozan, 1995; Крау, Barker, Chen, 1991).

Во вторую группу вошли задачи управления парком локомотивов и вагонов. В зависимости от особенностей регулирования и рынка для каждого конкретного региона могут быть построены свои модели, учитывающие их ту или иную специфику. В качестве примера можно рассмотреть

работу (Fukasawa et al., 2002), в которой представлена модель, применяемая одним из крупнейших железнодорожных транспортных операторов на территории Латинской Америки. Другим примером является работа (Ceselli et al., 2008), в которой рассматривается сразу несколько моделей оптимизации доставки грузов швейцарской железнодорожной грузовой компанией «Cargo Express Service of Swiss Federal Railways». Ряд публикаций посвящен моделям, спроектированным с учетом особенностей рынка грузовых перевозок в Италии (Lulli, Pietropaoli, Ricciardi, 2011; Campetella et al., 2006). В других работах исследуются модели минимизации издержек транспортировки грузов по железнодорожной сети, охватывающей несколько европейских стран (Andersen, 2009; Jeong, Lee, Bookbinder, 2007). Также существуют модели, созданные для российского рынка железнодорожных перевозок (Sadykov et al., 2013; Лазарев, Садыков, 2014).

Третья группа моделей посвящена задачам железнодорожного планирования. До недавнего времени она в основном состояла из задач формирования расписания движения грузовых поездов (Лазарев и др., 2012; Cacchiani, Caprara, Toth, 2010; Liu, Dessouky, 2017). В последние годы ее стали дополнять исследования, посвященные применению макроскопической теории трафика для описания процессов, происходящих на железнодорожном транспорте. В работе (Weik, 2022) приведено теоретическое исследование свойств потока трафика на однонаправленных железнодорожных линиях. Построены макроскопические фундаментальные диаграммы и показано, как они позволяют определить режимы потока и различные фазы движения поездов, что может быть полезно для проектирования системы и планирования эксплуатации.

Еще одно направление исследований, активно развивающихся в последние годы, связано с прогнозированием возникающих в железнодорожной системе задержек. Поезда в этой системе следуют по заранее определенным расписаниям, что позволяет эффективно использовать маршруты и пути. Временные отклонения от такой запланированной работы являются обычным явлением. Они принимают форму задержек и снижают эффективность системы. Малые задержки часто поглощаются встроенными буферами и поэтому не влияют на процесс перевозок (Zieger, Weik, Niesen, 2018; Dekker, Panja, 2021). Однако время от времени нарушения в логистике (часто вызванные такими внешними факторами, как погода) приводят к перегрузкам или даже масштабной остановке перевозок с негативными последствиями для общества и экономики (Ludvigsen, Klaboe, 2014; Buchel, Spanninger, Corman, 2020). Большинство моделей, в которых изучаются задержки, основаны на расписаниях железнодорожной системы, где поезда являются агентами, которые могут нести задержки (Goverde, 2010; Gambardella, Rizzoli, Funk, 2002; Harrod, Cerreto, Nielsen, 2019). В противоположность этому в работе (Dekker et al., 2022) задержки фигурируют как переменные, связанные с узлами (станциями) и ребрами железнодорожной сети, которые остаются на своих местах. Распространение задержек между этими узлами не обязательно должно описываться в терминах дискретных поездов и событий, а может основываться исключительно на таких общих (или даже системных) величинах, как топология сети и расписание. Авторы (Dekker et al., 2022) проводят аналогию с гидродинамикой: тогда как традиционно задержки воспринимаются как лагранжевы частицы (т.е. следуют за поездами как жидкость, переносимая частицы), авторы предлагают рассматривать их с эйлеровой точки зрения (т.е. как входящие и исходящие задержки в фиксированной пространственной системе). Такое представление задержек названо распространением *типа диффузии*. На уровне микромасштаба следует ожидать, что такой нетрадиционный подход к обработке задержек будет менее точным, чем более подробные модели, но на большом масштабе производительность такой модели повысится. Модель содержит только простую информацию о расписании (например, частоты поездов и времена поездок). Вся информация модели составляет одну матрицу, что облегчает анализ свойств системы.

Вторая группа транспортных моделей представлена агентными моделями интеллектуальных транспортных систем (ИТС). Так, например, имитационные модели ИТС класса «Манхэттенской решетки» были предложены в работах (Brassil, Choudhury, Maxemchuk, 1994; Heywood, Richmond, Maddock, 2015; Акоров, Beklaryan L., Beklaryan A., 2020; Sarma et al., 2021). При этом основное внимание в этих работах уделялось преимуществам и недостаткам дорожной сети на основе «Манхэттенской решетки» для города, проблемам формирования пробок и оптимизации трафика, сценарному моделированию развития дорожной ситуации для минимизации рисков возникновения ДТП и увеличения трафика выходного потока и др.

В настоящее время во многих крупных городских агломерациях наблюдается существенное увеличение трафика дорожного и пешеходного потоков, требующего построения интеллектуальных систем, в том числе с использованием наземных беспилотных транспортных средств (Акоров

et al., 2022; Акопов, Бекларян, 2022), «умных светофоров» (Акопов, Beklaryan, 2024; Бекларян А., Бекларян Л., Акопов, 2023) и других решений, направленных на оптимизацию трафика. Увеличение пробок на дорогах наносит существенный ущерб экономике города, в частности приводит к росту расходов на грузоперевозки, нерациональному расходу времени со стороны экономически активного населения, ухудшению экологической обстановки с отрицательными последствиями для здоровья населения, снижению производительности труда и замедлению экономического роста (Sweet, 2014; Samal, Mohanty, Santhakumar, 2021). Улучшение мобильности водителей и пешеходов чрезвычайно важны для экономики города: повышается доступность магазинов, торговых и развлекательных центров, объектов социальной инфраструктуры и т.д. В результате каждый человек за день успевает посетить большее число целевых объектов, приобрести большее число товаров и услуг и т.д. Поэтому в предложенной нами имитационной модели равное внимание уделяется динамике транспортных и пешеходных потоков, которые должны быть максимизированы. Для ИТС также изучаются макропоказатели в форме установившихся состояний класса солитонных решений. Такие модели имеют степень детализации потоков разных уровней. В исходной макромоделе (Акопов, Beklaryan, 2024; Beklaryan А., Beklaryan Л., Акопов, 2023) в узлах «Манхэттенской решетки» задается величина всего потока без детализации направлений движения агента.

1. МОДЕЛИ ГРУЗОПЕРЕВОЗОК

Не менее важной проблемой железнодорожного планирования является исследование режимов грузоперевозок и соответствующих им грузопотоков в рамках динамической системы, описывающей процесс грузоперевозок в виде взаимодействия основных элементов железнодорожной инфраструктуры, в первую очередь станций. Такая проблема нашла отражение в работах (Beklaryan, Khachatryan, 2006; Бекларян, Хачатрян, 2013; Хачатрян, 2013; Khachatryan, Акопов, 2017; Khachatryan, Акопов, Belousov, 2018; Beklaryan, Khachatryan, Акопов, 2019; Khachatryan, 2020; Khachatryan, 2021; Хачатрян, Бекларян, 2021; Khachatryan, 2022). В них представлены динамические модели, в которых процесс организации грузоперевозок формирует грузопоток на основе взаимодействия станций. Правила взаимодействия станций зависят от характера спроса на грузоперевозки. При стабильно высоком спросе на грузоперевозки они направлены на использование в полном объеме технических возможностей станций. При отсутствии стабильно высокого спроса основной задачей взаимодействия станций является синхронизация входных и выходных потоков, что позволяет более эффективно осуществлять грузоперевозки, минимизировать задержки и обеспечивать плавный грузопоток.

Рассмотрим отдельно каждый случай.

В случае стабильно высокого спроса на грузоперевозки необходимо обеспечить загрузку определенного числа путей на станциях, которое представляет собой максимально возможное число задействованных путей на станциях, при котором гарантированно можно организовать бесперебойный грузопоток. Для исключения ситуаций, приводящих к сбою в системе грузоперевозок, при загрузке станций сверх указанного уровня необходимо часть грузов отправлять на временное хранение. Для этого предполагается создать специальные зоны хранения между станциями.

Одной из важных задач является организация системы контроля. Она призвана обеспечить вывод грузов из зон временного хранения. Рассматривается несколько конфигураций участка железнодорожной сети. Первая конфигурация представляет собой протяженный участок железнодорожной сети и подходит для описания транснациональных перевозок (например, перевозки по Транссибирской железнодорожной магистрали протяженностью более 9 тыс. км). Вторая конфигурация — замкнутая цепочка станций, третья — железнодорожная линия между двумя узловыми станциями. Модели, описывающие процесс организации грузоперевозок, задаются конечно разностным аналогом нелинейного параболического уравнения и нелокальными линейными ограничениями (система контроля).

Приведем описание этих моделей для трех конфигураций железнодорожной сети, представленной в работах авторов (Beklaryan, Khachatryan, 2006; Бекларян, Хачатрян, 2013; Khachatryan, Акопов, 2017; Khachatryan, Акопов, Belousov, 2018). *Важным и новым* здесь является программная (имитационная) реализация установившихся режимов грузоперевозок и изучение их зависимости от параметров системы.

Для *первой конфигурации* модель имеет вид:

$$\dot{z}_i(t) = \alpha z_{i-1} - 2\alpha z_i + \alpha z_{i+1} + \varphi(z_i), \quad i \in Z, \quad t \in [0, +\infty); \quad (1)$$

$$z_i(t) = z_{i+1}(t + \tau), \quad i \in Z, \quad t \in [0, +\infty), \quad (2)$$

где $z_i(t)$ — число задействованных путей на станции i в момент времени t ; α — параметр, определяющий взаимодействие соседних станций; τ — параметр, характеризующий систему контроля. В уравнении (1) грузопоток разделен на две составляющие — диффузионную и конвективную. Диффузионная составляющая потока (линейная часть уравнения (1)) определяет порядок перераспределения грузов между соседними станциями для сглаживания потока. Коэффициент α отвечает за нормативы переадресации грузов между соседними станциями. Если число задействованных путей на станции $i-1$ больше, чем число задействованных путей на станции i , то i принимает грузы со станции $i-1$ с интенсивностью $\alpha(z_{i-1} - z_i)$. В противном случае станция i с интенсивностью $\alpha(z_i - z_{i-1})$ отправляет грузы в зону временного хранения. Если число задействованных путей на станции i больше числа задействованных путей на станции $i+1$, то i отправляет грузы на станцию $i+1$ с интенсивностью $\alpha(z_i - z_{i+1})$. В противном случае станция i с интенсивностью $\alpha(z_{i+1} - z_i)$ принимает грузы из зоны временного хранения. Параметр τ описывает временной интервал сдвига единого замера потока на всех станциях. Очевидно, что величина параметра τ должна быть сопоставима со временем перемещения грузов между соседними станциями. Эта величина не должна быть слишком большой, так как подобный контроль грузопотоков может оказаться неактуальным. Поэтому одной из задач является определение диапазонов изменения параметра τ , при котором возникает установившийся грузопоток с заданной системой контроля.

Конвективная составляющая (нелинейная часть уравнения (1)) описывает движение грузов с учетом загруженности станций и основана на взаимодействии станции с соседними зонами временного хранения грузов (рис. 1). До тех пор пока число задействованных на станции путей не превышает критического значения Δ , конвективная составляющая грузопотока применяется для приема грузов из зоны временного хранения, расположенного до станции. Как только число задействованных путей начинает превышать значение Δ , конвективная составляющая грузопотока применяется для экстренного вывоза части грузов в зону временного хранения, расположенную после станции.

Отметим, что функция $\varphi(\cdot)$ на полупрямой $[\Delta, +\infty)$ является линейно убывающей (см. рис. 1) и, следовательно, вывоз грузов в зону временного хранения осуществляется с интенсивностью прямо пропорциональной превышению критического значения числа задействованных путей. Решения системы дифференциальных уравнений (1), удовлетворяющие условию (2) (решения системы (1)–(2)) называются решениями типа бегущей волны (солитонные решения), и определяют режимы грузоперевозок с заданной системой контроля. Доказано, что существует такой диапазон изменения характеристик системы контроля τ , что для каждого значения характеристики системы контроля из этого диапазона имеется единственный режим грузоперевозок, удовлетворяющий заданной системе контроля (Beklaryan, Khachatryan, 2006).

Для второй конфигурации железнодорожной сети (замкнутая цепочка, состоящая из n станций) модель, описывающая процесс грузоперевозок с заданной системой контроля, имеет вид:

$$\dot{z}_1(t) = \alpha z_n - 2\alpha z_1 + \alpha z_2 + \varphi(z_1), \quad t \in [0, +\infty); \quad (3)$$

$$\dot{z}_i(t) = \alpha z_{i-1} - 2\alpha z_i + \alpha z_{i+1} + \varphi(z_i), \quad i = 2, \dots, n-1, \quad t \in [0, +\infty); \quad (4)$$

$$\dot{z}_n(t) = \alpha z_{n-1} - 2\alpha z_n + \alpha z_1 + \varphi(z_n), \quad t \in [0, +\infty); \quad (5)$$

$$z_i(t) = z_{i+1}(t + \tau), \quad i = 1, \dots, n-1, \quad t \in [0, +\infty); \quad (6)$$

$$z_n(t) = z_1(t + \tau), \quad t \in [0, +\infty). \quad (7)$$

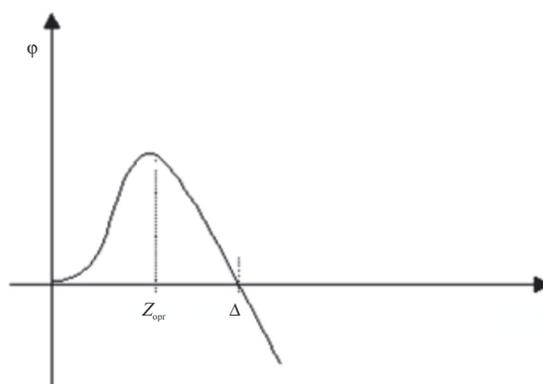


Рис. 1. График конвективной составляющей грузопотока

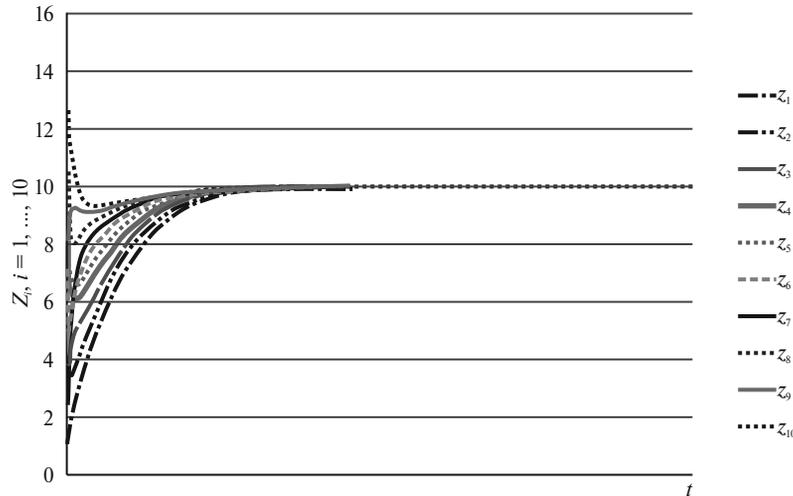


Рис. 2. Сходимость к стационарному решению

Показано, что всякое решение системы дифференциальных уравнений (3)–(5), удовлетворяющее условиям (6) и (7), является периодическим. Одним из таких решений является стационарное решение $(\Delta, \Delta, \dots, \Delta)$. Для выявления других решений изучены все решения системы дифференциальных уравнений (3)–(5) (т.е. не только решения типа бегущей волны, удовлетворяющие условиям (6)–(7)). Оказалось, что стационарное решение $(\Delta, \Delta, \dots, \Delta)$ глобально асимптотически устойчиво в классе всех решений системы (3)–(5) (Бекларян, Хачатрян, 2013). Таким образом, система (3)–(7) не имеет другого решения, отличного от стационарного решения $(\Delta, \Delta, \dots, \Delta)$, однако любое решение системы (3)–(5) со временем становится сколь угодно близким к нему (рис. 2). Это означает, что организация грузоперевозок по замкнутой цепочке станций по определенным выше правилам взаимодействия станций всегда приводит к установлению максимально возможного стационарного грузопотока. Время установления такого режима зависит как от нормативного коэффициента взаимодействия соседних станций (параметр α), так и от интенсивности привлечения конвективной составляющей для экстренного освобождения станций.

Для *третьей конфигурации* железнодорожной сети (железнодорожная линия между двумя узловыми станциями) модель грузоперевозок с заданной системой контроля имеет вид:

$$\dot{z}_0(t) = \psi_1(t) - \alpha z_0 + \alpha z_1 + \varphi_0(z_0), \quad t \in [0, +\infty); \tag{8}$$

$$\dot{z}_i(t) = \alpha z_{i-1} - 2\alpha z_i + \alpha z_{i+1} + \varphi(z_i), \quad i = 1, \dots, m, \quad t \in [0, +\infty); \tag{9}$$

$$\dot{z}_{m+1}(t) = \alpha z_m - \alpha z_{m+1} - \psi_2(t) + \varphi(z_{m+1}), \quad t \in [0, +\infty); \tag{10}$$

$$z_i(t) = z_{i+1}(t + \tau), \quad i = 0, \dots, m, \quad t \in [0, +\infty). \tag{11}$$

Функция $\varphi_0(\cdot)$ описывает вторую технологию на начальной узловой станции. На ней вторая технология используется только для разгрузки и поэтому она обладает следующими свойствами: на полупрямой $(-\infty, \Delta]$ тождественно равна 0, а на полупрямой $(\Delta, +\infty)$ является линейно убывающей. Функция $\psi_1(\cdot)$ представляет собой интенсивность подачи грузов на начальную узловую станцию (определяет взаимодействие начальной узловой станции с железнодорожными направлениями, примыкающими к ней), а функция $\psi_2(\cdot)$ — интенсивность распределения грузов с конечной узловой станции (взаимодействие конечной узловой станции с пунктами потребления грузов). Класс решений системы (8)–(11) чрезвычайно узок — система (8)–(11) не имеет решения за исключением случая, когда функции $\psi_1(\cdot)$ и $\psi_2(\cdot)$ тождественно равны нулю. Исследования показали невозможность организации грузопотока в рамках экзогенного взаимодействия начальной и конечной узловой станций с соответствующими объектами (при заданных экзогенных функциях $\psi_1(\cdot)$ и $\psi_2(\cdot)$). Это приводит к необходимости корректировки либо правил взаимодействия начальной станции и конечной узловых станций с соответствующими объектами, либо системы контроля. Как в первом, так и во втором случае формально речь идет о правильном расширении класса решений системы (8)–(11), которые назовем квазирешениями. Рассматривается два типа квазирешений. Первый тип предполагает эндогенные задания функций $\psi_1(\cdot)$ и $\psi_2(\cdot)$, начиная с момента

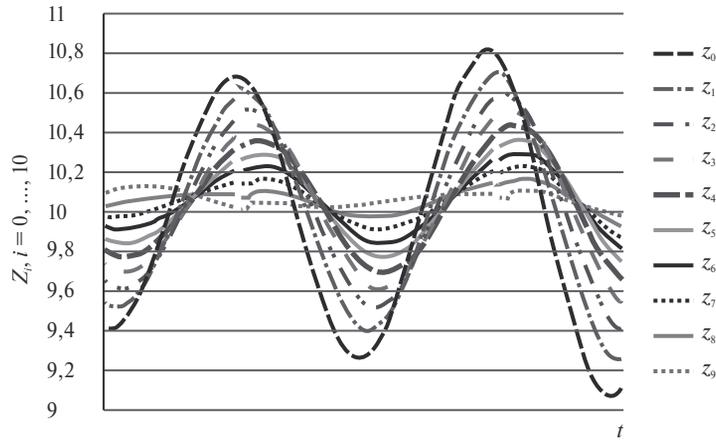


Рис. 3. Квазирешения первого типа

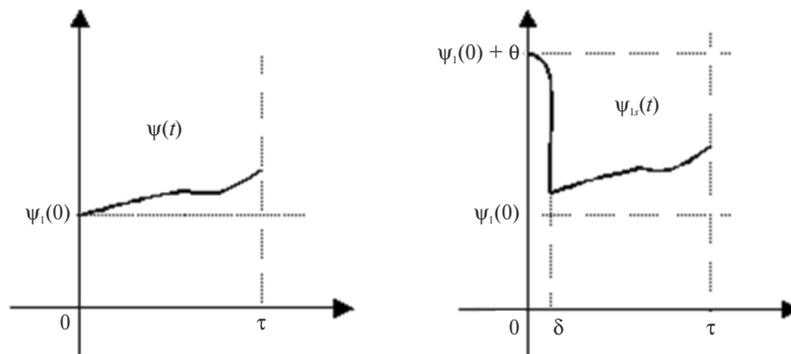


Рис. 4. Импульсное изменение функции $\psi_1(\cdot)$ в начальный период времени

времени, равного характеристике системы контроля, и допускает разрывные решения (рис. 3), второй тип допускает малые нарушения в системе контроля (т.е. выполнение условия (11) с некоторой погрешностью).

В работе (Khachatryan, Akorov, 2017) исследована зависимость величин разрывов квазирешений системы (8)–(11) первого типа от параметров модели (α, τ , параметров функций $\psi_1(\cdot), \psi_2(\cdot), \varphi_0(\cdot), \varphi(\cdot)$). Доказано, что эти разрывы можно сделать сколь угодно малыми (Beklaryan, Khachatryan, 2006). Для этого необходимо импульсно изменить функцию $\psi_1(\cdot)$ в начальный период времени (рис. 4).

Исследование квазирешений второго типа приведено в работе (Khachatryan, Akorov, Belousov, 2018). Показано, как управляя параметрами модели, сделать погрешность в выполнении условия (11) сколь угодно малой.

Перейдем к случаю отсутствия *стабильно высокого спроса* на грузоперевозки, при котором нет необходимости в полной мере задействовать потенциал станций и формирования наличия специальных зон между станциями для временного хранения части грузов. В такой ситуации важно синхронизировать входные и выходные потоки на станциях. В работах (Khachatryan, 2021, 2022) построены модели организации грузоперевозок между двумя узловыми станциями, описывающие данную проблему. Основной характеристикой станции с номером $i, i=0, \dots, m+1$ (0 — номер начальной узловой станции, $m+1$ — номер конечной узловой станции) в момент времени t является степень несогласованности между приемом и отправкой грузов, которая определяет дисбаланс между объемом входных и выходных грузов и задается функцией z_i , значения которой принадлежат отрезку $[0, 1]$. Начальная узловая станция принимает грузы в зависимости от спроса на перевозку и своего технического потенциала. Затем отправляет на следующую станцию в объеме ее технического потенциала. Каждая из промежуточных станций принимает грузы в объеме своего технического потенциала и отправляет в объеме технического потенциала следующей станции. Конечная

узловая станция принимает грузы в рамках своего технического потенциала и распределяет в некотором режиме. Технический потенциал станции с номером i характеризуется максимально допустимым приростом степени несогласованности между приемом и отправкой грузов и задается функцией $\varphi_i(z)$, меняющейся на отрезке $[0, 1]$ и удовлетворяющей условию $\varphi_i(1) = 0$.

Когда технические потенциалы всех станций одинаковы, модель имеет следующий вид:

$$\dot{z}_0(t) = \min(d_0, \varphi(z_0(t))) - \lambda \varphi(z_1(t)), \quad t \in [t_0, +\infty); \quad (12)$$

$$\dot{z}_i(t) = \lambda [\varphi(z_i(t)) - \varphi(z_{i+1}(t))], \quad i = 1, \dots, m, \quad t \in [t_0, +\infty); \quad (13)$$

$$\dot{z}_{m+1}(t) = \lambda \varphi(z_{m+1}(t)) - d_{m+1}, \quad t \in [t_0, +\infty); \quad (14)$$

$$0 \leq z_i(t) \leq 1, \quad i = 0, 1, \dots, m+1, \quad t \in [t_0, +\infty), \quad (15)$$

где $d_0 > 0$, $0 < \lambda \leq 1$, $d_{m+1} > 0$ — параметры модели; d_0 — характеристика спроса на перевозки; λ — характеристика степени использования технического потенциала станций; d_{m+1} — характеристика режима распределения грузов с конечной узловой станции.

В (Khachatryan, 2022) определены диапазоны изменения параметров модели, при которых система грузоперевозок может бесперебойно функционировать, т.е. когда система (12)–(15) имеет решение. Исследована зависимость решений от параметров модели.

Случай, когда технические потенциалы станций различаются, описан в работе (Khachatryan, 2021). Показано, как, управляя параметрами, характеризующими степень использования технического потенциала станций и режим распределения грузов с конечной узловой станции, можно, как и в случае идентичности технических потенциалов станций, добиться снижения дисбаланса между входным и выходным потоками до наиболее приемлемых уровней на всех станциях цепи.

Для детального исследования свойств указанных моделей создадим имитационную модель, воспроизводящую процесс грузоперевозок в рамках указанных конфигураций железнодорожной сети. Для этого воспользуемся пакетом системно-динамического визуального моделирования Powersim. Модели строятся по переменным четырех типов: время, уровень, темп и вспомогательные переменные. Переменная «*время*» генерируется системным таймером и изменяется дискретно, т.е., начиная с некоторого начального значения, оно за каждый такт увеличивается на заданную величину, которая служит модельной единицей. Переменная типа «*уровень*» равна объему некоторого продукта, накопленного в некотором хранилище за время жизни модели с начального по текущий момент. Продукт может поступать в хранилище и извлекаться из него. Значение «уровня» в текущий момент времени вычисляется как сумма его значения в предыдущий момент и величины, равной разности величин входящего и выходящего потоков продукта за единицу времени. Переменная типа «*темп*» равна объему продукта, который поступает или извлекается из соответствующего уровня в единицу времени. Значение этой переменной может изменяться в зависимости от внешних воздействий на нее. Помимо уровней и темпов, при построении моделей динамических систем используются вспомогательные переменные. Эти переменные могут быть константами или математическими функциями от других переменных. В частности, с их помощью задаются параметры модели.

Приведем результаты имитационного моделирования процесса грузоперевозок системы (12)–(15), в которой технический потенциал станции является функцией $\varphi(\cdot)$ вида $\varphi(z) = a(1 - z)$, $a > 0$ с характеристиками d_0 и d_{m+1} : $d_0 = \mu a$, $0 < \mu \leq 1$, $d_{m+1} = \gamma a$, $\gamma > 0$. Таким образом, имеем следующие параметры модели μ , a , λ , γ : μ ($0 < \mu \leq 1$) — диапазон спроса на перевозки, который может быть удовлетворен при имеющемся техническом потенциале станций; a ($a > 0$) — возможность станции наращивать грузопоток; λ ($0 < \lambda \leq 1$) — степень использования технического потенциала станций; γ ($\gamma > 0$) — режим распределения грузов с конечной узловой станции.

В работе (Khachatryan, 2022) доказано, что для произвольного значения спроса на перевозки μ , который может быть удовлетворен при имеющемся техническом потенциале станций и согласованного с ним режима распределения грузов с конечной узловой станции (γ), существует диапазон изменения степени использования технического потенциала станций (λ) с началом в точке μ — такой, что при любом значении λ из этого диапазона можно организовать бесперебойный грузопоток. Показано, что с точки зрения минимизации степени несогласованности между приемом и отправкой грузов на станциях параметр γ целесообразно взять равным параметру μ . Однако зависимость указанного выше диапазона от иных параметров модели, а также ряд других важных свойств модели оставались в этой работе неизученными.

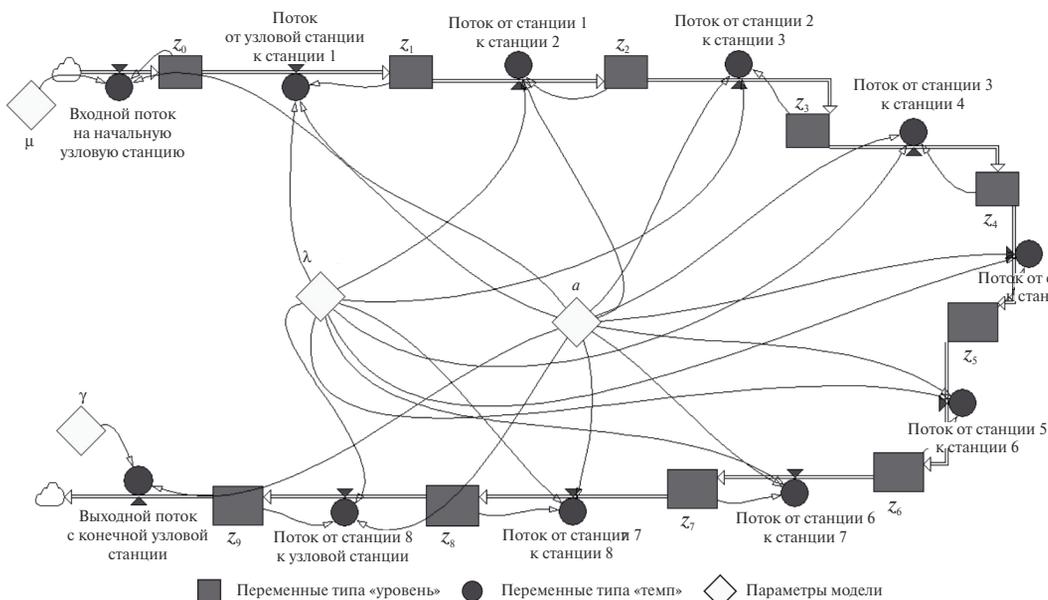


Рис. 5. Диаграмма имитационной модели

На рис. 5 представлена диаграмма построенной имитационной модели системы (12)–(15). В рамках такой модели, в частности, удастся определить диапазон изменения параметра λ в зависимости от параметров модели. Многочисленные эксперименты показали, что этот диапазон не зависит от параметра a . Как было отмечено ранее, минимальный уровень степени несогласованности между приемом и отправкой грузов на станциях достигается при $\mu = \gamma$. На рис. 6 приведен график зависимости диапазона λ от параметра μ . Отметим, что построение имитационных моделей позволяет конструировать сложную конфигурацию реальных действующих систем грузоперевозок.

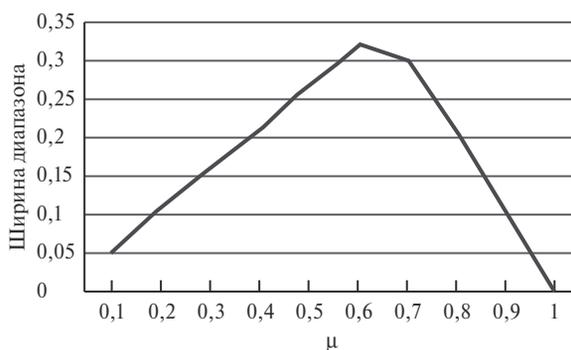


Рис. 6. Зависимость диапазона параметра λ существования решения задачи (12)–(15) от параметра μ

2. АГЕНТНЫЕ МОДЕЛИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ

2.1. Пример «Манхэттенской решетки»

Рассматривается транспортная система типа «Манхэттенская решетка» размерности $N \times N$, где N — число узлов. При этом в каждом таком узле обеспечивается возможность движения транспортных средств и пешеходов рис. 7.

Разработанная имитационная модель основывается на ранее предложенном феноменологическом подходе к изучению поведения «толпы», учитывающем механизм индивидуального принятия решений каждого агента при взаимодействиях с другими агентами (Акопов, Бекларян, 2015). При этом расширяется состав агентов (к пешеходам добавляются транспортные

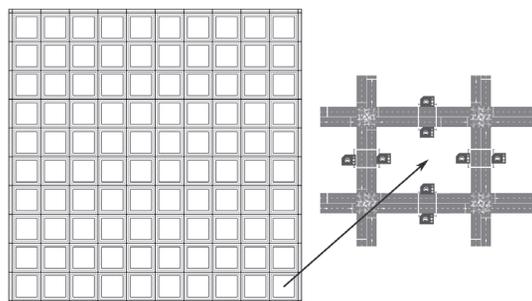


Рис. 7. Схема построения транспортной системы типа «Манхэттенская решетка» с регулируемым пешеходными переходами (справа приведен увеличенный фрагмент решетки)

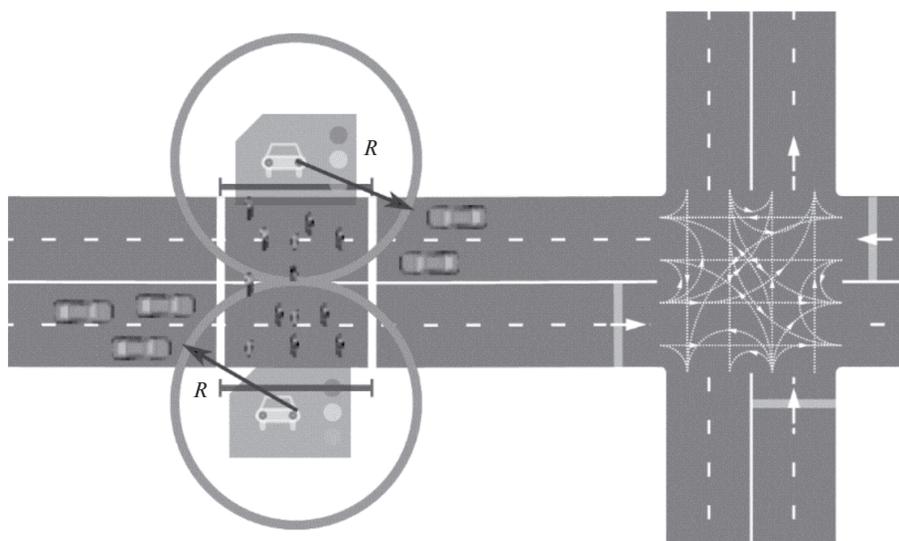


Рис. 8. Иллюстрация регулирующего влияния светофоров на транспортные и пешеходные потоки

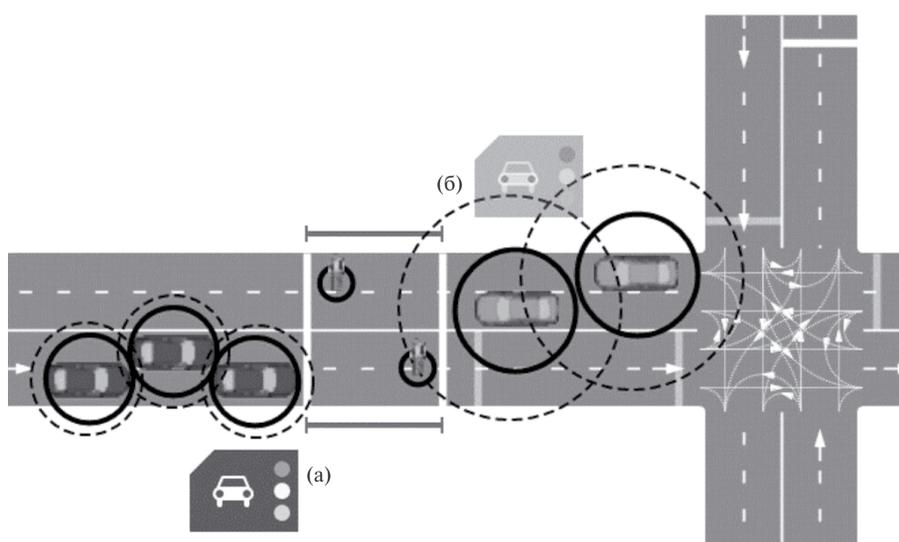


Рис. 9. Иллюстрация различного поведения ТС на регулируемом (а) и нерегулируемом (б) пешеходном переходах

средства), учитываются направления движения, задаваемые конфигурацией цифровой дорожной сети, и регулирующее воздействие светофоров.

Для моделирования движения транспортных средств (ТС) и пешеходов простые правила, основанные на анализе текущего сигнала светофора («К — красный», «Ж — желтый» или «З — зеленый») для ТС и пешеходов, находящихся в радиусе его действия и принимающих индивидуальные решения двигаться или остановиться (рис. 8).

Если агенты-ТС находятся в зоне действия включенного (действующего) светофора (т.е. вблизи регулируемого пешеходного перехода (рис. 9а), они выбирают минимальную зону обзора для оценки плотности дорожного и пешеходного потоков, уменьшая тем самым радиус личного пространства. Если агенты-ТС находятся в зоне действия выключенного светофора (т.е. вблизи

нерегулируемого пешеходного перехода (рис. 9б)), они стремятся существенно увеличить зону обзора, что обусловлено потребностью в большем времени для принятия решений о торможении, тем самым увеличивая радиус личного пространства.

При этом наиболее важными управляющими параметрами в рассматриваемой модели являются:

– состояния включенных светофоров, определяющие выполнение ими регулирующих функций на пешеходных переходах;

– длительности фаз светофоров, значения которых должны удовлетворять требованиям транспортной безопасности (чтобы пешеходы успевали перейти дорогу) и обеспечивать высокую пропускную способность ИТС для ТС и пешеходов с учетом плотности соответствующих потоков.

Введем обозначения:

– $T = \{t_0, t_1, \dots, |T|\}$ – набор моментов времени (мин), $|T|$ – общее число моментов времени, $t_0 \in T$, $t_{|T|} \in T$ – начальные и конечные моменты времени;

– $I = \{i_1, \dots, i_{|I|}\}$ – набор индексов агентов (ТС и пешеходов), где $|I|$ – общее число участников дорожного движения;

– $L = \{l_1, \dots, l_{|L|}\}$ – набор индексов светофоров, где $|L|$ – общее число светофоров;

– $\{x_i(t_k), y_i(t_k)\}$, $i \in I$ – координаты агента i в момент t_k ($t_k \in T$);

– $v_i(t_{k-1})$, $i \in I$ – предпочитаемая скорость движения агента i в момент t_{k-1} ($t_{k-1} \in T$);

– $w_i(t_{k-1}) \in \{-1, 0, 1\}$, $i \in I$ – параметр, задающий целевое направление движения агента i в «Манхэттенской решетке» в момент t_{k-1} ($t_{k-1} \in T$);

– $\beta_{ij}(t_{k-1})$, $i \in I$, $j \in \{i : i \neq j\}$ – угол объезда (обхода) агентом i ближайшего препятствия (другого агента), расположенного на его пути по ходу движения (Акопов, Бекларян, 2015) в момент t_{k-1} ($t_{k-1} \in T$);

– $\gamma_{ij}(t_{k-1})$, $i \in I$, $j \in \{i : i \neq j\}$ – угол, указывающий направление движения агента i – противоположное относительно ближайшего препятствия в момент t_{k-1} ($t_{k-1} \in T$);

– $\tilde{\gamma}_{ij}(t_{k-1})$, $i \in I$, $j \in \{i : i \neq j\}$ – угол, указывающий направление агента i на ближайшее препятствие, расположенное по ходу движения или сбоку в момент t_{k-1} ($t_{k-1} \in T$);

– $d_{ij}(t_{k-1})$, $i \in I$, $j \in \{i : i \neq j\}$ – расстояние от агента i до ближайшего агента-препятствия;

– $\tilde{d}_{il}(t_{k-1})$, $i \in I$, $l \in L$ – расстояние от агента i до ближайшего светофора с заданным радиусом действия R_l (Акопов, Бекларян, 2024);

– $r_i(t_{k-1})$, $i \in I$ – радиус личного пространства агента в момент t_{k-1} ($t_{k-1} \in T$);

– $s_l(t_{k-1}) \in \{1, 2, 3\}$, $l \in L$ – состояния фаз светофора l в момент t_{k-1} ($t_{k-1} \in T$): $s_l(t_{k-1}) = 1$ – запрещающий сигнал светофора («красный»), $s_l(t_{k-1}) = 2$ – предупреждающий сигнал светофора («желтый»), $s_l(t_{k-1}) = 3$ – разрешающий сигнал светофора («зеленый»);

– λ – коэффициент, задающий соотношение масштабов реального и модельного времени;

– c – коэффициент, определяющий предельную скорость движения агента в противоположном от ближайшего препятствия (другого агента) направлении;

– ξ – коэффициент, используемый для оценки расположения препятствия перед агентом по ходу его движения (малое число).

Пространственная динамика ТС и пешеходов в момент времени t_k ($t_k \in T$) задается системой конечно-разностных уравнений с переменной структурой:

$$x_i(t_k) = \begin{cases} x_i(t_{k-1}) + w_i(t_{k-1})\lambda v_i(t_{k-1}), & \text{если выполняется I,} \\ x_i(t_{k-1}) + \lambda v_i(t_{k-1}) \cos(\pm \beta_{ij}(t_{k-1})) + \frac{A}{d_{ij}(t_{k-1})} \cos(\gamma_{ij}(t_{k-1})), & \text{если выполняется II,} \\ x_i(t_{k-1}) + \frac{c}{d_{ij}(t_{k-1})} \cos(\gamma_{ij}(t_{k-1})), & \text{если выполняется III,} \\ x_i(t_{k-1}), & \text{если выполняется IV,} \end{cases} \quad (16)$$

$$y_i(t_k) = \begin{cases} y_i(t_{k-1}) + w_i(t_{k-1})\lambda v_i(t_{k-1}), & \text{если выполняется I,} \\ y_i(t_{k-1}) + \lambda v_i(t_{k-1}) \sin(\pm \beta_{ij}(t_{k-1})) + \frac{A}{d_{ij}(t_{k-1})} \sin(\gamma_{ij}(t_{k-1})), & \text{если выполняется II,} \\ y_i(t_{k-1}) + \frac{A}{d_{ij}(t_{k-1})} \sin(\gamma_{ij}(t_{k-1})), & \text{если выполняется III,} \\ y_i(t_{k-1}), & \text{если выполняется IV,} \end{cases} \quad (17)$$

при следующих условиях.

I. $d_{ij}(t_{k-1}) > (r_i(t_{k-1}) + r_j(t_{k-1})) \quad \forall j \in \{i : i \neq j\}$ и $s_l(t_{k-1}) = 3$ для ближайшего $l \in L$, что означает что на пути агента i ($i \in I$) нет препятствия (другого участника дорожного движения) и при нахождении агента на регулируемом участке дороги действует разрешающий сигнал светофора (см. рис. 2);

II. $d_{ij}(t_{k-1}) \leq (r_i(t_{k-1}) + r_j(t_{k-1}))$ и $|\tilde{\gamma}_{ij}(t_{k-1})| \leq \xi$ для ближайшего $j \in \{i : i \neq j\}$ и $s_l(t_{k-1}) = 3$ для ближайшего $l \in L$, что означает что на пути агента i ($i \in I$) есть препятствие, расположенное по ходу его движения (маневр обгона), и при нахождении агента на регулируемом участке дороги действует разрешающий сигнал светофора;

III. $d_{ij}(t_{k-1}) \leq (r_i(t_{k-1}) + r_j(t_{k-1}))$ и $|\tilde{\gamma}_{ij}(t_{k-1})| > \xi$ для ближайшего $j \in \{i : i \neq j\}$ и $s_l(t_{k-1}) = 3$ для ближайшего $l \in L$, что означает что на пути агента i ($i \in I$) есть боковое препятствие, требующее сместиться в противоположном направлении (маневр смещения), а при нахождении агента на регулируемом участке дороги действует разрешающий сигнал светофора;

IV. $\tilde{d}_{il}(t_{k-1}) \leq R_l$ и $s_l(t_{k-1}) = 1$ для ближайшего $l \in L$, что означает что агент i ($i \in I$) находится на регулируемом участке дороги и действует запрещающий сигнал светофора.

Система (16)–(17) позволяет вычислить пространственные координаты ТС и пешеходов и определить трафик выходного потока ИТС типа «Манхэттенская решетка». В частности, трафик выходного потока может быть оценен как суммарное число ТС и пешеходов, достигших своих целевых координат, либо как суммарное число агентов, нормированное на число пройденных ими фрагментов решетки (Акоров, Beklaryan, 2024).

Далее приведем пример численных экспериментов, выполненных с использованием разработанной имитационной модели ИТС на основе «Манхэттенской решетки», реализованной в системе крупномасштабного агентного моделирования FLAME GPU2 (Richmond et al., 2021).

2.2. Результаты численного моделирования ИТС

Численные эксперименты проводились на суперкомпьютере ЦЭМИ РАН DSWS PRO supercomputer (2x Intel Xeon Silver 4114, 1 x NVIDIA QUADRO RTX 6000) на ограниченном интервале времени $|T| = 1000$ с.

На рис. 10 и 11 показаны примеры расчетов трафика ИТС типа «Манхэттенская решетка» с иллюстрацией пространственной динамики агентов при четырех сценариях реализации ИТС:

– **сценарий 1** — малоинтенсивное (1 ТС/мин и 1 пеш/мин) и высокоскоростное (80 км/ч) движения в транспортной системе типа «Манхэттенская решетка» с *полностью регулируемы*ми пешеходными переходами.

– **сценарий 2** — малоинтенсивное (1 ТС/мин и 1 пеш/мин) и высокоскоростное (80 км/ч) движения в ЦДС с *нерегулируемы*ми пешеходными переходами.

– **сценарий 3** — высокоинтенсивное (10 ТС /мин и 5 пеш/мин) и среднескоростное (60 км/ч) движения в ЦДС с *частично регулируемы*ми пешеходными переходами.

– **сценарий 4** — высокоинтенсивное (10 ТС /мин и 5 пеш/мин) и среднескоростное (60 км/ч) движения в ЦДС с *нерегулируемы*ми пешеходными переходами.

Для оценки трафика ИТС в каждый момент модельного времени вычисляется число звеньев «Манхэттенской решетки», пройденных агентами-ТС и пешеходами. Подобный критерий наилучшим образом характеризует пропускную способность ИТС типа «Манхэттенской решетки», так как учитывает влияние ее масштаба на поведение агентов, в частности отсутствие явной потребности у агентов проезжать все имеющиеся перекрестки и проходить все пешеходные переходы.

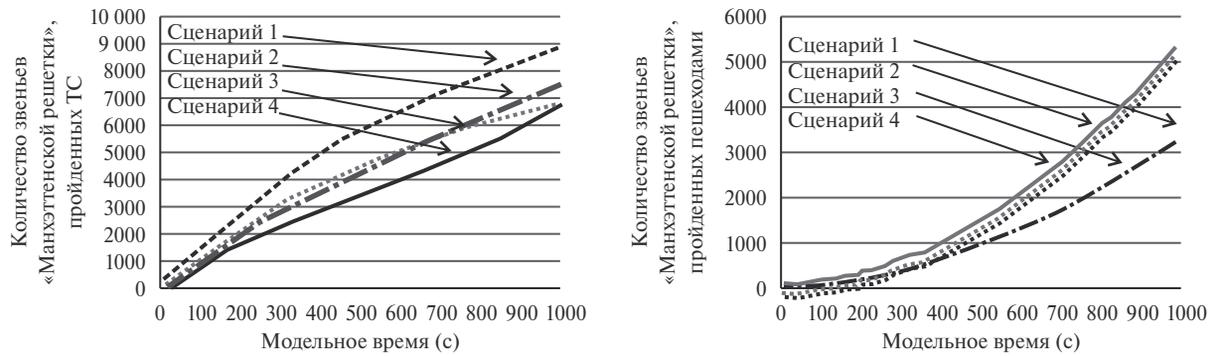


Рис. 10. Динамика трафика выходного потока для ИТС с полностью регулируемы, частично регулируемы и нерегулируемы пешеходными переходами

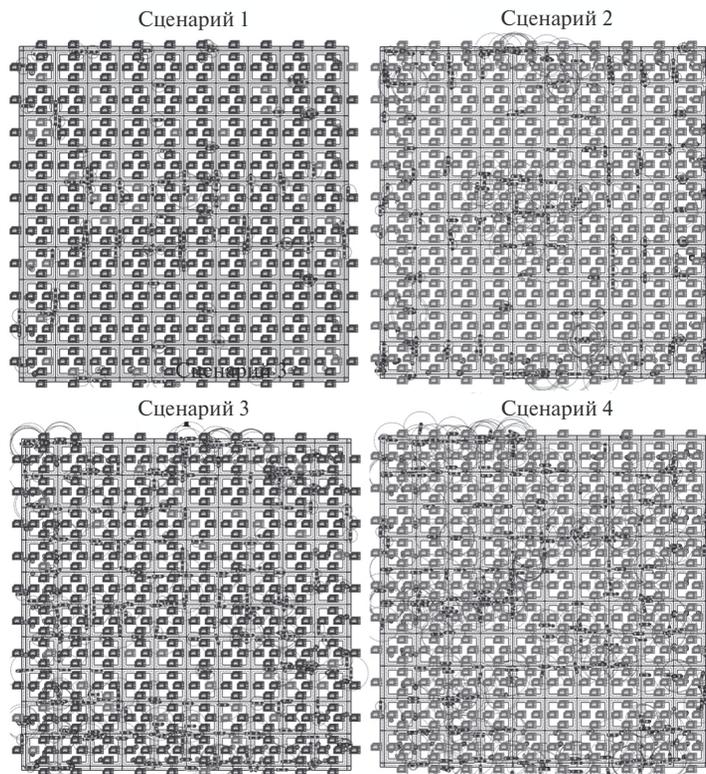


Рис. 11. Пространственная динамика агентов для ИТС с полностью регулируемы, частично регулируемы и нерегулируемы пешеходными переходами

Транспортная система типа «Манхэттенская решетка» с частично регулируемы пешеходными переходами дает преимущество по уровню трафика ТС (оцениваемого по суммарному числу звеньев, пройденных агентами) по сравнению с ИТС нерегулируемы переходами, особенно при малоинтенсивном и высокоскоростном движениз (см. сценарий 1 в сравнении со сценарием 2). При высокоинтенсивном и среднескоростном трафике отказываться от светофоров также нецелесообразно, так как возможно формирование транспортного коллапса, отрицательно влияющего на транспортный поток (см. сценарий 3 в сравнении со сценарием 4).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе представлены предложенные авторами математические и имитационные (агентные) модели интеллектуальных транспортных систем (ИТС). В частности, рассмотрены модели, предназначенные для исследования режимов грузоперевозок и соответствующих им

грузопотоков в рамках динамической системы, а также ИТС типа «Манхэттенская решетка», предназначенная для изучения автомобильного и пешеходного трафика. Разработанные модели используют системы дифференциальных и конечно-разностных уравнений с переменной структурой. Подобный подход, в частности, позволяет определить установившиеся режимы грузопотоков при различной конфигурации железнодорожной сети, изучить различные сценарии взаимодействия агентов, например V2V, V2P, V2I и др., определить оптимальные характеристики ИТС.

Первая группа моделей посвящена транспортным системам с жесткой регламентацией взаимодействий во всех ее подсистемах. Для таких систем наблюдаемыми величинами, на основе которых формируется стратегия управления, являются установившиеся макропоказатели—состояния класса солитонных решений (решения типа «бегущей волны»). Такие макропоказатели позволяют верифицировать имитационные модели процессов высокой сложности и детализации. Вторая группа моделей характеризуется высоким уровнем флуктуаций на микроуровне, что приводит к необходимости использовать агентные модели, способные их учитывать. Макропоказатели—состояния класса солитонных решений применяются здесь для верификаций агентных моделей. Основная трудность в изучении данных систем связана и с вычислительной сложностью таких задач, а их решение — с созданием эффективных генетических алгоритмов и успешной кластеризацией изучаемого большого ансамбля агентов.

В работе представлены численные примеры, подтверждающие возможность имитационного моделирования крупномасштабных ИТС с множественными взаимодействующими агентами при сложной конфигурации дорожной сети и различных сценарных условиях. А также определены характеристики ИТС, при которых обеспечивается улучшение (стабилизация) трафика транспортного и пешеходного потоков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

- Акопов А.С., Бекларян Л.А.** (2022). Моделирование динамики дорожно-транспортных происшествий с участием беспилотных автомобилей в транспортной системе «умного города» // *Бизнес-информатика*. Т. 16. № 4. С. 19–35. [**Akopov A.S., Beklaryan L.A.** (2022). Simulation of rates of traffic accidents involving unmanned ground vehicles within a transportation system for the ‘smart city’. *Business Informatics*, 16 (4), 19–35 (in Russian).]
- Акопов А.С., Бекларян Л.А.** (2015). Агентная модель поведения толпы при чрезвычайных ситуациях // *Автоматика и телемеханика*. № 10. С. 131–143. [**Akopov A.S., Beklaryan L.A.** (2015). An agent model of crowd behaviour in emergencies. *Automation and Remote Control*, 76 (10), 1817–1827 (in Russian).]
- Бекларян А.Л., Бекларян Л.А., Акопов А.С.** (2023). Имитационная модель интеллектуальной транспортной системы «умного города» с адаптивным управлением светофорами на основе нечёткой кластеризации // *Бизнес-информатика*. Т. 17. № 3. С. 70–86. DOI: 10.17323/2587-814X.2023.3.70.86 [**Beklaryan A.L., Beklaryan L.A., Akopov A.S.** (2023). Simulation model of an intelligent transportation system for the ‘smart city’ with adaptive control of traffic lights based on fuzzy clustering. *Business Informatics*, 17, 3, 70–86 (in Russian).]
- Бекларян Л.А., Хачатрян Н.К.** (2013). Об одном классе динамических моделей грузоперевозок // *Журнал вычислительной математики и математической физики*. Т. 53. № 10. С. 1649–1667. [**Beklaryan L.A., Khachatryan N.K.** (2013). On one class of dynamic transportation models. *Computational Mathematics and Mathematical Physics*, 53 (10), 1466–1482 (in Russian).]
- Гасников А.В., Кленов С.Л., Нурминский Е.А., Холодов Я.А., Шамрай Н.Б.** (2013). Введение в математическое моделирование транспортных потоков. А.В. Гасников (ред.). М.: МЦНМО. [**Gasnikov A.V., Klenov S.L., Nurminsky E.A., Kholodov Ya.A., Shamray N.B.** (2013). *Introduction to mathematical modeling of traffic flows*. A.V. Gasnikov (ed.). Moscow: Moscow Center for Continuous Mathematical Education (in Russian).]
- Лазарев А.А., Мусатова Е.Г., Гафаров Е.Р., Кварацхелия А.Г.** (2012). Теория расписаний. Задачи железнодорожного планирования. М.: ИПУ РАН. 92 с. [**Lazarev A.A., Musatova E.G., Gafarov E.R., Kvaratskhelia A.G.** (2012). *Schedule theory. Problems of railway planning*. Moscow: Trapeznikov Institute of Control Sciences RAS. 92 p. (in Russian).]
- Лазарев А.А., Садыков Р.Р.** (2014). Задача управления парком грузовых железнодорожных вагонов. В сб.: «XII Всероссийское совещание по проблемам управления (ВСПУ 2014)». Москва, ИПУ РАН, 16–19 июня 2014. С. 5083–5093. [**Lazarev A.A., Sadykov R.R.** (2014). The task of managing the fleet of freight railway cars. In: *XII All-Russian Conference on Management Problems (VSPU2014)*. Moscow: Trapeznikov Institute of Control Sciences RAS, June 16–19, 2014, 5083–5093 (in Russian).]
- Хачатрян Н.К.** (2013). Динамическая модель организации грузоперевозок при ограниченности емкостей перергонных путей // *Бизнес-информатика*. № 4 (26). С. 62–68. [**Khachatryan N.K.** (2013). Dynamic model of

organization of cargo transportation with a limited capacity of the distillation ways. *Business Informatics*, 4 (26), 62–68 (in Russian).]

- Хачатрян Н.К., Бекларян Л.А.** (2021). Исследование динамики потока в модели организации грузоперевозок по круговой цепочке станций // *Экономика и математические методы*. Т. 57. № 1. С. 83–91. [Khachatryan N.K., Beklaryan L.A. (2021). Study of flow dynamics in the model of cargo transportation organization along a circular chain of stations. *Economics and Mathematical Methods*, 57 (1), 83–91 (in Russian).]
- Швецов В.И.** (2003). Математическое моделирование транспортных потоков // *Автоматика и телемеханика*. № 11. С. 3–46. [Shvetsov V.I. (2003). Mathematical modelling of traffic flows. *Automation and Remote Control*, 64 (11), 1651–1689 (in Russian).]
- Акопов А.С., Beklaryan L.A., Beklaryan A.L.** (2020). Simulation-based optimization for autonomous transportation systems using a parallel real-coded genetic algorithm with scalable nonuniform mutation. *Cybernetics and Information Technologies*, 21 (3), 127–144.
- Акопов А.С., Beklaryan L.A., Thakur M.** (2022). Improvement of maneuverability within a multiagent fuzzy transportation system with the use of parallel bi-objective real-coded genetic algorithm. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 23 (8), 12648–12664.
- Акопов А.С., Beklaryan L.A.** (2024). Traffic improvement in Manhattan road networks with the use of parallel hybrid biobjective genetic algorithm. *IEEE Access*, 12, 19532–19552.
- Andersen J., Christiansen M.** (2009). Designing new European rail freight services. *Journal of the Operational Research Society*, 60, 348–360.
- Bando M., Hasebe K., Nakanishi K., Nakayama A.** (1998). Analysis of optimal velocity model with explicit delay. *Physical Review. E*, 58, 5429–5435.
- Bar-Gera H.** (2002). Origin-based algorithm for the traffic assignment problem. *Transportation Science*, 36, 4, 398–417.
- Beklaryan L.A., Khachatryan N.K.** (2006). Traveling wave type solutions in dynamic transport models. *Functional Differential Equations*, 13, 2, 125–155.
- Beklaryan L.A., Khachatryan N.K., Akoпов A.S.** (2019). Model for organization cargo transportation at resource restrictions. *International Journal of Applied Mathematics*, 32, 4, 627–640.
- Brackstone M., McDonald M.** (2000). Car following: A historical review. *Transportation Research. F*, 2, 181–196.
- Brassil J., Choudhury A.K., Maxemchuk N.F.** (1994). The Manhattan street network: A high performance, highly reliable metropolitan area network. *Computer Networks and ISDN Systems*, 26, 6–8, 841–858.
- Buchel B., Spanninger T., Corman F.** (2020). Empirical dynamics of railway delay propagation identified during the large-scale Rastatt disruption. *Scientific Reports*, 10, 1. DOI: 10.1038/s41598-020-75538-z
- Cacchiani V., Caprara A., Toth P.** (2010). Scheduling extra freight trains on railway networks. *Transportation Research. B*, 44, 2, 215–231.
- Campetella M., Lulli G., Pietropaoli U., Ricciardi N.** (2006). Freight service design for the Italian railways company. In: *Proceedings of the 6th Workshop on Algorithmic Approach for Transportation Modelling, Optimization, and Systems (ATMOS2006)*. Zurich, Switzerland, 14 September 2006, 1–13.
- Carrothers G.A.P.** (1956). An historical review of the gravity and potential concepts of human interaction. *Journal of the American Institute of Planners*, 22, 94–102.
- Cassidy M.J., Jang K., Daganzo C.F.** (2011). Macroscopic fundamental diagrams for freeway networks: Theory and observation. *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*, 2260, 8–15.
- Ceselli A., Gatto M., Lübbecke M., Nunkesser M., Schilling H.** (2008). Optimizing the cargo express service of Swiss Federal Railways. *Transportation Science*, 42, 4, 450–465.
- Chowdhury D., Santen L., Schadschneider A.** (2000). Statistical physics of vehicular traffic and some related systems. *Physics Reports*, 329, 199–329.
- Cremer M., Ludwig J.** (1986). A fast simulation model for traffic flow on the basis of Boolean operations. *Mathematics and Computers in Simulation*, 28, 297–303.
- Daganzo C.F.** (1995). The cell transmission model. Part II: Network traffic. *Transportation Research. B*, 29, 79–93.
- Daganzo C.F.** (2008). An analytical approximation for the macroscopic fundamental diagram of urban traffic. *Transportation Research. B*, 42, 9, 771–781.
- Dekker M., Medvedev A., Rombouts J., Siudem G., Tupikina L.** (2022). Modelling railway delay propagation as diffusion-like spreading. *EPJ Data Science*, 11, 44. DOI: 10.1140/epjds/s13688-022-00359-1
- Dekker M.M., Panja D.** (2021). Cascading dominates large-scale disruptions in transport over complex networks. *PLoS ONE*, 16, 1, 1–17.

- Ferreira L., Murray M.H.** (1997). Modelling rail track deterioration and maintenance: Current practices and future needs. *Transport Reviews*, 17, 3, 207–221.
- Fotheringham A.S.** (1986). Modelling hierarchical destination choice. *Environment and Planning. A*, 18, 401–418.
- Fukasawa R., Arago M.P., Porto O., Uchoa E.** (2002). Solving the freight car flow problem to optimality. *Electronic Notes in Theoretical Computer Science*, 66, 6, 42–52.
- Gambardella L.M., Rizzoli A.E., Funk P.** (2002). Agent-based planning and simulation of combined rail/road transport. *Simulation*, 78, 5, 293–303.
- Gazis D.C., Herman R., Rothery R.W.** (1961). Nonlinear follow the leader models of traffic flow. *Operations Research*, 9, 4, 545–567.
- Geroliminis N., Sun J.** (2011). Properties of a well-defined macroscopic fundamental diagram for urban traffic. *Transportation Research. B*, 45, 3, 605–617.
- Goverde R.M.P.** (2010). A delay propagation algorithm for large-scale railway traffic networks. *Transportation Research. C*, 18, 3, 269–287.
- Harris B., Wilson A.G.** (1978). Equilibrium values and dynamics of attractiveness terms in production-constrained spatial-interaction models. *Environment and Planning. A*, 10, 371–388.
- Harrod S., Cerreto F., Nielsen O.A.** (2019). A closed form railway line delay propagation model. *Transportation Research. C*, 102, 189–209.
- Helbing D., Treiber M.** (1998). Gas-kinetic-based traffic model explaining observed hysteretic phase transition. *Physical Review Letters*, 81, 3042–3045.
- Heywood P., Richmond P., Maddock S.** (2015). Road network simulation using FLAME GPU. In: *Euro-Par 2015: Parallel Processing Workshops. Euro-Par 2015 International Workshops*, 24–25 Aug 2015, 2015. Vienna (Austria). Lecture Notes in Computer Science, 9523. Springer (Cham.), 430–441. ISBN: 978-3-319-27307-5.
- Higgins A., Ferreira L., Kozan E.** (1995). Modeling single-line train operations. *Transportation Research Record*, 1489, 9–16.
- Jeong S.-J., Lee C.-G., Bookbinder J.** (2007). The European freight railway system as a hub-and-spoke network. *Transportation Research. A*, 41, 6, 523–536.
- Kerner B.S.** (2009). *Introduction to modern traffic flow theory and control: The long road to three-phase traffic theory*. Berlin: Springer.
- Khachatryan N.** (2022). Bifurcation in the model of cargo transportation organization. *Advances in Systems Science and Applications*, 22, 4, 79–91.
- Khachatryan N.K.** (2020). Study of flow dynamics in the model of cargo transportation organization between node stations. *International Journal of Applied Mathematics*, 33, 5, 937–949.
- Khachatryan N.K.** (2021). Modeling the process of cargo transportation between node stations. *International Journal of Applied Mathematics*, 34, 6, 1223–1235.
- Khachatryan N.K., Akopov A.S.** (2017). Model for organizing cargo transportation with an initial station of departure and a final station of cargo distribution. *Business Informatics*, 1, 25–35.
- Khachatryan N.K., Akopov A.S., Belousov F.A.** (2018). About quasi-solutions of traveling wave type in models for organizing cargo transportation. *Business Informatics*, 1, 43, 61–70.
- Kraay D., Barker P.T., Chen B.T.** (1991). Optimal pacing of trains in freight railroads: Model formulation and solution. *Operations Research*, 39, 1, 82–99.
- Kuhne R.D.** (1984). Macroscopic freeway model for dense traffic stop-start waves and incident detection. *Proceedings of Ninth International Symposium on Transport and Traffic Theory*. R. Hamerslag (ed.). Utrecht: VNU Science, 21–42.
- Liu L., Dessouky M.** (2017). A decomposition based hybrid heuristic algorithm for the joint passenger and freight train scheduling problem. *Computers & Operations Research*, 87, 165–182.
- Lo H.K., Chen A.** (2002). Traffic equilibrium problem with route-specific costs: Formulation and algorithms. *Transportation Research. B*, 34, 6, 493–513.
- Ludvigsen J., Klaboe R.** (2014). Extreme weather impacts on freight railways in Europe. *Natural Hazards*, 70, 1, 767–787.
- Lulli G., Pietropaoli U., Ricciardi N.** (2011). Service network design for freight railway transportation: The Italian case. *Journal of the Operational Research Society*, 62, 12, 2107–2119.
- Nelson P.** (1995). A kinetic model of vehicular traffic and its associated bimodal equilibrium solutions. *Transport Theory and Statistical Physics*, 24, 383–409.
- Pipes L.A.** (1953). An operational analysis of traffic dynamics. *Journal of Applied Physics*, 24, 274–281.

- Popkov Yu.S.** (1995). *Macrosystems theory and its applications*. Berlin: Springer Verlag.
- Richmond P., Chisholm R., Heywood P., Leach M., Kabiri Chimeh M.** (2021). FLAME GPU. *ZENODO*. Available at: <https://zenodo.org/records/5465845>
- Sadykov R., Lazarev A., Shiryaev V., Stratonnikov A.** (2013). Solving a freight railcar flow problem arising in Russia. In: *13th Workshop on Algorithmic Approach for Transportation Modelling, Optimization, and Systems (ATMOS'13)*. Sophia Antipolis, France, 5 September 2013, 55–67.
- Samal S.R., Mohanty M., Santhakumar S.M.** (2021). Adverse effect of congestion on economy, health and environment under mixed traffic scenario. *Transportation in Developing Economies*, 7, 15. DOI: 10.1007/s40890-021-00125-4
- Sarma S.S., Sinha K., Sub-r-па C., Chakraborty G., Sinha B.P.** (2021). Optimal distribution of traffic in Manhattan road networks for minimizing routing-time. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 22, 11, 6799–6820.
- Shvetsov V.I.** (2009). Algorithms for distributing traffic flows. *Automation and Remote Control*, 70, 10, 1728–1736.
- Sweet M.** (2014). Traffic congestion's economic impacts: Evidence from US metropolitan regions. *Urban Studies*, 51, 10, 2088–2110.
- Tomer E., Safonov L., Havlin S.** (2000). Presence of many stable nonhomogeneous states in an inertial car-following model. *Physical Review Letters*, 84, 2, 382–385.
- Treiber M., Hennecke A., Helbing D.** (2000). Congested traffic states in empirical observations and microscopic simulations. *Physical Review E*, 62, 1805–1824.
- Weik N.** (2022). Macroscopic traffic flow in railway systems — a discussion of the applicability of fundamental diagrams. *Journal of Rail Transport Planning & Management*, 23 (5). DOI: 10.1016/j.jrtpm.2022.100330
- Wilson A.G.** (1971). A family of spatial interaction models and associated developments. *Environment and Planning A*, 3, 255–282.
- Zieger S., Weik N., Niesen N.** (2018). The influence of buffer time distributions in delay propagation modelling of railway networks. *Journal of Rail Transport Planning & Management*, 8, 3–4, 220–232.

Dynamic and agent-based models of intelligent transportation systems

© 2024 L.A. Beklaryan, G.L. Beklaryan, A.S. Akopov, N.K. Khachatryan

L.A. Beklaryan,

Central Economics and Mathematics Institute, Russian Academy of Sciences (CEMI RAS), Moscow, Russia;
e-mail: beklar@cemi.rssi.ru

G.L. Beklaryan,

Central Economics and Mathematics Institute, Russian Academy of Sciences (CEMI RAS), Moscow, Russia;
e-mail: glbeklaryan@gmail.com

A.S. Akopov,

Central Economics and Mathematics Institute, Russian Academy of Sciences (CEMI RAS), Moscow, Russia;
e-mail: akopovas@umail.ru

N.K. Khachatryan,

Central Economics and Mathematics Institute, Russian Academy of Sciences (CEMI RAS), Moscow, Russia;
e-mail: nerses-khachatryan@yandex.ru

Received 04.07.2023

Abstract. The authors present mathematical and simulation models of intelligent transportation systems (ITS). The models of two types are considered: the dynamic model of cargo transportation and agent-based model of the ITS — the ‘Manhattan grid’ type. The problem of rational railway planning related to research of cargo transportation models and corresponding cargo flows within the dynamic system is studied. The process of cargo transportation was modelled considering the mechanism of interactions with major railway infrastructure elements. The variation ranges of parameters at which cargo transportation system can be consistently active are defined. Possibilities of simulation modelling transportation and pedestrian flows at the micro-level considering complex interactions between heterogeneous agents, in particular, vehicles-to-pedestrians (V2P), vehicles-to-vehicles (V2V), vehicles-to-infrastructure elements (traffic lights) (V2I) etc. using the case study as the ITS belonging to the ‘‘Manhattan grid’’ type studied. As a result, it is shown that ITS with partially controlled pedestrian crossings have advantage by the level of the total traffic in comparison to the ITS with uncontrolled crossings, especially with low-intensity and high-speed traffic. The two types of models are united by the unity of their tool-making description. For models of the first type, all processes at the micro-level are strictly regulated. Therefore, such systems are well characterized by established macro-indicators — states of the soliton solutions class (i.e. the solutions of travelling wave type). In models of the second type, there are large fluctuations at the micro-level that affect the safety of road users (e.g., traffic jams, accidents, etc.). This explains the use of agent-based models that consider processes at the micro-level. At the same time, macro-indicators are the most important characteristics for checking the adequacy of agent-based models.

Keywords: intelligent transportation systems, cargo transportation models, ‘Manhattan grid’, agent-based modelling of transportation systems, traffic simulation, dynamic transportation systems, management of railway transport, ‘smart’ traffic lights.

JEL Classification: C53, C63, R40, R41.

UDC: 519.876.5, 656.073.7, 656.11.

For reference: **Beklaryan L.A., Beklaryan G.L., Akopov A.S., Khachatryan N.K.** (2024). Dynamic and agent-based models of intelligent transportation systems. *Economics and Mathematical Methods*, 60, 2, 105–122. DOI: 10.31857/S0424738824020091 (in Russian).

Портфельные построения на рынке акций на основе методов оболочечного анализа и стохастической границы

© 2024 г. Т.В. Теплова, Т.В. Соколова, А.И. Ханиев

Т.В. Теплова,

*Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва;
e-mail: tteplova@hse.ru*

Т.В. Соколова,

*Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва;
e-mail: tv.sokolova@hse.ru*

А.И. Ханиев,

*Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва;
e-mail: ahaniev@hse.ru*

Поступила в редакцию 25.08.2023

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-28-00740 (<https://rscf.ru/project/23-28-00740/>).

Аннотация. В работе сопоставлены результаты применения параметрического метода анализа стохастической границы (Stochastic Frontier Analysis, SFA) и непараметрического метода оболочечного анализа данных с корректировкой на асимметричное смещение (Bias-corrected Data Envelopment Analysis, DEA) для формирования интегральных метрик отбора акций в портфель на основе разноплановых финансовых и нефинансовых показателей компаний-эмитентов США. Реализован авторский подход, при котором «входные» и «выходные» показатели для моделей анализа стохастической границы и оболочечного анализа данных предварительно отбираются с помощью регрессионного анализа. Учитывается отклонение выявленных показателей компаний выборки от медианных отраслевых значений. Выявлено, что значимыми характеристиками корпоративного управления в объяснении доходности акций являются размер совета директоров, доля независимых директоров, посещаемость заседаний совета директоров, а среди финансовых и биржевых характеристик — отношение чистого долга к EBITDA и прошлая доходность акций (эффект моментума). Показано, что портфели из 20–30 ценных бумаг, построенные на основе авторских интегральных метрик, оказались более эффективными по доходности и по соотношению риск–доходность, чем индекс S&P 500 и равно-взвешенный портфель всех рассматриваемых акций. Проверка устойчивости выводов проведена путем сопоставления с портфелями, построенными случайным образом (метод Монте-Карло). Полученные результаты устойчивы как для периода до пандемии коронавируса COVID-19 (2008–2019 гг.), так и для периода пандемии и роста геополитической напряженности в 2020–2022 гг. С 2008 по 2019 г. портфели, созданные с применением метода оболочечного анализа данных, были более эффективными, чем те, которые основаны на моделях анализа стохастической границы. В период с 2020 по 2022 г. — наоборот; последние продемонстрировали лучшие результаты.

Ключевые слова: анализ среды функционирования (Data envelopment analysis, DEA); анализ стохастической границы (Stochastic frontier analysis, SFA); портфель акций; совет директоров; корпоративное управление.

Классификация JEL: C51, C61, G11.

УДК: 336.763.2.

Для цитирования: Теплова Т.В., Соколова Т.В., Ханиев А.И. (2024). Портфельные построения на рынке акций на основе методов оболочечного анализа и стохастической границы // *Экономика и математические методы*. Т. 60. № 2. С. 123–138. DOI: 10.31857/S0424738824020102

ВВЕДЕНИЕ

Отбор инвестиционно-привлекательных акций в портфель с целью превышения доходности, или коэффициента Шарпа, над традиционными пассивными стратегиями инвестирования в индекс остается не простой задачей. В работе (Fama, French, 2010) показано, что только около 2% активных фондов могут превзойти по доходности индексы фондового рынка (после вычета комиссионных платежей). Также открытым исследовательским вопросом является возможность отбора в портфель акций посредством непараметрического метода оболочечного анализа данных с корректировкой на асимметричное смещение (Data Envelopment Analysis, DEA) или метода анализа стохастической границы (Stochastic Frontier Analysis, SFA). В нашей работе с применением двух методов DEA и SFA мы строим интегральные индексы, которые позволяют ранжировать акции по привлекательности включения в портфель. Эти два метода позволяют включить в анализ большое число разноплановых показателей финансового состояния компаний и качества корпоративного управления, а также биржевых характеристик акций. Ряд работ демонстрирует эффективность применения непараметрического метода DEA для портфельных построений на рынках акций и облигаций (Теплова, Соколова, 2017; Pätäri, Karell, Luukka, 2018; Chen et al., 2021). В этой работе мы сопоставляем результаты, полученные с помощью DEA и SFA, и предлагаем авторский алгоритм отбора входных и выходных параметров, который, насколько нам известно, ранее не применялся.

Мы развиваем направление работ (Chen et al., 2021; Maiti, 2021; Cesarone, Martino, Carleo, 2022) с учетом финансовых и нефинансовых показателей компаний-эмитентов. Мы предлагаем оригинальный подход к построению интегральной метрики (индекса) инвестиционной привлекательности с учетом широкого набора показателей по трем проекциям: 1) финансового состояния (причем не по абсолютным значениям относительных показателей, а по превышению над отраслевыми медианными уровнями), 2) качеству корпоративного управления (КУ) компаний-эмитентов, 3) биржевым характеристикам акций. Авторы работ (Faridi et al., 2023; Behera et al., 2023) сопоставляют параметрические методы отбора ценных бумаг в портфель с непараметрическими, но они используют ряд стандартных финансовых показателей компаний-эмитентов в качестве входных и выходных параметров в рамках DEA без предварительной оценки их способности объяснить различия в доходности акций. В нашей работе реализован двухэтапный алгоритм: 1) отбор значимых факторов влияния на доходность, 2) применение SFA и DEA для построения авторских интегральных метрик, по которым будут ранжироваться акции выборки.

Совет директоров (далее — СД) играет центральную роль в обеспечении эффективности компании, определяя стратегические направления развития и контролируя деятельность менеджмента. Согласно агентской теории (Agency theory) одной из важных функций СД является мониторинг деятельности менеджмента компании (Jensen, Meckling, 1976). Агентская теория сосредоточена на надзорной и контрольной функциях СД (Gul, Leung, 2004; Pucheta-Martínez, Gallego-Álvarez, 2020). В работе (García-Sánchez et al., 2021) эмпирически показано, что независимые директора обеспечивают более строгое соблюдение регуляторных требований. А в статье (Kanagaretnam, Lobo, Whalen, 2013) обнаружено положительное влияние доли независимых директоров в составе СД на будущую доходность акций компании и на будущую операционную прибыль. Но существуют и эмпирические работы с противоположными результатами, например, (Agrawal, Knoeber, 1996) показали, что высокая доля независимых директоров негативно влияет на коэффициент Q-Тобина, что может быть обусловлено политическими причинами назначения таких директоров (примеры включают политиков, защитников окружающей среды и активистов в области защиты прав потребителей).

Согласно теории стейкхолдеров (stakeholder theory) большая численность СД и его разнообразный состав способствуют повышению корпоративной устойчивости и созданию долгосрочной стоимости компании путем учета интересов широкого круга заинтересованных сторон (Freeman, 1984; Макеева и др., 2022). Эмпирическое исследование (Pucheta-Martínez, Gallego-Álvarez, 2020) на выборке компаний из 34 стран показывает, что доля независимых членов СД и численность СД положительно влияют на Q-Тобина. Однако в (Chu, Yang, 2021) авторы приходят к противоположному выводу относительно влияния размера СД на рынке США.

Д. Ермак (Yermack, 1996) на примере рынка США находит эмпирические доказательства того, что численность СД отрицательно влияет на Q-Тобина. В исследовании (Lipton, Lorsch, 1992) утверждается, что, даже если возможности мониторинга расширяются с численностью СД, преимущества перевешиваются такими издержками, как более медленное принятие решений, менее открытое обсуждение эффективности менеджмента и предубеждения против принятия риска.

Авторы (Ben Fatma, Chouaibi, 2023) находят сильную отрицательную связь между стоимостью финансовых компаний в Европе и числом членов СД.

Основной канал информации, через который директора (члены СД) получают необходимые сведения для выполнения своих обязанностей, — посещение заседаний СД (Adams, Ferreira, 2009). В работе (Cai, Garner, Walkling, 2009) показано, что рыночные инвесторы обращают особое внимание на посещаемость заседаний СД при голосовании. Однако авторы (Pandey, Vithessonthi, Mansi, 2015) не находят значимого влияния посещаемости заседаний СД на Q-Тобина, отдачу на активы и рентабельность продаж.

Поскольку выводы предыдущих работ относительно влияния характеристик СД на доходность акций противоречивы, актуальным представляется дальнейшее изучение данного вопроса с использованием современных данных. Нами рассматривается период более длительный, чем в большинстве предыдущих работ (Francis, Hasan, Wu, 2012; Kanagaretnam, Lobo, Whalen, 2013; Chu, Yang, 2021): с 2007 по 2022 г. В этот период произошел глобальный финансовый кризис 2008–2009 гг., Европейский долговой кризис 2010–2012 гг., период снижения цен на нефть 2014–2015 гг., кризис, вызванный пандемией коронавируса 2020–2021 гг., и рост геополитической напряженности (2014 и 2022 г.). Это обуславливает необходимость включения макропоказателей как контрольных переменных.

1. ОБЗОР РАНЕЕ ПРОВЕДЕННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Мы выделяем два направления нашего анализа инвестиционной привлекательности акций: выявление факторов—детерминант доходности и портфельные построения с применением регрессионного анализа и с учетом выявленных показателей влияния.

В рамках первого направления в большинстве современных работ акцент делается на выявление роли нефундаментальных факторов, включая качество корпоративного управления (Chu, Yang, 2021; Rahman, Talukdar, Bhuyan, 2021), поскольку роль финансовых факторов детально исследовали ранее (Basu, 1983; Titman, Wei, Xie, 2004; Fama, French, 2015; Navratil, Taylor, Vecer, 2021). В настоящем исследовании анализируется влияние таких факторов корпоративного управления, как численность членов СД, независимость СД и посещаемость заседаний СД. В работе (Chu, Yang, 2021) анализ рынка США показывает отрицательную связь между числом членов СД и эффективностью деятельности компании. Исследование (Ben Fatma, Chouaibi, 2023) обнаружило сильное отрицательное влияние численности СД на стоимость финансовых компаний на рынке Европы. В работе (Francis, Hasan, Wu, 2012) на рынке США выявлена положительная и значимая связь между независимостью СД и посещаемостью заседаний СД, с одной стороны, и кумулятивной доходностью акций — с другой стороны. Авторы (Kanagaretnam, Lobo, Whalen, 2013) на примере рынка США показали, что фирмы с более независимыми СД имеют более высокие показатели ROA и доходности акций в период после принятия закона Сарбейнса—Оксли (Sarbanes—Oxley Act). И, наконец, (Rahman, Talukdar, Bhuyan, 2021) выявили отрицательную связь между долей независимых директоров и короткими продажами. Вышеперечисленные выводы более ранних работ указывают на благоприятные перспективы использования нефинансовых показателей в качестве факторов—детерминант доходности акций.

В нашей работе в русле предыдущих исследований (Chu, Yang, 2021; Francis, Hasan, Wu, 2012) рассматриваются компании США, акции которых включены в индекс S&P 500.

С точки зрения методологии в рамках первого направления традиционно применяются модели регрессионного анализа. Отличие нашей работы от большинства предыдущих исследований заключается в том, что мы *выявляем зависимости с учетом отраслевой специфики*. Из финансовых показателей и показателей корпоративного управления (КУ) вычитается медианное значение по отрасли. Это важно, поскольку в ряде предыдущих работ показаны значимые различия между финансовыми показателями и показателями КУ по отраслям (Francis, Hasan, Wu, 2012; Rahman, Talukdar, Bhuyan, 2021). Помимо этого, мы используем для анализа более длительный период времени.

В рамках второго направления для сопоставления компаний по привлекательности включения в портфель разработаны модели, основанные на DEA (Charnes, Cooper, Rhodes, 1978; Banker, Charnes, Cooper, 1984) и SFA (Aigner, Lovell, Schmidt, 1977; Meeusen, Den Broeck, 1977). Согласно методу DEA эффективность трактуется как отношение взвешенной суммы выходных параметров (результатов, выгод) к взвешенной сумме входных параметров (ресурсов, затрат, рисков). Согласно

методу SFA эффективность оценивается как отношение наблюдаемой производительности к максимально возможной.

К преимуществам непараметрического метода DEA можно отнести: а) отсутствие необходимости формулирования гипотез о вероятностном распределении параметров, б) отсутствие необходимости предварительного задания весовых коэффициентов для входных и выходных параметров, в том числе на основе экспертных оценок (веса определяются автоматически в ходе решения оптимизационных задач), в) возможность выявить акции с наивысшими оценками эффективности (оптимальности) инвестирования средств с одновременным учетом совокупности различных факторов (Charnes, Cooper, Rhodes, 1978; Banker, Charnes, Cooper, 1984; Теплова, Соколова, 2017).

К преимуществам параметрического метода SFA можно отнести: способность обеспечить большую гибкость в определении технологии производства (функциональная форма) и моделирование внешних эффектов / экзогенных переменных.

В работе (Pätäri, Leivo, Nonkapuro, 2012) для анализа фондового рынка Финляндии сначала с применением DEA проводится ранжирование и разбиение на квантили акций компаний, затем оценивается эффективность соответствующих поквантильных портфелей. Авторы приходят к выводу, что портфели с наибольшими оценками эффективности согласно DEA значительно превосходят портфели с наименьшими оценками по метрикам риск-доходности. При этом доходность портфелей с наибольшими оценками эффективности согласно DEA увеличивается, если в набор переменных DEA включается моментум-характеристика акций (т.е. ее прошлая динамика). В нашем анализе также применяется моментум-фактор.

В работе (Edirisinghe, Zhang, 2008) авторы предложили использовать показатель устойчивости фирмы, построенный с применением DEA-модели на основе широкого спектра финансовых показателей, для анализа рынка США. Авторы приходят к выводу, что показатель устойчивости для заданного квартала коррелирует с доходностью акций того же квартала, а также сильно коррелирует с лагированной доходностью, подтверждая гипотезу, что реакция может наблюдаться через некоторое время после опубликования отчетности. Портфель акций с наивысшим показателем устойчивости превзошел индекс S&P 500 в коэффициенте Шарпа. В работе (Edirisinghe, Zhang, 2008) также сопоставлены текущие показатели компании с будущей доходностью акций, что представляет интерес для прогноза цен акций.

В работе (Pätäri, Karell, Luukka, 2018) для рынка США показано, как на первом этапе в портфели отбираются акции с применением ряда методов многокритериального принятия решений, включая DEA. На втором этапе оцениваются доходности и риски построенных портфелей. Показано, что все рассмотренные методы подходят для построения портфеля, способного превзойти индекс-бенчмарк (эталон) по метрикам соотношения риска к доходности; при этом авторы отмечают высокую эффективность метода DEA для построения инвестиционной стратегии. А исследование (Chen et al., 2021) продемонстрировало, что, совмещая нефинансовые показатели ESG с финансовыми методом DEA, можно сформировать портфели, которые превосходят индекс S&P 500 по доходности с поправкой на риск.

В исследовании (Neukirchen et al., 2022) была найдена высокая положительная статистически значимая связь между оценкой эффективности компаний как методом DEA, так и SFA и доходностью акций США во время падения фондового рынка в период кризиса, связанного с COVID-19. Наиболее эффективные портфели, сформированные методами DEA и SFA, значительно обогнали фондовый индекс по доходности. Однако авторы рассмотрели только один кризисный период, мы же применяем эти методы на значительно более длительном интервале времени.

В отличие от предыдущих работ (Edirisinghe, Zhang, 2008; Pätäri, Leivo, Nonkapuro, 2012; Pätäri, Karell, Luukka, 2018; Chen et al., 2021; Neukirchen et al., 2022) в нашем исследовании предварительно отбираются «входные» и «выходные» параметры для применения методов DEA и SFA: мы отбираем показатели, значимо влияющие на «избыточную» доходность акций (по сравнению с медианной оценкой). Кроме того, оригинальность нашего подхода заключается в том, что мы сопоставляем построенные инвестиционные стратегии по доходности и риску не только с фондовым индексом, но и с портфелями, сформированными случайным образом методом Монте-Карло. Помимо этого, в нашей работе сопоставляются результаты применения вышеописанных методов.

2. ГИПОТЕЗЫ

Мы выдвигаем две группы гипотез.

Первая группа гипотез касается влияния нефундаментальных факторов на доходность акций компаний с учетом отрасли эмитента.

Гипотеза 1.1. Число членов СД значимо отрицательно влияет на доходность акций компании-эмитента.

Гипотеза 1.2. Посещаемость заседаний СД значимо положительно влияет на доходность акций компании-эмитента.

Таблица 1. Переменные, используемые для построения регрессионных моделей (объясняемая переменная — *Return*)

Переменная	Описание	Исследования, в которых применялась переменная	Ожидаемое направление влияния («+» — положительное, «-» — отрицательное)
Объясняемая переменная			
<i>Return</i>	Доходность акций за год за вычетом медианной доходности по отрасли	Asness et al., 2000	
Нефундаментальные показатели (все переменные берутся за вычетом медианного показателя отрасли)			
<i>BD_Meeting</i>	Посещаемость заседаний СД, %	Fich, Shivdasani, 2006; Francis, Hasan, Wu, 2012; Lin, Yeh, Yang, 2014; Liu, Wang, Wu, 2016	+
<i>BD_Size</i>	Число членов СД	Yermack, 1996; Pucheta-Martínez, Gallego-Álvarez, 2020; Chu, Yang, 2021; Ben Fatma, Chouaibi, 2023	-
<i>BD_Indep</i>	Доля независимых членов в СД, %	Kanagaretnam, Lobo, Whalen, 2013; Pucheta-Martínez, Gallego-Álvarez, 2020; Rahman, Talukdar, Bhuyan, 2021; Макеева и др., 2022	+
Контрольные переменные — финансовые показатели (все переменные берутся за вычетом медианного показателя отрасли)			
<i>NetMargin</i>	Маржа чистой прибыли	Soliman, 2008	+
<i>GrAvgRev</i>	Средний годовой рост выручки за последние три года	Pástor, Vorsatz, 2020	+
<i>CapExAsset</i>	Отношение капитальных расходов к активам	Titman, Wei, Xi, 2004; Cooper, Gulen, Schill, 2008	+
<i>ROA</i>	Отдача на активы как отношение чистой прибыли к активам на конец года	Francis, Hasan, Wu, 2012; Song, Yeon, Lee, 2021	+
<i>ND_EBITDA</i>	Отношение чистого долга к EBITDA	Dimitrov, Jain, 2006; Penman, Richardson, Tuna, 2007; Navratil, Taylor, Vecer, 2021	-
<i>P/E</i>	Мультипликатор Цена / Прибыль	Basu, 1983; Navratil, Taylor, Vecer, 2021	-
<i>MC</i>	Рыночная капитализация. В отличие от других показателей после вычитания медианной капитализации отрасли полученная величина также делится на медианную капитализацию отрасли	Basu, 1983	-
Контрольные переменные — биржевые характеристики акций			
<i>Return_lag</i>	Доходность акции за прошлый год	Daniel, Moskowitz, 2016	+
Контрольные переменные — макроэкономические показатели			
<i>CPIIY</i>	Темп роста индекса потребительских цен за год	Jareño, Ferrer, Miroslavova, 2016	?
<i>GDP</i>	Темп прироста ВВП за год	Sawhney, Annoruo, Feridun, 2006	?

Источник: составлено авторами.

Гипотеза 1.3. Доля независимых директоров в СД значимо положительно влияет на доходность акций компании-эмитента.

Вторая группа гипотез касается возможности, применяя методы DEA и SFA, построить инвестиционные стратегии, превосходящие бенчмарки.

Гипотеза 2.1. Метод DEA позволяет построить интегральный индекс эффективности (индекс инвестиционной привлекательности) и сформировать на его основе портфель акций с более высокими показателями доходности и соотношения доходности к риску, чем бенчмарки.

Гипотеза 2.2. Метод DEA является более предпочтительным для инвестора инструментом для построения интегрального показателя при отборе акций в портфель по заданному набору факторов, чем SFA.

Перечень объясняемых и объясняющих переменных приведен в табл. 1. В ней также представлены исследования, в которых тестировалось влияние рассматриваемых независимых переменных на доходность акций.

3. МЕТОДОЛОГИЯ

Предлагаемый нами авторский алгоритм состоит из трех этапов применения. На первом этапе проводится регрессионный анализ влияния характеристик СД и финансовых показателей компаний-эмитентов, а также моментум-эффекта¹ на доходность акций.

Мы очищаем от отраслевой медианы и зависимую, и независимые переменные (см. табл. 1) в отличие от работ (Rahman, Talukdar, Bhuyan, 2021; Kanagaretnam, Lobo, Whalen, 2013), в которых рассматривались традиционные показатели, а также доходность акций без учета отраслевой специфики.

Мы строим регрессионную модель с применением взвешенного метода наименьших квадратов (ВМНК):

$$Return = \alpha + \sum_i \beta_{1,i} FIN_i + \sum_j \beta_{2,j} CORP_j + \sum_r \beta_{4,r} Momentum_r + \sum_k \beta_{3,k} Macro_k + e, \quad (1)$$

где *Return* — зависимая переменная (доходность акции за год за вычетом медианной доходности акций компаний данной отрасли); *FIN* — финансовые показатели компании-эмитента; *CORP* — характеристики СД компании-эмитента; *Momentum* — доходность акций за прошлый год за вычетом медианной доходности по отрасли; *Macro* — темп роста ВВП или индекса потребительских цен (см. табл. 1).

На втором этапе мы строим модели DEA и SFA, для которых в качестве входных и выходных параметров используются значимые показатели, отобранные на этапе регрессионного анализа.

Модель DEA основана на решении следующей задачи оптимизации (Charnes, Cooper, Rhodes, 1978):

$$\max_{v,u} \theta_o = \frac{u_1 y_{1o} + \dots + u_s y_{so}}{v_1 x_{1o} + \dots + v_m x_{mo}}, \quad o = 1, \dots, n \quad (2)$$

с ограничениями:

$$\frac{u_1 y_{1j} + \dots + u_s y_{sj}}{v_1 x_{1j} + \dots + v_m x_{mj}} \leq 1, \quad j = 1, \dots, n, \quad (3)$$

$$v_1, \dots, v_m \geq 0; \quad u_1, \dots, u_s \geq 0, \quad (4)$$

где *n* — число компаний; $x_{1j}, \dots, x_{mj} \geq 0$ и $y_{1j}, \dots, y_{sj} \geq 0$ — значения *m* входных и *s* выходных параметров для компании *j* соответственно; v_1, \dots, v_m и u_1, \dots, u_s — веса входных и выходных параметров соответственно; θ_o — коэффициент эффективности для компании *o*.

¹ Рыночная ценовая аномалия, которая бросает вызов существующей теории эффективности рынка (см. (Назарова, Лешев, 2023)).

Набор весов уникален для каждой оптимизационной задачи в отдельности (т.е. для каждой компании и заданного периода времени). Оптимизационные задачи решаются методами линейного программирования (Cooper, Seiford, Tone, 2007). В настоящей работе применяется модель DEA, предложенная (Simar, Wilson, 1998); модель позволяет провести коррекцию смещения оценок технической эффективности. Такой подход применялся в исследовании (Besstremyannaya, Simm, 2019), в результате авторы предложили программное обеспечение, которое было ими же доработано в (Besstremyannaya, Simm, 2023) и использовано нами для построения моделей в настоящей работе.

Значимость и направление воздействия показателей на доходность акций определяются на первом этапе в рамках регрессионного анализа. Если показатель значимо положительно влияет на доходность акций, то он включается в модель DEA в качестве выходного параметра, а если — отрицательно, то — в качестве входного. Таким образом, полученная с помощью DEA оценка эффективности является также мерой инвестиционной привлекательности компании (для заданного периода времени).

Л. Симар и П. Уилсон (Simar, Wilson, 2008) предложили тест, определяющий, какая модель DEA — с переменной или с постоянной отдачей от масштаба — подходит для данной выборки данных. Такой тест проверяет нулевую гипотезу (о постоянной отдаче от масштаба), и, если она отвергается, принимается альтернативная гипотеза (о переменной отдаче от масштаба). Данный тест был использован в нашей работе для выбора модели.

Мы используем модель SFA (Aigner, Lovell, Schmidt, 1977; Meeusen, Den Broeck, 1977) с граничной производственной функцией вида

$$Y_i = x_i b + (V_i - U_i), \quad i = 1, \dots, N, \quad (5)$$

где Y_i — является выходной переменной, в нашем исследовании это показатель, который положительно влияет на будущую доходность; x_i представляет собой вектор входных параметров фирмы i . В нашей работе это — показатели, которые отрицательно влияют на будущую доходность акций; β — вектор коэффициентов; V_i — случайные величины, которые считаются независимыми и одинаково распределенными, не зависящими от U_i — неотрицательных величин, которые, как предполагается, учитывают издержки неэффективности компании.

На завершающем этапе строятся портфели акций. Выбираются от 20 до 30 самых эффективных (согласно DEA и SFA) компаний. Название портфеля соответствует числу акций. Например, DEA 25 и включает 25 наиболее инвестиционно-привлекательных акций. Портфели строятся с равными весами, ребалансировка происходит раз в год 1 июня. Далее портфели сравниваются по средней доходности, волатильности доходности, коэффициентам Шарпа, α -Дженсена, β -коэффициентам, а также — перцентилю коэффициента Шарпа между построенными методом Монте-Карло случайными портфелями. Коэффициент Шарпа показывает, какую доходность, сверх безрисковой, приносит портфель на единицу риска, выраженную волатильностью. Коэффициент α -Дженсена указывает на избыточную доходность портфеля над рынком, он рассчитывается классическим способом, предложенным в (Jensen, 1967). При построении случайных портфелей методом Монте-Карло в состав каждого включается то же число акций с равными весами, как и в портфеле, согласно DEA- или SFA-модели.

4. ВЫБОРКА ДАННЫХ

Выборка включает 491 нефинансовую компанию рынка США из индекса S&P 500 за период с 2007 по 2022 г. Рассматривается 41 отрасль, в каждом году исключаются отрасли с менее чем тремя компаниями. Данные по всем компаниям являются полными, выборка сбалансирована. Для сбора информации использовалась база данных Bloomberg.

Мы выделяем два периода: первый (2008–2019 гг.) охватывает мировой финансовый кризис 2008–2009 гг., долговой кризис в еврозоне и период относительно стабильного роста фондового рынка. Второй (2019–2022 гг.) период связан с пандемией COVID-19, посткризисным восстановлением и снижением фондового рынка в 2022 г. из-за роста геополитической напряженности. Портфели строятся на основе анализа значимости показателей за период 2008–2019 гг. Доходность портфелей оценивается отдельно по двум периодам.

Таблица 2. Описательная статистика за период с 2008 по 2022 г. (число наблюдений = 3043)

Переменная	Среднее значение	Минимальное значение	Максимальное значение	Стандартное отклонение
<i>Return</i>	0,0035	-0,5	0,5	0,1824
<i>Return_lag</i>	0,0048	-0,5	0,5	0,1834
<i>BD_Meeting</i>	3,3380	-20	25	9,1000
<i>BD_Size</i>	0,0187	-4	4,5	1,7081
<i>BD_Indep</i>	-1,4769	-18	10	5,1655
<i>NetMargin</i>	0,0067	-0,4	0,4	0,1000
<i>GrAvgRev</i>	0,9402	-20	25	7,0814
<i>ROA</i>	0,5340	-13	20	4,8293
<i>ND_EBITDA</i>	0,1004	-6	8	1,8611
<i>MC</i>	0,5587	-0,9	8	1,7505
<i>P/E</i>	2,1077	-50	60	16,9414
<i>CapExAsset</i>	-0,0049	-0,12	0,06	0,0255
<i>CPIIY</i>	0,0204	-0,013	0,086	0,0232
<i>GDP</i>	0,0173	-0,034	0,0567	0,0208

Примечание. Все переменные приведены за вычетом отраслевой медианы.

Рассматривается доходность акций за период с 1 июня прошлого года по 1 июня следующего года, финансовые показатели и показатели корпоративного управления берутся за предыдущий календарный год (табл. 2).

5. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

5.1. Регрессионный анализ

В табл. 3 представлены результаты регрессионного анализа на данных 2008–2019 гг. и с 2019–2022 гг. Тест Вайта выявил наличие гетероскедастичности, в связи с этим был применен ВМНК, что сделало оценки состоятельными. Фактор инфляции дисперсии (variance inflation factor, VIF) показал отсутствие мультиколлинеарности. В Приложении приведены корреляционные матрицы для двух рассматриваемых периодов.

Как следует из данных в табл. 3, гипотезы 1.1–1.3 нашего исследования относительно влияния факторов корпоративного управления за период 2008–2019 гг. подтвердились. Компании с большей численностью СД демонстрировали меньшую доходность акций по сравнению с отраслью в оба периода, что свидетельствует об устойчивости данной связи и согласуется с ранее проведенными исследованиями (Yermack, 1996; Chu, Yang, 2021).

Посещаемость заседаний СД также положительно повлияла в первом периоде, что подтверждает выводы (Fich, Shivdasani, 2006; Francis, Hasan, Wu, 2012). Однако на втором отрезке времени значимой связи не наблюдается.

Высокая доля независимых директоров положительно влияла на доходность акций по сравнению с отраслью в обоих периодах, что свидетельствует об устойчивости влияния и соответствует результатам (Kanagaretnam, Lobo, Whalen, 2013; Rahman, Talukdar, Bhuyan, 2021).

Среди финансовых показателей отрицательное значимое влияние на доходность акций в оба периода продемонстрировала долговая нагрузка (отношение чистого долга к EBITDA), что соответствует корпоративным финансам и эмпирическим тестам (Dimitrov, Jain, 2006; Penman, Richardson, Tuna, 2007; Chu et al., 2021). Авторы (Navratil, Taylor, Vecer, 2021) также приходят к выводу, что высокий долг отрицательно влиял на доходность акций США во время пандемии COVID-19.

В первом периоде подтверждается значимый моментум-эффект. Это соответствует результатам работ (Daniel, Moskowitz, 2016). Во втором периоде прошлая доходность акций отрицательно влияла

Таблица 3. Результаты регрессионного анализа

Переменная	ВМНК, основной расчет	ВМНК, проверка устойчивости
	Июнь 2008 — июнь 2019 г.	Июнь 2019 — июнь 2022 г.
Коэффициент (стандартная ошибка)		
<i>const</i>	0,0085*** (0,0031)	-0,0007 (0,0026)
<i>Return_lag</i>	0,0288* (0,0149)	-0,0233** (0,0103)
<i>BD_Meeting</i>	0,0004* (0,0002)	-0,0003 (0,0002)
<i>BD_Size</i>	-0,0033*** (0,0012)	-0,0030** (0,0014)
<i>BD_Indep</i>	0,0009* (0,0005)	0,0030*** (0,0006)
<i>NetMargin</i>	-0,0016 (0,0346)	0,5167*** (0,0216)
<i>GrAvgRev</i>	-0,0003 (0,0003)	0,0020*** (0,0002)
<i>ROA</i>	-0,0010 (0,0006)	-0,0052*** (0,0005)
<i>ND_EBITDA</i>	-0,0045*** (0,0010)	-0,0049*** (0,0009)
<i>MC</i>	-0,00219 (0,0016)	0,0016 (0,0014)
<i>P/E</i>	0,0001 (0,0001)	-0,0004*** (0,0001)
<i>CapExAsset</i>	0,1104 (0,0722)	0,0634 (0,0864)
<i>CPIIY</i>	0,1352 (0,1591)	0,2389*** (0,0534)
<i>GDP</i>	-0,2496 (0,1524)	-0,0948 (0,0717)

Примечание. Символами «*», «**», «***» отмечены оценки, значимые на уровне 10, 5 и 1% соответственно. В круглых скобках приведены стандартные ошибки.

на будущую, что соответствует выводам (Daniel, Moskowitz, 2016) об отрицательном влиянии этого показателя в период восстановления после кризиса.

По другим финансовым показателям не выявлено значимого влияния на доходность в обоих периодах. Однако во втором периоде наблюдается значимое положительное влияние маржи чистой прибыли (*NetMargin*), что согласуется с (Soliman, 2008), который выявил прогностическую ценность данного показателя. По нашему мнению, это может быть частично связано с опасениями инвесторов по поводу высокой инфляции и, соответственно, выбором компаний с наиболее высокой маржой в отрасли.

Во втором периоде мультипликатор цена / прибыль (*P/E*) негативно влиял на доходность акций (переоцененные компании росли слабее). Это согласуется с выводами (Basu, 1983). Аналогичные результаты получили (Navratil, Taylor, Vecer, 2021), исследуя пандемию COVID-19.

Рост выручки (*GrAvgRev*) позитивно влиял на доходность акций во втором периоде. (Pástor, Vorsatz, 2020) показали, что фонды, ориентированные на акции роста, были более эффективными, чем те, которые разместили средства в акции стоимости во время вспышки COVID-19, что соответствует нашим результатам.

Рентабельность активов на втором временном отрезке вопреки нашим ожиданиям влияла негативно. В (Song, Yeon, Lee, 2021) авторы обнаружили, что высокий показатель ROA усилил отрицательное влияние COVID-19 на доходность акций в ресторанной отрасли США. Интересно, что авторы (Francis, Hasan, Wu, 2012) находят аналогичную связь во время кризиса 2008–2009 гг. По всей видимости, этот эффект устойчиво наблюдается в периоды повышенной волатильности. Мы объясняем это тем, что высокий ROA может быть связан с инвестициями в высокорисковые проекты, а инвесторы негативно оценивают такие вложения в периоды кризисов.

Из макроэкономических показателей во втором периоде оказался положительно значимым уровень инфляции. Инфляция резко снизилась во время пандемии, что сопровождалось также и резким падением фондового рынка. Далее, в период до начала 2022 г., они синхронно росли. С ростом инфляции растёт разброс уровней доходности бумаг.

Проведенный нами анализ демонстрирует, что даже в последние годы качество корпоративного управления является определяющим для доходности акций. Учет этих характеристик может помочь инвесторам принять более обоснованные решения и определить компании с лучшим потенциалом роста.

5.2. Выявление и отбор в портфель акций на границе эффективности с применением DEA- и SFA-моделей

Согласно результатам регрессионного анализа, DEA-модель строилась со следующими выходными параметрами: а) *BD_Meeting* — посещаемость заседаний СД; б) *BD_Indep* — доля независимых членов СД; в) *Return_lag* — доходность акций за прошлый год (все указанные параметры взяты за вычетом медианы отрасли). В качестве входных параметров (значимо отрицательно влияющие на доходность акций) выбраны: а) *BD_Size* — размер СД; б) *ND_EBITDA* — отношение чистого долга к EBITDA (все указанные параметры взяты за вычетом медианы отрасли).

Для SFA применялись те же показатели и тот же принцип построения модели и портфелей. Отличие метода от DEA заключается в том, что SFA позволяет использовать только один выходной параметр. В качестве выходной переменной выбрана доходность за прошлый год, а в роли входных — все остальные; при этом посещаемость и доля независимых членов СД (для соблюдения логики входных переменных) были взяты с обратным знаком.

Тест на определение предпочтительной модели, предложенный (Simar, Wilson, 2008), указывает на то, что для наших данных оптимальной является модель с постоянной отдачей от масштаба (constant returns to scale). Коэффициент корреляции между оценками методами DEA и SFA составляет 46%, что несколько ниже результата (Neukirchen et al., 2022), которые получили 60%.

5.3. Оценка доходности и соотношения риска к доходности в портфелях акций

Для сопоставления портфелей оценены годовые данные доходности. Для более объективной оценки результаты построенных нами портфелей сопоставляются с результатами: а) индекса S&P 500; б) среднего портфеля, сформированного как портфель рассматриваемых нами акций с равными весами (без учета акций финансовых компаний); в) 200 портфелями, сформированными случайным образом методом Монте-Карло. Выявлено, что в среднем рассматриваемые в исследовании компании (табл. 4, средний портфель) показали более высокую доходность, чем индекс S&P 500.

Таблица 4. Результативность авторских портфелей с 2008 по 2019 г.

Портфель	Средняя годовая доходность, %	Волатильность	Коэффициент Шарпа	Бета	Альфа Дженсена годовая, %	Процентиль по коэффициенту Шарпа среди построенных методом Монте-Карло случайных портфелей, %
Авторские портфели						
DEA 20	12,5	0,19	0,60	1,08	4,04*	93
DEA 25	12,1	0,19	0,59	1,10	3,60*	91
DEA 30	12,0	0,19	0,57	1,11	3,35*	83
SFA 20	7,8	0,18	0,38	1,00	0,05	34
SFA 25	8,4	0,17	0,44	0,95	1,02	42
SFA 30	8,3	0,17	0,44	0,95	0,94	43
Индексы-бенчмарки (эталоны)						
Средний портфель	8,8	0,17	0,46	0,99	1,12	—
S&P 500	7,8	0,17	0,40	1,00	0,00	—

Таблица 5. Результативность портфелей, 2019–2022 гг.

Портфель	Средняя годовая доходность, %	Волатильность	Коэффициент Шарпа	Бета	Альфа Дженсена годовая, %	Процентиль по коэффициенту Шарпа среди построенных методом Монте-Карло случайных портфелей, %
Авторские портфели						
DEA 20	5,58	0,07	0,72	0,71	3,00	79
DEA 25	4,21	0,07	0,56	0,69	1,65	47
DEA 30	4,16	0,07	0,58	0,65	1,58	45
SFA 20	6,87	0,09	0,72	0,84	3,78	79
SFA 25	6,54	0,08	0,83	0,67	4,05*	93
SFA 30	6,24	0,07	0,90	0,61	3,98*	93
Индексы-бенчмарки (эталон)						
Средний портфель	3,88	0,06	0,59	0,65	1,47	–
S&P 500	3,68	0,06	0,55	1,00	0,00	–

Портфели, составленные методом DEA, на интервале с июня 2008 по июнь 2019 г. показали лучшие результаты, чем индекс S&P 500 и средний портфель (по среднегодовой доходности, коэффициентам Шарпа), они также показали положительную и значимую альфу Дженсена. Портфель DEA 20 оказался лучше 93% случайно сформированных портфелей по коэффициенту Шарпа (см. табл. 4).

Анализ эффективности портфелей проводился на квартальных данных доходности для периода с июня 2019 по июнь 2022 г. (табл. 5).

Из данных в табл. 5 видно, что для периода 2019–2022 гг. портфели, основанные на модели SFA, оказались эффективнее портфелей DEA и индексов-бенчмарков (эталон) по средней доходности, коэффициенту Шарпа, α -Дженсена и эффективнее абсолютного большинства случайно сформированных портфелей. В свою очередь, DEA 20 по тем же показателям показал более высокую эффективность по сравнению со средним портфелем и индексом S&P 500.

Учитывая, что портфель DEA 20 был лучшим на промежутке с 2008 по 2018 г. и оказался эффективнее индексов-бенчмарков (эталон) в период с 2019 по 2022 г., хотя и уступил SFA портфелям, именно он, по нашему мнению, является оптимальным выбором для инвестора среди представленных портфелей. В Приложении представлена доходность портфеля DEA 20 за вычетом доходности индексов-бенчмарков (эталон) по годам.

Эффективность портфеля DEA 20 подтверждает гипотезу 2.1 нашего исследования и согласуется с выводами (Edirisinghe, Zhang, 2008; Pätäri, Karell, Luukka, 2018; Pätäri, Leivo, Honkapuro, 2012). Гипотеза 2.2 не подтверждена, в первом периоде результаты портфелей DEA были выше, во втором эффективнее оказались портфели SFA.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В нашей работе на новых данных о рынке США, включающих периоды пандемии COVID-19 и роста геополитической напряженности, показано, что инвестиционная привлекательность акций определяется не только финансовыми показателями компаний-эмитентов, но и характеристиками корпоративного управления. Исследование показало, что и до 2019 г., и в период 2020–2022 гг. размер СД и доля независимых директоров значимо влияли на доходность акций за вычетом медианной отрасли. А вот статистическая значимость посещаемости заседаний СД наблюдалась только в первом периоде, а с 2020 по 2022 г. была невысокой.

Мы показали, что непараметрический метод DEA позволяет построить авторский интегральный индекс для отбора акций в портфель таким образом, чтобы превзойти по доходности и соотношению риска к доходности индекс S&P 500, портфель акций из S&P 500 с равными весами

и большую часть сформированных случайным образом портфелей. В портфели, построенные нами на основе метода DEA, входит 20–30 ценных бумаг из индекса S&P 500. Полученный результат представляет практическую значимость для инвесторов и портфельных управляющих. Мы отмечаем, что оптимальный DEA-портфель включает 20 ценных бумаг, результаты портфелей из 25 и 30 ценных бумаг несколько хуже. Вопрос об оптимальном числе ценных бумаг в портфеле представляет интерес для будущих исследований.

Портфели, основанные на модели DEA, более эффективны по показателям доходности и соотношению риска к доходности, чем портфели, основанные на модели SFA в период с 2008 по 2018 г., однако с 2019 по 2022 г. портфели на основе SFA оказались более эффективными.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица П1. Корреляционная матрица для периода 2019–2022 гг.

	<i>Return</i>	<i>Return_lag</i>	<i>BD_Meeting</i>	<i>BD_Size</i>	<i>BD_Indep</i>	<i>NetMargin</i>	<i>GrAvgRev</i>	<i>CapExAsset</i>	<i>ROA</i>	<i>ND_EBITDA</i>	<i>MC</i>	<i>P/E</i>
<i>Return</i>	1,000	−0,098	−0,016	0,011	0,072	0,352	0,054	−0,019	−0,028	−0,021	0,018	−0,045
<i>Return_lag</i>		1,000	0,039	0,013	0,030	−0,153	−0,020	−0,041	0,007	−0,048	0,146	0,135
<i>BD_Meeting</i>			1,000	0,069	0,031	0,023	−0,071	0,009	0,002	0,050	0,099	−0,015
<i>BD_Size</i>				1,000	0,209	−0,038	−0,018	0,025	−0,192	0,089	0,261	0,002
<i>BD_Indep</i>					1,000	−0,015	−0,018	−0,001	−0,069	0,054	0,148	−0,002
<i>NetMargin</i>						1,000	−0,028	−0,016	0,225	−0,025	0,002	−0,124
<i>GrAvgRev</i>							1,000	−0,084	0,017	0,016	0,001	0,244
<i>CapExAsset</i>								1,000	−0,083	0,131	−0,030	−0,029
<i>ROA</i>									1,000	−0,301	0,043	−0,107
<i>ND_EBITDA</i>										1,000	−0,043	−0,098
<i>MC</i>											1,000	0,118
<i>P/E</i>												1,000

Таблица П2. Корреляционная матрица для периода 2019–2022 гг.

	<i>Return</i>	<i>Return_lag</i>	<i>BD_Meeting</i>	<i>BD_Size</i>	<i>BD_Indep</i>	<i>NetMargin</i>	<i>GrAvgRev</i>	<i>CapExAsset</i>	<i>ROA</i>	<i>ND_EBITDA</i>	<i>MC</i>	<i>P/E</i>
<i>Return</i>	1,000	−0,098	−0,016	0,011	0,072	0,352	0,054	−0,019	−0,028	−0,021	0,018	−0,045
<i>Return_lag</i>		1,000	0,039	0,013	0,030	−0,153	−0,020	−0,041	0,007	−0,048	0,146	0,135
<i>BD_Meeting</i>			1,000	0,069	0,031	0,023	−0,071	0,009	0,002	0,050	0,099	−0,015
<i>BD_Size</i>				1,000	0,209	−0,038	−0,018	0,025	−0,192	0,089	0,261	0,002
<i>BD_Indep</i>					1,000	−0,015	−0,018	−0,001	−0,069	0,054	0,148	−0,002
<i>NetMargin</i>						1,000	−0,028	−0,016	0,225	−0,025	0,002	−0,124
<i>GrAvgRev</i>							1,000	−0,084	0,017	0,016	0,001	0,244
<i>CapExAsset</i>								1,000	−0,083	0,131	−0,030	−0,029
<i>ROA</i>									1,000	−0,301	0,043	−0,107
<i>ND_EBITDA</i>										1,000	−0,043	−0,098
<i>MC</i>											1,000	0,118
<i>P/E</i>												1,000

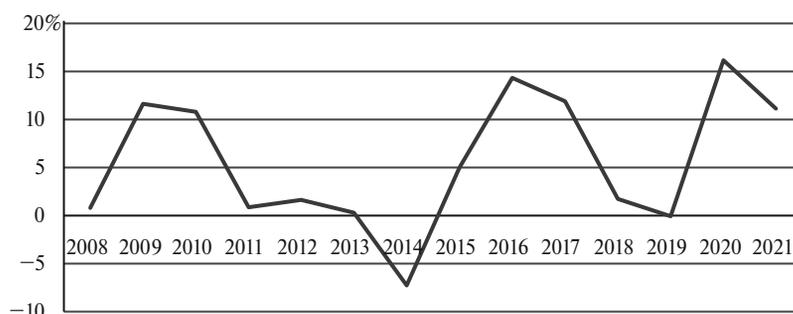


Рис. П1. Доходность портфеля DEA 20 за вычетом доходности индекса S&P 500

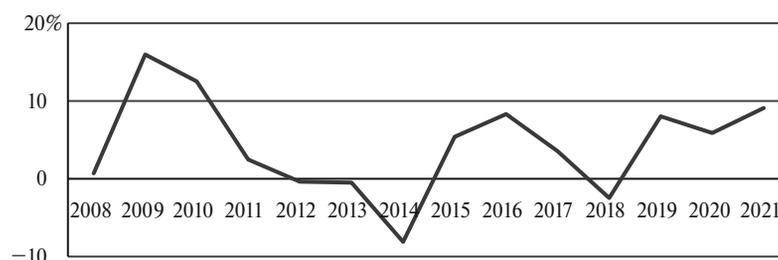


Рис. П2. Доходность DEA 20 за вычетом доходности среднего портфеля

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/ REFERENCES

- Макеева Е.Ю., Попов К.А., Дихтярь А.А., Судакова А.В.** (2022). Взаимосвязь характеристик совета директоров с ESG-рейтингами и стоимостью российских компаний // *Российский журнал менеджмента*. Т. 20. Вып. 4. С. 498–523. [Makeeva E. Yu., Popov K.A., Dikhtyar A.A., Sudakova A.V. (2022). The relationship between board characteristics, ESG ratings, and the value of Russian companies. *Russian Management Journal*, 20, 4, 498–523 (in Russian).]
- Назарова В.В., Лешев С.И.** (2023). Исследование моментум-эффекта в динамике цен высоколиквидных акций на российском рынке ценных бумаг // *Финансовый журнал*. Т. 15. № 1. С. 58–73. DOI: 10.31107/2075-1990-2023-1-58-73 [Nazarova V.V., Leshchev S.I. (2023). Study of the momentum effect in the price dynamics of highly liquid shares on the Russian securities market. *Financial Journal*, 15 (1), 58–73. DOI: 10.31107/2075-1990-2023-1-58-73 (in Russian).]
- Теплова Т.В., Соколова Т.В.** (2017). Непараметрический метод оболочечного анализа для портфельных построений на российском рынке облигаций // *Экономика и математические методы*. Т. 53. № 3. С. 110–128. [Teplova T.V., Sokolova T.V. (2017). Nonparametric data envelopment analysis method for portfolio construction in the Russian bond market. *Economics and Mathematical Methods*, 53, 3, 110–128 (in Russian).]
- Adams R., Ferreira D.** (2009). Women in the boardroom and their impact on governance and performance. *Journal of Financial Economics*, 94, 291–309.
- Agrawal A., Knoeber C.R.** (1996). Firm performance and mechanisms to control agency problems between managers and shareholders. *The Journal of Financial and Quantitative Analysis*, 31, 3, 377–397.
- Aigner D., Lovell C.K., Schmidt P.** (1977). Formulation and estimation of stochastic frontier production function models. *Journal of Econometrics*, 6, 1, 21–37.
- Asness C.S., Porter R.B., Stevens R.L.** (2000). *Predicting stock returns using industry-relative firm characteristics*. Available at: SSRN213872.
- Banker R.D., Charnes A., Cooper W.W.** (1984). Some models for estimating technical and scale inefficiencies in data envelopment analysis. *Management Science*, 30, 9, 1078–1092.
- Basu S.** (1983). The relationship between earnings yield, market value and return for NYSE common stocks. *Journal of Financial Economics*, 12, 129–156.
- Behera J., Pasayat A.K., Behera H., Kumar P.** (2023). Prediction based mean-value-at-risk portfolio optimization using machine learning regression algorithms for multi-national stock markets. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 120, 105843.
- Ben Fatma H., Chouaibi J.** (2023). Corporate governance and firm value: A study on European financial institutions. *International Journal of Productivity and Performance Management*, 72, 5, 1392–1418.

- Besstremyannaya G., Simm J.** (2019). Estimation of cost efficiency in non-parametric frontier models // *Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 5. Экономика*. Т. 35. С. 3–21 (на англ.). [**Besstremyannaya G., Simm J.** (2019). Estimation of cost efficiency in non-parametric frontier models. *St. Petersburg University Journal of Economic Studies*, 35, 3–21 (in English).]
- Besstremyannaya G., Simm J.** (2023). *Robust data envelopment analysis (DEA) for R*. (Package ‘rDEA’, Version 1.2–8). 2023–06–29. Available at: <https://github.com/jaak-s/rDEA>
- Cai J., Garner J.L., Walkling R.A.** (2009). Electing directors. *Journal of Finance*, 64, 2389–2421.
- Cesarone F., Martino M.L., Carleo A.** (2022). Does ESG impact really enhance portfolio profitability. *Sustainability*, 14, 4, 2050.
- Charnes A., Cooper W.W., Rhodes E.** (1978). Measuring the efficiency of decision-making units. *European Journal of Operational Research*, 2, 429–444.
- Chen L., Zhang L., Huang J., Xiao H., Zhou Z.** (2021). Social responsibility portfolio optimization incorporating ESG criteria. *Journal of Management Science and Engineering*, 6, 1, 75–85.
- Chu C., Yang Z.** (2021). The relationship between board size and firm performance. *E3S Web Conf.*, 257, 02079.
- Cooper M.J., Gulen H., Schill M.J.** (2008). Asset growth and the cross-section of stock returns. *Journal of Finance*, 63, 4, 1609–1651.
- Cooper W.W., Seiford L.M., Tone K.** (2007). *Data envelopment analysis: A comprehensive text with models, applications, references and DEA-solver software*. 2nd ed. N.Y.: Springer.
- Daniel K., Moskowitz T.** (2016). Momentum crashes. *Journal of Financial Economics*, 122, 2, 221–247.
- Dimitrov V., Jain P.** (2006). The value relevance of changes in financial leverage. *SSRN Electronic Journal*. DOI: 10.2139/ssrn.708281
- Edirisinghe N., Zhang X.** (2008). Portfolio selection under DEA-based relative financial strength indicators: Case of US industries. *Journal of the Operational Research Society*, 59, 6, 842–856.
- Fama E.F., French K.R.** (2010). Luck versus skill in the cross-section of mutual fund returns. *The Journal of Finance*, 65, 5, 1915–1947.
- Fama E.F., French K.R.** (2015). A five-factor asset pricing model. *Journal of Financial Economics*, 116, 1, 1–22.
- Faridi S., Madanchi Zaj M., Daneshvar A., Shahverdiani S., Rahnamay Roodposhti F.** (2023). Portfolio rebalancing based on a combined method of ensemble machine learning and genetic algorithm. *Journal of Financial Reporting and Accounting*, 21, 1, 105–125.
- Fich E.M., Shivdasani A.** (2006). Are busy boards effective monitors. *The Journal of Finance*, 61, 2, 689–724.
- Francis B., Hasan I., Wu Q.** (2012). Do corporate boards affect firm performance? New evidence from the financial crisis. *Bank of Finland Research Discussion Papers*, 11/2012. Bank of Finland.
- Freeman R.E.** (1984). *Strategic management: A stakeholder approach*. Boston: Pitman.
- Gul F.A., Leung S.** (2004). Board leadership, outside directors’ expertise and voluntary corporate disclosures. *Journal of Accounting and Public Policy*, 23, 5, 351–379.
- Jareño F., Ferrer R., Miroslavova S.** (2016). US stock market sensitivity to interest and inflation rates: A quantile regression approach. *Applied Economics*, 48, 26, 2469–2481.
- Jensen M.** (1967). The performance of mutual funds in the period 1945–64. *Journal of Finance*, 23, 2, 389–416.
- Jensen M.C., Meckling W.H.** (1976). Theory of the firm: Managerial behavior, agency costs and ownership structure. *Journal of Financial Economics*, 3, 4, 305–360.
- Kanagaretnam K., Lobo G.J., Whalen D.J.** (2013). Relationship between board independence and firm performance post Sarbanes Oxley. *Corporate Ownership & Control*, 11, 1, 65–80.
- Lin Y.F., Yeh Y.M.C., Yang F.M.** (2014). Supervisory quality of board and firm performance: A perspective of board meeting attendance. *Total Quality Management Business Excellence*, 25, 3–4, 264–279.
- Lipton L., Lorsch J.** (1992). A modest proposal for improved corporate governance. *The Business Lawyer*, 48, 59–77.
- Liu H., Wang H., Wu L.** (2016). Removing vacant chairs: Does independent directors’ attendance at board meetings matter. *Journal of Business Ethics*, 133, 2, 375–393.
- Maiti M.** (2021). Is ESG the succeeding risk factor. *Journal of Sustainable Finance & Investment*, 11, 3, 199–213.
- Meeusen W., Den Broeck J. van** (1977). Efficiency estimation from Cobb–Douglas production functions with composed error. *International Economic Review*, 18, 2, 435–444. DOI: 10.2307/2525757
- Navratil R., Taylor S., Vecer J.** (2021). On equity market inefficiency during the COVID-19 pandemic. *International Review of Financial Analysis*, 77, 101820.

- Neukirchen D., Engelhardt N., Krause M., Posch P.N.** (2022). Firm efficiency and stock returns during the COVID-19 crisis. *Finance Research Letters*, 44, 102037.
- Pandey R., Vithessonthi C., Mansi M.** (2015). Busy CEOs and the performance of family firms. *Research in International Business and Finance*, 33, 144–166.
- Pástor L., Vorsatz M.B.** (2020). Mutual fund performance and flows during the COVID-19 crisis. *The Review of Asset Pricing Studies*, 10, 4, 791–833.
- Pätäri E., Karell V., Luukka P.** (2018). Comparison of the multicriteria decision-making methods for equity portfolio selection: The U.S. evidence. *European Journal of Operational Research*, 265, 2, 655–672.
- Pätäri E., Leivo T., Honkapuro S.** (2012). Enhancement of equity portfolio performance using data envelopment analysis. *European Journal of Operational Research*, 220, 3, 786–797.
- Penman S.H., Richardson S.A., Tuna I.** (2007). The book-to-price effect in stock returns: Accounting for leverage. *Journal of Accounting Research*, 45, 2, 427–467.
- Pucheta-Martínez M.C., Gallego-Álvarez I.** (2020). Do board characteristics drive firm performance? An international perspective. *Review of Managerial Science*, 14, 6, 1251–1297.
- Rahman A., Talukdar B., Bhuyan R.** (2021). Board independence and short selling. *Finance Research Letters*, 39, 101616.
- Sawhney B., Annoruo E., Feridun M.** (2006). Long-run relationship between economic growth and stock returns: An empirical investigation on Canada and the United States. *Journal of Economics*, 54, 6, 584–596.
- Simar L., Wilson P.W.** (1998). Sensitivity analysis of efficiency scores: How to bootstrap in nonparametric frontier models. *Management Science*, 44 (1), 49–61.
- Simar L., Wilson P.W.** (2008). Statistical inference in nonparametric frontier models: Recent developments and perspectives. In: *The measurement of productive efficiency and productivity growth*. N.Y.: Oxford University Press, 421–521.
- Soliman M.T.** (2008). The use of DuPont analysis by market participants. *The Accounting Review*, 83, 3, 823–853.
- Song H.J., Yeon J., Lee S.** (2021). Impact of the COVID-19 pandemic: Evidence from the US restaurant industry. *International Journal of Hospitality Management*, 92, 102702.
- Titman S., Wei K.C. J., Xie F.** (2004). Capital investments and stock returns. *Journal of Financial and Quantitative Analysis*, 39, 4, 677–700.
- Yermack D.** (1996). High market valuation of companies with a small board of directors. *Journal of Financial Economics*, 40, 185–211.

Portfolio constructions in the stock market based on Data Envelopment Analysis and Stochastic Frontier Analysis

© 2024 T.V. Teplova, T.V. Sokolova, A.I. Haniev

T.V. Teplova,

*National Research University “Higher School of Economics” (HSE University), Moscow, Russia;
e-mail: tteplova@hse.ru*

T.V. Sokolova,

*National Research University “Higher School of Economics”, (HSE University), Moscow, Russia;
e-mail: tv.sokolova@hse.ru*

A.I. Haniev,

*National Research University “Higher School of Economics”, (HSE University), Moscow, Russia;
e-mail: ahaniev@hse.ru*

Received 25.08.2023

The research was supported by the Russian Science Foundation under grant 23-28-00740 (<https://rscf.ru/project/23-28-00740/>).

Abstract. The study compares the results of applying the parametric method of Stochastic Frontier Analysis (SFA) and the non-parametric Bias-corrected Data Envelopment Analysis (DEA) for forming integrated stock selection metrics in portfolios based on diverse financial and non-financial indicators of U.S. issuing companies. The authors implement a novel approach in which “input” and “output” indicators for both stochastic frontier analysis and data envelopment analysis models are pre-selected using regression analysis. Deviations of identified company indicators from median industry values are considered. Significant characteristics in explaining stock returns include board size, proportion of independent directors, board meetings attendance, and among financial and market characteristics — the net debt to EBITDA ratio and past stock returns (momentum-effect). It is demonstrated that portfolios consisting of 20–30 securities, constructed on the authors’ integrated metrics, outperform in terms of returns and risk–return ratio compared to the S&P 500 index and an equal-weighted portfolio of all considered stocks. The stability of conclusions is verified through comparison with randomly generated portfolios (Monte Carlo method). The obtained results remain stable for both the pre-Covid-19 pandemic period (2008–2019) and the period including the pandemic and geopolitical tensions from 2020 to 2022. From 2008 to 2019, portfolios created using the data envelopment analysis method were more effective than those based on stochastic frontier analysis models. Conversely, during the period from 2020 to 2022, the latter demonstrated superior performance.

Keywords: DEA; data envelopment analysis; SFA; stochastic frontier analysis; portfolio; stocks; board of directors; corporate governance.

JEL Classification: C51, C61, G11.

UDC: 336.763.2.

For reference: **Teplova T.V., Sokolova T.V., Haniev A.I.** (2024). Portfolio constructions in the stock market based on Data Envelopment Analysis and Stochastic Frontier Analysis. *Economics and Mathematical Methods*, 60, 2, 123–138. DOI: 10.31857/S0424738824020102 (in Russian).

МАТЕМАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЭКОНОМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

О местоположении геометрических медиан треугольников

© 2024 г. П.А. Панов

П.А. Панов,

НИУ «Высшая школа экономики», Москва; e-mail: ppanov@hse.ru

Поступила в редакцию 14.07.2023

Аннотация. Геометрическая медиана является естественным пространственным обобщением статистической медианы одномерной выборки. Задача вычисления медианы конечного набора точек (выборки) на прямой не вызывает затруднений, но при переходе на плоскость или в пространства высшей размерности, где отсутствует естественный линейный порядок точек, такие затруднения возникают. Дело в том, что, например, для многомерной выборки среднее значение, как и на прямой, вычисляется взятием арифметического среднего. Однако для геометрической медианы подобная аналитическая формула принципиально отсутствует. Тем более такие формулы неизвестны для геометрических медиан непрерывных объектов, расположенных на плоскости или в пространстве. В связи с этим возникает естественный вопрос об аналитических оценках местоположения геометрических медиан. В работе приведены решения двух простейших задач такого рода. А именно – решение задачи об оценке местоположения геометрической медианы периметра треугольника и решение аналогичной задачи о геометрической медиане треугольной области. Для обеих задач получены точные оценки аффинного типа.

Ключевые слова: геометрическая медиана, барицентрические координаты, аффинные отображения, пространство треугольников, вырожденные треугольники, медианные отображения, градиентная система.

Классификация JEL: C61, C31, C65.

УДК: 519.863.

Для цитирования: **Панов П.А.** (2024). О местоположении геометрических медиан треугольников // *Экономика и математические методы*. Т. 60. № 2. С. 139–144. DOI: 10.31857/S0424738824020117

1. ВВЕДЕНИЕ

Геометрическая (пространственная) медиана и некоторые ее обобщения широко используются в экономической теории, начиная с работ Вильгельма Лаунхардта и Альфреда Вебера по теории размещения производства (Murray, 2020, vol. 8, p. 237–243). Теория размещения со временем стала необходимым инструментом в экономической географии, региональной экономике и в экономике города. Например, геометрическая медиана успешно используется для отыскания оптимального расположения культурных центров, школ, медицинских центров или аварийно-спасательных служб на городской территории (Панов, 2017; Yao, Zhang, Murray, 2019).

Важнейшее свойство медианы числовой выборки заключается в том, что эта медиана минимизирует суммарное расстояние до всех элементов выборки. Именно это свойство минимальности положено в основу определения геометрической медианы для конечных наборов точек на плоскости. Далее это определение легко переносится на любое метрическое пространство, в том числе и на Евклидово пространство \mathbb{R}^n . А с помощью интегрирования оно распространяется и на ограниченные подмножества любой размерности в \mathbb{R}^n (Fekete, Mitchell, Beurer, 2005).

Уже давно разработаны эффективные численные методы отыскания геометрической медианы, но до сих пор отсутствуют общие аналитические формулы для ее вычисления (Важај, 1988). Точные формулы не известны даже для различного рода геометрических медиан обычных треугольников, и в связи с этим речь здесь пойдет об оценках местоположения таких медиан.

Существует три различных взгляда на треугольник. Можно считать, что это: трехточечное подмножество плоскости; замкнутая трехзвенная ломаная на плоскости; треугольная область

на плоскости. В соответствии с этим имеются три рода геометрических медиан m_0, m_1, m_2 , связанных с треугольником:

$$m_0 = \arg \min_{X \in \mathbb{R}^2} (|A-X| + |B-X| + |C-X|);$$

$$m_1 = \arg \min_{X \in \mathbb{R}^2} \left(\int_{P \in a} |P-X| dP + \int_{P \in b} |P-X| dP + \int_{P \in c} |P-X| dP \right); \quad (1)$$

$$m_2 = \arg \min_{X \in \mathbb{R}^2} \int_{P \in abc} |P-X| dP. \quad (2)$$

Здесь A, B, C — вершины треугольника; a, b, c — его стороны и abc — треугольная область, ограниченная сторонами a, b, c . Геометрическая медиана m_0 — это точка Ферма–Торричелли треугольника ABC , формулы для вычисления которой хорошо известны¹, — поэтому она исключается из обсуждения. Но для точек m_1, m_2 точные формулы отсутствуют. Однако удалось получить точные оценки аффинного типа для возможного расположения геометрических медиан m_1 периметров треугольников и для расположения геометрических медиан m_2 треугольных областей.

2. ОСНОВНОЙ РЕЗУЛЬТАТ

Теорема 1. Пусть задан произвольный треугольник δ , и пусть δ' — его образ при гомотетии с коэффициентом $1/4$ с центром, расположенным в центроиде треугольника δ , а δ'' — криволинейный треугольник, составленный из дуг гипербол. При этом вершины δ'' совпадают с вершинами δ' , а каждая из трех гипербол имеет асимптотами две стороны треугольника δ и касается двух его медиан (рис. 1). Тогда:

- 1) геометрическая медиана $m_1(\delta)$ треугольника δ лежит внутри треугольника δ' ;
- 2) геометрическая медиана $m_2(\delta)$ треугольника δ лежит внутри треугольника δ'' .

Рис. 1 служит иллюстрацией к теореме 1. На нем изображен треугольник δ со сторонами 9, 7, 5, соответствующие ему треугольник δ' и криволинейный треугольник δ'' , а также две точки — геометрические медианы $m_1(\delta)$ и $m_2(\delta)$.

Дополним геометрическое описание треугольников δ' и δ'' , представленных в теореме 1, их аналитическим описанием.

Дополнение 1. Пусть задан треугольник $\delta = A_1A_2A_3$. Тогда стороны соответствующего ему треугольника δ' задаются следующими параметрическими уравнениями

$$h_i(t) = tA_i + \frac{1}{4}A_j + \left(\frac{3}{4} - t\right)A_k, \quad (3)$$

где (i, j, k) произвольная циклическая перестановка чисел 1, 2, 3, а параметр t меняется в пределах $1/4 \leq t \leq 1/2$.

Дополнение 2. Для треугольника $\delta = A_1A_2A_3$ отрезки гипербол, ограничивающих соответствующий δ треугольник δ'' из теоремы 1, имеют параметрические уравнения вида

$$h_i(t) = \frac{1}{2\sqrt{2}} \left(tA_i + t^{-1}A_j + (2\sqrt{2} - (t+t^{-1}))A_k \right). \quad (4)$$

Здесь (i, j, k) — произвольная циклическая перестановка чисел 1, 2, 3, а параметр t на этот раз меняется в пределах $1/\sqrt{2} \leq t \leq \sqrt{2}$.

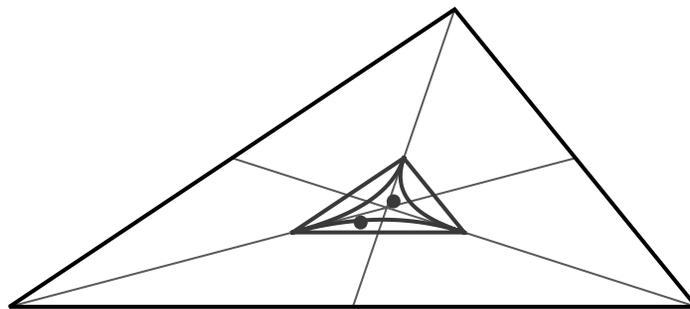


Рис. 1. Геометрическая медиана $m_1(\delta)$ содержится внутри подобного δ маленького треугольника δ' , а геометрическая медиана $m_2(\delta)$ — в маленьком криволинейном треугольнике δ''

¹ Точка $X(13)$ из «Encyclopedia of triangle centers» (<https://faculty.evansville.edu/ck6/encyclopedia/ETC.html>).

3. ОСНОВНЫЕ ИНСТРУМЕНТЫ

В этом разделе мы укажем основные инструменты, которые используются при доказательстве теоремы 1, а именно: барицентрические координаты, аффинные отображения, пространство треугольников, медианные отображения и вырожденные треугольники.

Барицентрические координаты (Балк, Болтянский, 1987). Пусть задан треугольник $\delta = A_1A_2A_3$. Тогда любая точка A внутри этого треугольника однозначно представляется в виде

$$A = \lambda_1 A_1 + \lambda_2 A_2 + \lambda_3 A_3, \tag{5}$$

где числа $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ положительны и $\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 = 1$.

Набор из этих трех чисел $(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)$ называется барицентрическими координатами точки A относительно треугольника δ .

Теперь, если вернуться к формулам (3) и (4) из дополнений 1 и 2, то эти формулы задают барицентрические координаты границ треугольников δ' и δ'' , соответствующих треугольнику $\delta = A_1A_2A_3$.

Для нас существенно, что для подобных треугольников δ_1 и δ_2 барицентрические координаты геометрических медиан $m_1(\delta_1)$ и $m_1(\delta_2)$ равны между собой, аналогично — и для $m_2(\delta_1)$ и $m_2(\delta_2)$. В этом смысле можно сказать, что в подобных треугольниках геометрические медианы расположены одинаковым образом. Это свойство геометрических медиан называют их *эквивариантностью* относительно преобразования подобия.

Пространство треугольников. Для каждого треугольника существует единственный подобный ему треугольник периметра 1. В силу эквивариантности геометрических медиан теорему 1 достаточно доказать только для треугольников периметра 1.

Существует много способов объединения треугольников единичного периметра в единое пространство (Behrend, 2014; Панов, 2021). Для наших целей выберем самый простой из них (Stewart, 2017). А именно каждому треугольнику единичного периметра с упорядоченным набором сторон a, b, c сопоставим точку $(a, b, c) \in \mathbb{R}^3$. Эти точки заполнят в \mathbb{R}^3 целый треугольник с вершинами $(1/2, 1/2, 0)$, $(1/2, 0, 1/2)$, $(0, 1/2, 1/2)$ лежащий в плоскости $x + y + z = 1$. Обозначим его ∇ . Каждая точка, принадлежащая ∇ , отвечает некоторому треугольнику, поэтому ∇ называется *пространством треугольников*.

Вырожденные треугольники. Обратим внимание на граничные точки пространства ∇ . Для координат (a, b, c) внутренних точек ∇ выполняется неравенство треугольника, т.е. большее из чисел a, b, c меньше суммы двух других, но для граничных точек ∇ бо́льшая из координат будет равна сумме двух других.

Треугольники, у которых одна сторона равна сумме двух других, называются *вырожденными*.

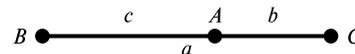


Рис. 2. Вырожденный треугольник, $a = b + c$

В случае когда именно $a = b + c$, вырожденный треугольник можно представлять как отрезок CB с отмеченной на нем точкой A (рис. 2). Таким образом, можно считать, что граница $\partial\nabla$ пространства ∇ соответствует вырожденным треугольникам с единичным периметром.

Медианные отображения. Введем в рассмотрение еще один правильный треугольник Δ с вершинами $(1, 0, 0)$, $(0, 1, 0)$, $(0, 0, 1)$, лежащий в плоскости $x + y + z = 1$, и определим два *медианных* отображения M_i , $i = 1, 2$: $M_i : \nabla \rightarrow \Delta$ из пространства треугольников ∇ в правильный треугольник Δ .

Пусть задана точка $(a, b, c) \in \nabla$, соответствующая некоторому треугольнику δ с упорядоченным набором сторон a, b, c . Пусть также m_i — геометрическая медиана этого треугольника δ , а $\lambda_1^i, \lambda_2^i, \lambda_3^i$ — ее барицентрические координаты относительно δ , тогда $\lambda_1^i + \lambda_2^i + \lambda_3^i = 1$. Поэтому $(\lambda_1^i, \lambda_2^i, \lambda_3^i) \in \Delta$ и по определению отображение M_i устроено следующим образом:

$$M_i : (a, b, c) \mapsto (\lambda_1^i, \lambda_2^i, \lambda_3^i). \tag{5}$$

Образ отображения M_1 обозначим Δ' , образ отображения M_2 обозначим Δ'' .

Как мы собрали все треугольники в единое пространство ∇ , так и медианное отображение M_1 собирает геометрические медианы m_1 всех треугольников в единое пространство $\Delta' \subset \Delta$, а медианное отображение M_2 собирает геометрические медианы m_2 всех треугольников в $\Delta'' \subset \Delta$.

Используя понятие аффинного отображения, можно дать альтернативное определение медианных отображений M_1 и M_2 . Напомним, что для любой пары треугольников с заданным порядком вершин существует единственное аффинное отображение, переводящее вершины первого из них в вершины второго в указанном порядке. При этом отображении точка, имеющая барицентрические координаты $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ относительно первого треугольника, переходит в точку, имеющую те же самые барицентрические координаты относительно второго треугольника.

Пусть теперь $\delta = abc$ — треугольник единичного периметра со сторонами a, b, c и геометрическими медианами $m_1(\delta)$ и $m_2(\delta)$. Пусть также A_δ — аффинное отображение треугольника δ в треугольник Δ : $A_\delta: \delta \rightarrow \Delta$. Тогда медианное отображение M_i из формулы (5) можно определить формулой

$$M_i: (a, b, c) \mapsto A_\delta(m_i(\delta)). \quad (6)$$

Это следует из того, что для точек, лежащих в плоскости $x + y + z = 1$, их барицентрические координаты относительно Δ и их декартовы координаты совпадают.

Компьютерная визуализация. На рис. 3 представлена компьютерная визуализация медианного отображения $M_1: \nabla \rightarrow \Delta$. Для его построения была использована репрезентативная выборка точек из пространства ∇ , образы которых достаточно плотно заполняют Δ' . Используя это изображение, а также подвижную визуализацию отображения M_1^2 , можно сделать вывод, что граница пространства треугольников $\partial\nabla$, соответствующая вырожденным треугольникам, при отображении M_1 переходит в границу области Δ' , которую мы обозначим $\partial\Delta'$.

То же самое, что было отмечено выше в отношении отображения M_1 , можно отнести и к медианному отображению M_2 (рис. 4). И здесь граница пространства треугольников $\partial\nabla$, соответствующая вырожденным треугольникам, при отображении M_2 тоже переходит в границу образа этого отображения, т.е. в $\partial\Delta''$. Описанные здесь свойства медианных отображений M_1 и M_2 позволяют наметить основные шаги для доказательства теоремы 1.

ОСНОВНЫЕ ИДЕИ ДОКАЗАТЕЛЬСТВА

Главный шаг в доказательстве основного результата — вычисление уравнений границ образов медианных отображений M_1 и M_2 , т.е. границ множеств Δ' и Δ'' на рис. 3–4. Как было указано в предыдущем разделе, для этого нужно уметь вычислять местоположение геометрических медиан m_1 и m_2 вырожденных треугольников, а именно барицентрические координаты этих медиан. Это вычисление осуществляется с помощью предельного перехода и с помощью соответствующего этому переходу асимптотического анализа градиентных систем для решения минимизационных задач (1) и (2) (Панов, 2021). Вот формулировка нужного нам результата.

Предложение 1. Пусть $\delta = abc$ — вырожденный треугольник и $a \geq b \geq c$, и пусть a_n, b_n, c_n — последовательность сходящихся к нему обычных треугольников, т.е. обычных треугольников, для которых $a_n \rightarrow a, b_n \rightarrow b, c_n \rightarrow c$. Тогда:

1) геометрическая медиана m_1 треугольника a_n, b_n, c_n удалена от общей вершины сторон a_n и b_n на расстояние, близкое к $a/2$, а отношение расстояний от нее до сторон a_n и b_n близко к 1;

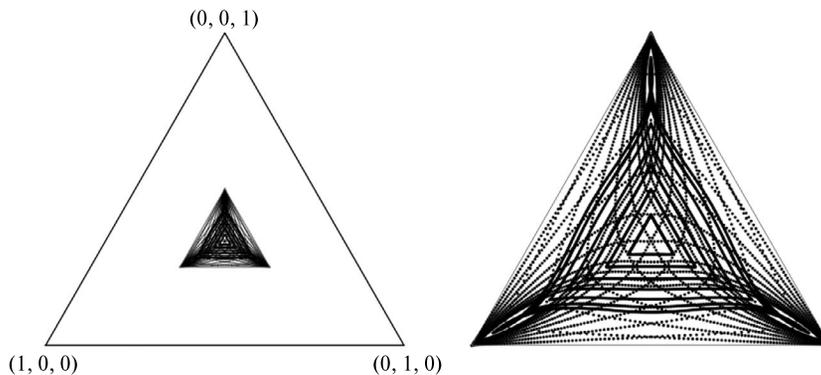


Рис. 3. Слева в треугольнике Δ находится образ отображения M_1 — область Δ' , справа — увеличенная копия Δ'

² https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Animation_M_1.gif

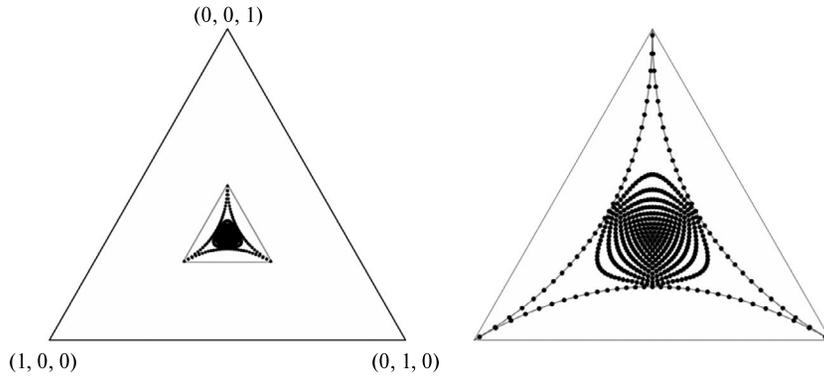


Рис. 4. Треугольник Δ (слева — область Δ'' — образ отображения M_2 , справа — увеличенная копия Δ'')

2) геометрическая медиана m_2 треугольника $a_n b_n c_n$ удалена от общей вершины сторон a_n и b_n на расстояние, близкое к $\sqrt{ab}/2$, и отношение расстояний от нее до сторон a_n и b_n близко к 1.

На менее формальном и более выразительном языке можно сказать, что геометрические медианы m_1 и m_2 вырожденного треугольника $\delta = abc$, $a \geq b \geq c$ лежат на биссектрисе его меньшего угла на расстояниях $a/2$ и $\sqrt{ab}/2$ от вершины этого угла.

Следующее утверждение является прямым переводом предложения 1 на язык барицентрических координат.

Предложение 2. Пусть $\delta = abc$ — вырожденный треугольник, в котором $a \geq b \geq c$. Тогда геометрическая медиана его периметра, точка m_1 , имеет барицентрические координаты

$$\lambda_a = \frac{a}{4b}, \quad \lambda_b = \frac{1}{4}, \quad \lambda_c = \frac{3}{4} - \frac{a}{4b}, \tag{7}$$

а геометрическая медиана его внутренности, точка m_2 , имеет барицентрические координаты

$$\lambda_a = (2\sqrt{2})^{-1} \sqrt{a/b}, \quad \lambda_b = (2\sqrt{2})^{-1} \sqrt{b/a}, \quad \lambda_c = 1 - (2\sqrt{2})^{-1} (\sqrt{a/b} + \sqrt{b/a}). \tag{8}$$

И теперь уже можно утверждать, что теорема 1 является прямым следствием предложения 2. Действительно, пусть задан произвольный треугольник δ и пусть δ' и δ'' — соответствующие ему треугольники из теоремы 1. Тогда сравнение формул (7) и (3), а также (8) и (4) показывает, что

$$\delta' = \mathcal{A}_\delta^{-1}(\Delta') \text{ и } \delta'' = \mathcal{A}_\delta^{-1}(\Delta''), \tag{9}$$

где \mathcal{A}_δ^{-1} — аффинное отображение треугольника Δ в треугольник δ , обратное аффинному отображению \mathcal{A}_δ . В свою очередь, соотношение (6) свидетельствует о том, что

$$\mathcal{A}_\delta(m_1(\delta)) \in \Delta' \text{ и } \mathcal{A}_\delta(m_2(\delta)) \in \Delta'', \tag{10}$$

а (10) и (9) дают $m_1(\delta) \in \delta'$ и $m_2(\delta) \in \delta''$, как и записано в теореме 1.

Некоторые дополнительные подробности изложены в (Панов, 2021).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Хотя существуют эффективные численные методы нахождения геометрической медианы, но нет аналитических формул для её вычисления. Поэтому нужны хорошие универсальные оценки для местоположения геометрических медиан. Имеется два типа таких оценок. Первая — достаточно очевидна и заключается в том, что для любого подмножества пространства \mathbb{R}^n геометрическая медиана, если она существует, принадлежит выпуклой оболочке этого множества. Вторая — универсальная оценка (Mallows, 1991; Piché, 2012) — основана на вероятностных соображениях и применима к подмножествам \mathbb{R}^n . Однако обе эти оценки для треугольника, расположенного на плоскости, сильно уступают тем, что предъявлены в теореме 1.

Во многих экономических задачах также возникает вопрос о расположении геометрической медианы выпуклой области, а именно вопрос об удаленности медианы от границы этой области. В работе (Панов, 2017) получена универсальная оценка для этой задачи, и для треугольника она опять сильно уступает оценке, следующей из теоремы 1. Поэтому представляется желательным

распространить полученные результаты, по крайней мере, на произвольные выпуклые кривые и выпуклые области, расположенные на плоскости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

- Балк М.Б., Болтынский В.Г.** (1987). Геометрия масс. М.: Наука. [**Balk M.B., Boltyansky V.G.** (1987). *Geometry of masses*. М.: Nauka (in Russian).]
- Панов П.А.** (2017). Равновесные расположения центров благ по городу // *Журнал Новой экономической ассоциации*. № 1. С. 28–42. [**Panov P.A.** (2017). Nash equilibria in the facility location problem with externalities. *Journal of the New Economic Association*, 1 (33), 28–42 (in Russian).]
- Панов П.А.** (2021). О геометрических медианах треугольников. Режим доступа: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/2007/2007.14231.pdf> [**Panov P.A.** (2021). *On geometric medians of triangles*. Available at: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/2007/2007.14231.pdf> (in Russian).]
- Vajaj C.** (1988). The algebraic degree of geometric optimization problems. *Discrete and Computational Geometry*, 3 (2), 177–191.
- Behrend K.** (2014). Introduction to algebraic stacks. In: *Moduli Spaces*. L. Brambila-Paz, P. Newstead, R.P. Thomas, O. García-Prada (eds.). *London Mathematical Society Lecture Notes*, 411. Cambridge: Cambridge Univ. Press., 1–131.
- Fekete S.P., Mitchell J.S.B., Beurer K.** (2005). On the continuous Fermat-Weber problem. *Operations Research*, 53 (1), 61–76. DOI: 10.1287/opre.1040.0137. S2CID1121
- Mallows C.** (1991). Another comment on O’Cinneide. *The American Statistician*, 45, 3, 257. DOI:10.1080/00031305.1991.10475815
- Murray A.T.** (2020). Location theory. In: *International encyclopedia of human geography*. 2nd ed. A. Kobayashi (ed.). Oxford: Elsevier. DOI: 10.1016/B978-0-08-102295-5.10104-0
- Piché R.** (2012). *Random vectors and random sequences*. Saarbrücken: Lambert Academic Publishing. ISBN: 978-3659211966
- Stewart I.** (2017). Why do all triangles form a triangle? *American Mathematical Monthly*, 124, 1, 70–73. DOI: 10.4169/amer.math.monthly.124.1.70
- Yao J., Zhang X., Murray A.T.** (2019). Location optimization of urban fire stations: Access and service coverage. *Computers, Environment and Urban Systems*, 73, 184–190. DOI: 10.1016/j.compenvurbsys.2018.10.006

On the location of geometrical medians of triangles

© 2024 P.A. Panov

P.A. Panov,
HSE University, Moscow, Russia; e-mail: ppanov@hse.ru

Received 14.07.2023

Abstract. The geometrical median is a natural spatial generalization of the statistical median of a one-dimensional sample. Thus the problem of computing the median of a finite set of points (a sample) on a straight line presents no difficulties, but unexpected difficulties arise in moving to the plane or to higher dimensional spaces, where the natural linear order of points is absent. While the mean of a multidimensional sample, as on a straight line, is calculated by taking the arithmetic mean, no such analytical formula is available for the geometric median. Moreover, such formulas are absent when we deal with geometrical medians of continuous objects located on a plane or in space. This raises the natural question of analytical estimates of the locations of geometric medians. This paper presents the solutions for two such simplest problems. Namely, the solution of the problem on estimating the location of the geometric median of the perimeter of a triangle and the solution of a similar problem on the geometric median of a triangular area. For both problems, we obtain exact estimates of the affine type.

Keywords: geometrical median, barycentric coordinates, affine mappings, triangle space, degenerate triangles, median mappings, gradient system.

JEL Classification: C61, C31, C65.

UDK: 519.863.

For reference: **Panov P.A.** (2024). On the location of geometrical medians of triangles. *Economics and Mathematical Methods*, 60, 2, 139–144. DOI: 10.31857/S0424738824020117 (in Russian).