

Том **75**
Выпуск **2**



ISSN 2079-0279
2025

ТРУДЫ

**ИНСТИТУТА СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК**

<http://www.ISA.ru>

Математические модели социально-экономических процессов

Обработка и анализ изображений и сигналов

Системный анализ в медицине и биологии

Информационные технологии



Труды Института системного анализа Российской академии наук (ИСА РАН)

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

Журнал основан в 2002 году
Журнал выходит ежеквартально

Учредитель

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

Главный редактор

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

Редакционный совет

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

Редакционная коллегия

Алескеров Фуад Тагиевич, д.т.н., г. Москва, Россия
Ашимов Абдыкаппар Ашимович, д.т.н., г. Алматы, Казахстан
Белов Сергей Павлович, д.т.н., г. Белгород, Россия
Булычев Александр Викторович, к.т.н. (ответственный секретарь), г. Москва, Россия
Бурков Владимир Николаевич, д.т.н., г. Москва, Россия
Войтишек Антон Вацлавович, д. ф.-м.н.,
г. Новосибирск, Россия
Геловани Виктор Арчилович, академик РАН,
г. Москва, Россия
Ильин Александр Владимирович, чл.-корр. РАН,
г. Москва, Россия

Крутько Вячеслав Николаевич, д.т.н., г. Москва, Россия
Лексин Владимир Николаевич, д.э.н., г. Москва, Россия
Лившиц Вениамин Наумович, д.э.н., г. Москва, Россия
Магницкий Николай Александрович, д.ф.-м.н., г. Москва, Россия
Маслобоев Андрей Владимирович, д.т.н., г. Апатиты, Россия
Мижидон Арсалан Дугарович, д.т.н., г. Улан-Удэ, Россия
Орлова Елена Роальдовна, д.э.н., г. Москва, Россия
Петровский Алексей Борисович, д.т.н., г. Москва, Россия
Смирнов Александр Викторович, д.т.н., г. Санкт-Петербург, Россия
Тищенко Виктор Иванович, к.филос.н., г. Москва, Россия
Швецов Александр Николаевич, д.э.н., г. Москва, Россия

Редакция

Шибасева Л.С. (заведующая редакцией)

Адрес редакции

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

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

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор). Свидетельство о регистрации средства массовой информации ПИ № ФС77-65718 от 20 мая 2016 г.
Подписной индекс журнала – 0145787 в электронном каталоге ГК «УРАЛ-ПРЕСС» (<http://ural-press.ru/>).
Журнал включен в перечень ведущих рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК для публикации основных научных результатов диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук.

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

Содержание

Математические модели социально-экономических процессов.....	3
Стоимостная оценка машин со случайно сокращающимся сроком службы (С.А. Смоляк).....	3
Государственные инфраструктурные проекты как объект ситуационного управления (И.А. Миронова, Т.И. Тищенко, М.П. Фролова).....	13
Цифровая трансформация системы здравоохранения (Е.Р. Орлова, М.Н. Перелыгина)	22
О взаимосвязи организационных подходов стратегического анализа в контексте естественно-монопольной проблематики (Н.И. Белоусова)	28
Обработка и анализ изображений и сигналов.....	37
Определение типа сканированного документа методом динамической трансформации временных осей (Т.Р. Максимова, П.В. Безматерных)	37
Системный анализ в медицине и биологии	49
Использование методики корреляционной адаптометрии для оценки эффективности проведенного лечения (М.И. Шпитонков).....	49
Системный анализ значимости факторов, влияющих на эпидемиологическую ситуацию по туберкулезу в России (В.Н. Крутько, Т.М. Смирнова).....	56
Информационные технологии.....	66
Увеличение быстродействия операций в СУБД с помощью аппаратных ускорителей FPGA (А.В. Соловьев)	66
Разработка SVM модели для предиктивного обслуживания металлорежущего оборудования (Н.Г. Джавадов, А.М. Амиров, В.М. Исмаилов)	75

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

IN THIS ISSUE

Mathematical Models of Socio-Economic Processes.....	3
Valuation of machines with a randomly decreasing service life (<i>S.A. Smolyak</i>).....	3
State Infrastructure Projects as an Object of Situational Management (<i>I.A. Mironova, T.I. Tischenko, M.P. Frolova</i>)	13
Digital transformation of the healthcare system (<i>E.R. Orlova, M.N. Perligina</i>)	22
On interrelation of organizational approaches to strategic analysis in the context of natural monopoly issues (<i>N.I. Belousov</i>)	28
Image and Signal Processing.....	37
Classification of a scanned document type using the dynamic time warping method (<i>T.R. Maximova, P.V. Bezmaternykh</i>)	37
Systems Analysis in Medicine and Biology	49
The use of correlation adaptometry techniques to evaluate the effectiveness of the treatment (<i>M.I. Shpitonkov</i>)	49
A systems analysis of the significance of factors influencing the epidemiological situation of tuberculosis in Russia (<i>V.N. Krut'ko, T.M. Smirnova</i>).....	56
Information Technologies	66
Increasing the speed of DBMS operations using hardware FPGA accelerators (<i>A.V. Solovyev</i>)	66
Development of an SVM model for predictive maintenance of metal-cutting equipment (<i>N.G. Javadov, A.M. Amirov, V.M. Ismayilov</i>)	75

Математические модели социально-экономических процессов

Стоимостная оценка машин со случайно сокращающимся сроком службы

С.А. Смоляк

Центральный экономико-математический институт Российской академии
наук, г. Москва, Россия

Аннотация. Рассматриваются подвергающиеся пуассоновскому потоку отказов машины, операционные характеристики которых ухудшаются в процессе эксплуатации. Известна рыночная стоимость новой (вступающей в эксплуатацию) машины и назначенный ей срок службы (ресурс). При отказе машины остаточный срок ее службы скачкообразно сокращается на случайную величину, распределенную по степенному закону. Построена новая модель, связывающая динамику рыночной стоимости машины с остаточным сроком ее службы. Для практической оценки этого недостаточно, поскольку часто о машинах оценщикам известен только их возраст. Однако машины одного возраста могут находиться в разном состоянии, и здесь оценщикам приходится опираться на зависимость средней стоимости машин от возраста. Предложены формулы для построения аналогичных зависимостей, по которым проведены экспериментальные расчеты. Показано, что подобные зависимости мало меняются при изменении ставки дисконтирования и назначенного срока службы, хотя при разных коэффициентах вариации срока службы они различаются.

Ключевые слова: машины, деградация, отказ, срок службы, рыночная стоимость, групповая инфляция.

DOI: 10.14357/20790279250201 **EDN:** FTKACT

Введение

Предметом нашего рассмотрения будут машины одной марки (модели), предназначенные для выполнения определенной работы, обращающиеся на рынке, используемые по назначению и подвергающиеся деградации. В процессе работы техническое состояние машин меняется, и мы хотим выяснить, как при этом меняется остаточный срок их службы и рыночная стоимость. Чтобы решить эту задачу, необходимо каким-то способом описать возможные состояния

машины и изменения состояния машины и ее характеристик в процессе ее использования. Кроме того, вначале мы будем предполагать отсутствие инфляции.

Понятие рыночной стоимости (РС) объекта определяется и комментируется в стандартах оценки [1] и различных учебниках, например, в [2]. Существенно, что РС объекта всегда относится к определенной *дате оценки* и отражает его цену в совершаемой на эту дату (гипотетической) коммерческой сделке между независимыми, хорошо осве-

домленными и действующими расчетливо участниками рынка. На этом основании РС новых машин определяют по данным о ценах первичного рынка таких машин [2]. Однако все подержанные машины разные, и оценивать их РС приходится иначе.

Как отмечается в стандартах оценки, РС машины на определенную дату оценки отражает те выгоды, которые она принесет своему владельцу при последующем использовании. При этом под выгодами, приносимыми машиной в некотором периоде, мы понимаем стоимость выполненных ею работ за вычетом операционных затрат на выполнение этих работ¹. Важной характеристикой состояния машины является интенсивность приносимых ею выгод (ИВ, сумма выгод, приносимых в малую единицу времени). Существенно, что при отсутствии инфляции РС и ИВ машины зависят только от состояния машины, но не от той даты, на которую они оцениваются.

Назовем отношение ИВ машины к ИВ новой машины той же марки относительной интенсивностью приносимых машиной выгод (ОИВ). Отношение РС машины к РС новой машины той же марки (нового аналога) называется коэффициентом годности или относительной стоимости (КГ). Обычно РС подержанных машин оценивают, опираясь на ее возраст, умножая РС ее нового аналога на коэффициент годности (используя при этом различные таблицы или формулы, связывающие его с возрастом машины).

Срок службы машины в теории надежности определяется как момент, когда использование ее по назначению становится технически невозможным или экономически неэффективным. Соответствующие состояния машины именуются *предельными*. Машина в таком состоянии машина выбывает из эксплуатации и сразу же утилизируется как набор отдельных элементов (металлолома, не полностью изношенных деталей и узлов). РС такой машины называется *утилизационной стоимостью* машины и определяется как РС ее элементов за вычетом расходов на демонтаж и продажу. Обычно ее отношение к стоимости новой машины (относительная утилизационная стоимость, ОУС) невелико и нередко при оценке машин не учитывается. На этом основании мы будем считать, что в конце срока службы машина имеет нулевую РС, как это и принимается в системах национальных счетов.

Важными характеристиками машины, изучаемыми в теории надежности и используемыми при стоимостной оценке, являются среднее значение (T) и коэффициент вариации (v) срока ее службы. Информация о значениях этих характеристик у ма-

шин разных видов имеется в системах национальных счетов разных стран, в [3; 4; 5; 6; 7; 8], а также в ряде публикаций по надежности конкретных машин (где оценивается вероятностное распределение их отказов). В частности, для многих видов машин $v=0,25-0,5$.

Для оценки подержанных машин оказывается удобным опираться на *принцип ожидания выгод*, лежащий в основе так называемого доходного подхода к стоимостной оценке. Мы исходим из следующей формулировки этого принципа [9]:

РС машины не меньше ожидаемой суммы дисконтированных к дате оценки выгод от ее использования в последующем расчетном периоде (включая РС машины в конце этого периода), и совпадает с этой суммой при наиболее эффективном использовании машины.

Тем самым, РС машины существенно зависит от того, как в процессе эксплуатации меняется интенсивность приносимых ею выгод, а оценка РС машины предполагает оптимизацию процесса её использования.

Все известные методы оценки машин предполагают описание состояния машины какими-то ее характеристиками. Обычно оценщики характеризуют состояние машины ее возрастом или эффективным возрастом, в теории надежности используют также предложенный Кидзимой [9] показатель виртуального возраста. В [8] коэффициент годности машины связывался с ее *относительным возрастом* – отношением возраста к среднему сроку службы. В [11; 12] состояние машины характеризовалось интенсивностью приносимых машиной выгод, но полученные результаты подтверждают, что зависимости КГ машины от ее относительного возраста для машин почти не меняются при изменении среднего срока их службы.

В данной статье мы характеризуем текущее состояние машины иначе – ее *остаточным сроком службы* (ОСС) s , уменьшающимся в процессе эксплуатации. Это означает, что машины данной марки вступают в эксплуатацию с некоторым назначенным (и одновременно – максимальным) сроком службы L лет. Этот срок мы принимаем за единицу измерения времени. В таких единицах измерения ОСС s становится безразмерной величиной (отношением остаточного срока службы к максимальному), причем для новой машины ОСС=1.

В теории надежности *деградацию* машины описывают как случайное ухудшение характеристик ее надежности. Мы будем описывать ее следующим случайным процессом ухудшения состояния машины и, соответственно, уменьшения интенсивности приносимых ею выгод. Машина начинает работать в

¹ Так определенные «выгоды» во многих источниках именуются иначе, например, «чистым доходом» или «денежным потоком».

новом состоянии $s=L$ и работает, пока не произойдет скрытый отказ. При этом ОСС соответственно уменьшается. Отказы образуют простой пуассоновский поток с интенсивностью λ , так что в любом малом отрезке времени ds вероятность отказа составляет λds . После произошедшего отказа ОСС машины умножается на случайный понижающий коэффициент, распределенный на отрезке $[0, 1]$ с плотностью $\alpha x^{\alpha-1}$, где $\alpha > 1$ – параметр распределения. Легко проверить, что средний коэффициент уменьшения остаточного срока службы после отказа составляет $\alpha/(\alpha+1)$. Поэтому с ростом α влияние отказов на деградацию машины снижается, что позволяет именовать величину α параметром *ослабления деградации*.

Состояние машины определяет и относительную интенсивность приносимых ею выгод (ОИВ). Поэтому зависимость ОИВ от состояния машины – $b(s)$ – мы будем считать известной. Аналогичную зависимость ОИВ от относительного возраста (τ) в системах национальных счетов именуют «зависимостью возраст-эффективность» [13], и принимают при этом, что $b(0)=0$. В ряде стран используют линейную зависимость $b=1-\tau$ или гиперболическую зависимость $b=(1-\tau)/(1-\beta\tau)$.

Интенсивность выгод, приносимых новой машиной, обозначим ее B_0 , пока неизвестна. Позднее мы выразим ее через известную РС новой машины. При этом ИВ машины, находящейся в состоянии s , будет равна $B_0 b(s)$.

Далее мы выясним, как РС машины зависит от ее состояния.

1. Зависимость рыночной стоимости машины от ее состояния

Поскольку в нашей модели предполагается отсутствие инфляции, РС машины не зависит от даты оценки, и мы будем считать ее некоторой (неизвестной) функцией от состояния машины $V(s)$. Технические и экономические соображения показывают, что эта функция должна быть непрерывной и возрастающей, а в конце срока службы (при $s=0$) – обращаться в нуль: $V(0)=0$. Далее мы будем выяснять, как меняется РС машины в процессе ее использования. Рассмотрим машину, находящуюся в состоянии $s > 0$ на дату оценки. Если использовать ее по назначению в малом периоде времени ds , могут возникнуть две ситуации.

1. С вероятностью λds произойдет отказ. Тогда машина окажется в состоянии sx , где x – случайная величина, распределенная на отрезке $[0, 1]$ с указанной выше плотностью. Поскольку инфляция отсутствует, то РС машины в этом состоянии будет случайной величиной $V(sx)$.

2. С вероятностью $1-\lambda ds$ отказа не произойдет. Тогда машина принесет выгоды $B_0 b(s)ds$, затем ее ОСС уменьшится на ds и она перейдет в состояние $s-ds$, в котором будет иметь РС $V(s-ds)$.

Согласно теории стоимостной оценки [1, 9], РС машины на начало периода можно оценить как математическое ожидание суммы дисконтированных (по ставке ρ) приносимых ею за период выгод и РС машины в конце периода:

$$V(s) = \lambda ds \cdot \mathbf{M}[V(sx)] + (1-\lambda ds)\{B_0 b(s)dt + (1-\rho ds)V(s-ds)\} = V(s) + dt[B_0 b(s) - (\rho + \lambda)V(s) - V'(s) + \lambda G(s)],$$

где

$$G(s) = \mathbf{M}[V(sx)] = \int_0^1 V(sx)x^{\alpha-1}dx = \alpha s^{-\alpha} \int_0^s V(y)y^{\alpha-1}dy. \quad (1)$$

Отсюда следует, что при $s > 0$

$$V'(s) + (\rho + \lambda)V(s) - \lambda G(s) = B_0 b(s). \quad (2)$$

При этом ставка дисконтирования ρ в модели – доналоговая, номинальная и безрисковая. Поскольку за единицу времени мы приняли максимальный срок службы машин L , то эта ставка, назовем ее *нормированной*, – безразмерная и получается из «обычной» доналоговой номинальной безрисковой ставки умножением на L .

Докажем теперь, что $b(0)=0$. Для этого вначале заметим, что:

- $V(0)=0$, поскольку в конце срока службы машина имеет нулевую РС;
- $V'(0) \geq 0$, поскольку в процессе работы ОСС уменьшается, а РС не увеличивается;
- $G(s) \leq V(s)$, поскольку РС машины снижается с уменьшением ОСС.

Но тогда из (2) вытекает, что

$$0 = V'(s) + \rho V(s) + \lambda[V(s) - G(s)] - B_0 b(s) \geq \rho V(s) - B_0 b(s).$$

При $s \rightarrow 0$ отсюда следует, что $b(0) \geq 0$.

Остается доказать противоположное неравенство. Для этого допустим, что машину в состоянии 0, имеющую нулевую РС, используют по назначению малое время ds . Если отказа не произойдет, машина принесет выгоды $B_0 b(0)ds$ и останется в прежнем состоянии, а в случае отказа машина также останется в прежнем состоянии. Поскольку так использовать машину неэффективно, то в силу принципа ожидания выгод должно выполняться неравенство:

$$0 = V(0) \geq \lambda ds V(0) + (1-\lambda ds)\{B_0 b(0)ds + (1-\rho ds)V(0)\} = B_0 b(0)ds.$$

Отсюда вытекает, что $b(0) \leq 0$, что и требовалось доказать. Таким образом, в предельном состоянии (в конце срока службы) машина должна приносить выгоды с нулевой интенсивностью. Это позволяет использовать для оценки машин те же зависимости «возраст-эффективность», что и в системах национальных счетов.

Зависимость $V(s)$ РС машины от ее состояния является решением уравнения (2) с начальным условием $V(0)=0$. Легко видеть, что она имеет вид: $V(s)=B_0 W(s)$, где $W(s)$ – решение того же уравнения (2) при $B_0=1$, т.е.

$$W'(s) + (\rho + \lambda)W(s) - \lambda \alpha s^{-\alpha} \int_0^s W(y) y^{\alpha-1} dy = b(s). \quad (3)$$

Поскольку новая машина имеет известную стоимость K и находится в состоянии 1, то имеет место равенство: $K=V(1)=B_0 W(1)$. Отсюда находится неизвестная ИВ новой машины: $B_0=K/W(1)$. Однако эта формула нам не понадобится, поскольку для оценки подержанных машин достаточно определять их коэффициенты годности, $k(s)=V(s)/K=W(s)/W(1)$, которые не зависят от B_0 .

Решать уравнение (3) приходится численными методами, представив его в виде системы соотношений:

$$\begin{aligned} H(s) &= \alpha s^{-\alpha} \int_0^s W(y) y^{\alpha-1} dy, \\ W(s) &= \int_0^s [b(x) + \lambda H(x)] e^{(\rho+\lambda)(x-s)} dx. \end{aligned} \quad (4)$$

Эта система решалась методом итераций (в качестве первого приближения принималось $H(s)=0$). Значения значений функций W и H в узлах равномерной сетки точек находились с помощью квадратурных формул.

Далее мы будем искать среднее значение и коэффициент вариации срока службы машин.

2. Срок службы машины

Обозначим через $\tau(s)$ – случайный ОСС машины в состоянии s , а через $T(s)$ – его среднее значение: $T(s) = \mathbf{M}[\tau(s)]$. Заметим, что при $s>0$ в малом периоде времени ds после даты оценки возможны две ситуации.

Если машина не откажет, то в конце периода окажется в состоянии $s-ds$, и ее ОСС в начале периода составит $\tau(s-ds)+ds$. Тогда среднее значение этого срока будет равно $T(s-ds)+ds$. Если же машина откажет, то перейдет в состояние sx , где x распределен с плотностью $\alpha x^{\alpha-1}$ на отрезке $[0,1]$. При этом средний ОСС машины после отказа

составит $\int_0^1 T(sx) \alpha x^{\alpha-1} dx$.

Учитывая вероятности обеих ситуаций, имеем:

$$\begin{aligned} T(s) &= \mathbf{M}[\tau(s)] = (1-\lambda ds) \mathbf{M}[ds + \tau(s-ds)] + \lambda ds \cdot \int_0^1 T(sx) \alpha x^{\alpha-1} dx = \\ &= (1-\lambda ds) [T(s-ds) + ds] + \lambda ds \cdot \alpha s^{-\alpha} \int_0^s T(y) y^{\alpha-1} dy = \\ &= (1-\lambda ds) [T(s) - T'(s) ds + ds] + \lambda ds \cdot \alpha s^{-\alpha} \int_0^s T(y) y^{\alpha-1} dy. \end{aligned}$$

Отсюда вытекает уравнение для функции $T(s)$:

$$T'(s) + \lambda T(s) - \lambda \alpha s^{-\alpha} \int_0^s T(y) y^{\alpha-1} dy = 1. \quad (5)$$

Поскольку $\tau(0)=0$, то краевым условием здесь будет $T(0)=0$.

Средний (полный) срок службы машин равен среднему ОСС новой (находящейся в состоянии $s=1$) машины $T(1)$.

Уравнение для среднего квадрата ОСС $R(s) = \mathbf{M}[\tau^2(s)]$ выводится тем же способом. При $s>0$ в малом отрезке времени ds после даты оценки возможны две ситуации. Если машина не откажет, то перейдет в состояние $s-ds$, и ее ОСС на дату оценки станет равным $\tau(s-ds)+ds$. Если же машина откажет, то ее ОСС станет равным $\tau(sx)$, а средний

квадрат ОСС составит $\int_0^1 R(sx) x^{\alpha-1} dx$. Учитывая вероятности обеих ситуаций, имеем:

$$\begin{aligned} R(s) &= \mathbf{M}[\tau^2(s)] = (1-\lambda ds) \mathbf{M}[(ds + \tau(s-ds))^2] + \lambda ds \cdot \int_0^1 R(sx) x^{\alpha-1} dx = \\ &= (1-\lambda ds) [R(s-ds) + 2T(s) ds] + \lambda ds \cdot \alpha s^{-\alpha} \int_0^s R(y) y^{\alpha-1} dy = \\ &= (1-\lambda ds) [R(s) - R'(s) ds + 2T(s) ds] + \lambda ds \cdot \alpha s^{-\alpha} \int_0^s R(y) y^{\alpha-1} dy. \end{aligned}$$

Отсюда получаем уравнение, отличающееся от (5) только правой частью:

$$R'(s) + \lambda R(s) - \lambda \alpha s^{-\alpha} \int_0^s R(y) y^{\alpha-1} dy = 2T(s). \quad (6)$$

Поскольку $\tau(0)=0$, то начальным условием для этого уравнения будет $R(0)=0$.

Если решить уравнения (5) и (6), то необходимые нам среднее значение T и коэффициент вариации v (полного) срока службы машины теперь можно найти, применив полученный результат к новой машине, у которой $s=1$. Имеем:

$$T = T(1); \quad v = \sqrt{R(1)/T^2(1) - 1}. \quad (7)$$

Уравнения (5) и (6) являются частными случаями (при $a(s)=1$ и $a(s)=2T(s)$ соответственно) следующего уравнения:

$$f'(s) + \lambda f(s) - \lambda \alpha s^{-\alpha} \int_0^s f(y) y^{\alpha-1} dy = a(s); \quad f(0) = 0. \quad (8)$$

Его можно преобразовать так:

$$\begin{aligned} e^{\lambda s} s^\alpha a(s) &= e^{\lambda s} s^\alpha f'(s) + \lambda e^{\lambda s} \left[s^\alpha f(s) - \int_0^s f(y) \alpha y^{\alpha-1} dy \right] = \\ &= e^{\lambda s} s^\alpha f'(s) + \lambda e^{\lambda s} \left[s^\alpha f(s) - \int_0^s f(y) dy^\alpha \right] = \\ &= e^{\lambda s} s^\alpha f'(s) + \lambda e^{\lambda s} \int_0^s y^\alpha f'(y) dy = \frac{d}{ds} \left[e^{\lambda s} \int_0^s y^\alpha f'(y) dy \right]. \end{aligned}$$

Отсюда последовательно вытекают следующие формулы:

$$\begin{aligned} \int_0^s y^\alpha f'(y) dy &= \int_0^s e^{\lambda(x-s)} x^\alpha a(x) dx; \\ s^\alpha f'(s) &= s^\alpha a(s) - \lambda \int_0^s e^{\lambda(x-s)} x^\alpha a(x) dx; \\ f'(s) &= a(s) - \lambda s^{-\alpha} \int_0^s e^{\lambda(x-s)} x^\alpha a(x) dx. \end{aligned}$$

Последняя формула позволяет выразить решение уравнения (8) через интегралы. Однако для вычислений оказалось удобнее представить ее в виде системы уравнений:

$$g(s) = \lambda s^{-\alpha} \int_0^s e^{\lambda(x-s)} x^\alpha a(x) dx; \quad f(s) = \int_0^s [a(x) - g(x)] dx.$$

Если задать значения функции a на равномерной сетке точек – величины $a_j = a(jh)$, то соответствующие значения $f_j = f(jh)$ и $g_j = g(jh)$ можно найти по приближенным квадратурным формулам.

Далее, при проведении численных расчетов, мы будем учитывать следующие важные обстоятельства.

Величину L мы определили ранее как остаточный срок службы новой машины и приняли за единицу времени. Но в процессе работы ОСС все время уменьшается. Поэтому случайный полный срок службы машины никогда не превосходит L , так что L является *максимальным* полным сроком службы машин данной марки. Обычно такой срок не превышает 40 лет.

Отношение среднего полного срока службы машин к максимальному сроку их службы в нашей модели выражается безразмерной величиной $T=T(1)$. В системах национальных счетов разных стран максимальные сроки службы машин обычно в 1,5-2 раза превышают средние, поэтому здесь $T(1)=0,50-0,67$. На практике встречаются машины, срок службы которых втрое превышает средний, а для некоторых машин недопустимыми считаются сроки службы, превышающие назначенный срок более, чем на четверть. Поэтому мы считаем правдоподобным, что $T(1)=0,3-0,8$. О коэффициентах

вариации сроков службы (v) имеется недостаточно полная информация. В системах национальных счетов они обычно составляют 0,25-0,35, аналогичные результаты вытекают из работ [5] и др., однако результаты ускоренных испытаний некоторых машин на долговечность и анализ возрастов выбывающих машин отдельных видов показывают, что они могут достигать и 0,7 [3; 4; 7]. Поэтому мы считаем правдоподобными значения $v=0,25-0,65$.

Приводимые далее примеры расчетов будут относиться к таким сочетаниям параметров α и λ , которым отвечают правдоподобные значения $T(1)$ и v . Отметим, что малым значениям λ отвечают машины, которые безотказно работают почти весь назначенный срок службы. Очевидно, что у таких машин средний срок службы близок к максимальному, а коэффициент вариации срока службы – небольшой.

3. Зависимость рыночной стоимости от возраста

Для оценки подержанных машин оценщики часто используют зависимости коэффициента годности (КГ) от возраста. Но в нашей модели машины одного возраста могут находиться в разных состояниях, и, значит, иметь разную стоимость. Поэтому мы будем искать зависимость $K(t)$ *средней* РС машин от их возраста (t). Прямо получить какие-то формулы для нее не удастся, и приходится решать более общую задачу: искать зависимость $K(z, t)$ средней РС машин, которые дожили до даты оценки и за время t до этой даты находились в состоянии $t+z$. Обратим внимание, что функция $K(z, t)$ определена только в треугольнике $0 \leq z \leq 1, 0 \leq t \leq 1-z$.

Поскольку машина в возрасте t на дату оценки, за время t до этого была новой (находилась в состоянии 1), то ее средняя стоимость в наших обозначениях должна равняться $K(1-t, t)$, так что нужная нам зависимость определяется формулой: $K(t)=K(1-t, t)$.

Обозначим теперь через $\Gamma_{z,t}$ группу машин, которые за время t до даты оценки находились в состоянии $t+z$ и дожили до даты оценки. При $x=0$ у всех машин этой группы на дату оценки ОСС будет равен нулю, так что $K(0, t)=0$. Учтем также, что машины в состоянии z на дату оценки относятся к группе $\Gamma_{z,0}$ и имеют РС= $W(z)$. Поэтому $K(z, 0)=W(z)$. В частности, у новой машины $K(1, 0)=W(1)$. В таком случае средний коэффициент годности машин возраста t определится формулой:

$$\text{СКГ}(t)=K(1-t, t)/W(1). \quad (9)$$

Прежде, чем искать неизвестную функцию $K(z, t)$, отметим следующее обстоятельство.

Рассмотрим машины, отказавшие в состоянии $t+z$. После отказа каждая из них перейдет в случайное состояние y , распределенное на отрезке $[0, t+z]$ с плотностью $\alpha(t+z)^{-\alpha} y^{\alpha-1}$. При этом с вероятностью $\left[t/(t+z)\right]^\alpha$ они могут оказаться в состояниях $y < t$. Однако машины группы $\Gamma_{z,t}$, отказавшие в состоянии $t+z$, доживают до даты оценки, и их остаточный срок службы не меньше t , так что для них подобная ситуация невозможна. Поэтому после отказа они переходят в случайное состояние y , распределенное на отрезке $[t, t+z]$ с плотностью

$$\frac{\alpha(t+z)^{-\alpha} y^{\alpha-1}}{1 - \left[t/(t+z)\right]^\alpha} = \frac{\alpha y^{\alpha-1}}{(t+z)^\alpha - t^\alpha}.$$

Напомним, что $K(z, t)$ отражает среднюю стоимость машин группы $\Gamma_{z,t}$ в момент, когда они доживут до даты оценки. Рассмотрим машину группы $\Gamma_{z,t}$.

Если за малое время dt она не откажет (вероятность этого — $1 - \lambda dt$), то перейдет в состояние $t+z-dt$ за время $t-dt$ до даты оценки, т.е. в группу $\Gamma_{z,t-dt}$. У таких машин, доживших до даты оценки, средняя стоимость составит $K(z, t-dt)$.

Если же в этом периоде произойдет отказ, то, как показано выше, они перейдут в случайное состояние y , распределенное на отрезке $[t, t+z]$ с плотностью $\alpha y^{\alpha-1} / [(t+z)^\alpha - t^\alpha]$, и через время t (т.е. на дату оценки) их средняя РС составит $K(y-t, t)$.

Учитывая вероятности соответствующих событий, имеем:

$$\begin{aligned} K(z, t) &= (1 - \lambda dt) K(z, t-dt) + \lambda dt \int_t^{t+z} K(y-t, t) \frac{\alpha y^{\alpha-1}}{(t+z)^\alpha - t^\alpha} dy = \\ &= K(z, t) - \left\{ K'_t(z, t) + \lambda K(z, t) - \frac{\lambda}{(t+z)^\alpha - t^\alpha} \int_0^z K(x, t) \alpha(x+t)^{\alpha-1} dx \right\} dt. \end{aligned}$$

Поэтому

$$K'_t(z, t) + \lambda K(z, t) = \frac{\lambda}{(t+z)^\alpha - t^\alpha} \int_t^{t+z} K(y, t) \alpha y^{\alpha-1} dy.$$

Учитывая, что $K(z, 0) = W(z)$, для численных расчетов это уравнение можно представить в виде системы соотношений:

$$\begin{aligned} K'_t(z, t) + \lambda K(z, t) &= \lambda J(z, t); \quad K(z, 0) = W(z); \\ J(z, t) &= H(z, t) / [(t+z)^\alpha - t^\alpha]; \quad H(z, t) = \int_0^z K(x, t) \alpha(x+t)^{\alpha-1} dx. \end{aligned} \quad (10)$$

Систему (10) мы решали численными методами, находя значения функций K , J и H в узлах равномерной сетки. Интегралы вычислялись по рекуррентным квадратурным формулам.

4. Смягчение принятых допущений

При построении модели принималось, что утилизационная стоимость машин U — нулевая, а инфляция отсутствует. Следуя [11], покажем, как можно избавиться от этих предположений.

1. Пусть у нашей машины **утилизационная стоимость** $U \neq 0$, а $u = U/K$ — ее относительная утилизационная стоимость. Возьмем условную машину, ведущую себя так же, как и в нашей модели, но имеющую скорректированную интенсивность выгод $B_c(s) = B(s) - rU$. Рассчитаем по модели все характеристики этой машины, добавив в их обозначения нижний индекс c . Нетрудно убедиться, что стоимости нашей и условной машин, находящихся в одном и том же состоянии, отличаются на U , а коэффициенты годности — на u . Отсюда легко выводится связь между коэффициентами годности нашей и условной машины:

$$k(s) = (1-u)k_c(s) + u; \quad \text{СКГ}(t) = (1-u)\text{СКГ}_c(t) + u.$$

Таким образом, построенная модель применима и для оценки машин с ненулевой утилизационной стоимостью.

2. В общем случае учесть влияние **инфляции** затруднительно. Однако посмотрим, как ее учитывают оценщики машин и оборудования. Анализируя динамику цен первичного рынка, они обычно могут установить сложившийся темп роста цен *новых* машин определенной марки (или более широкой группы аналогичных машин) и спрогнозировать его на ближайшую перспективу. Для подержанных машин такой прием не годится, поскольку все подержанные машины — разные. Здесь может помочь то обстоятельство, что, покупая подержанную машину, покупатель обычно смотрит, не окажется ли более выгодной покупка новой машины той же марки. С этим вынуждены считаться и продавцы подержанных машин. На этом основании оценщики принимают, что цены вторичного рынка растут синхронно с ценами первичного. Грубо говоря, если некая подержанная машина М1 стоила в два раза меньше новой, то и, например, через месяц, другая машина М2, которая будет находиться в том же техническом состоянии, что и машина М1, будет стоить в два раза меньше, чем новая. По существу, это отвечает такому характеру инфляции, при котором РС новых машин меняются с определенным темпом i , а зависимости коэффициентов годности от состояния машин не меняются. Такую инфляцию мы называем **групповой** [9; 11]. Темп роста РС новых машин i при этом можно назвать темпом групповой инфляции.

Подтвердить групповой характер инфляции может следующий факт. В США для оценки машин и оборудования в ряде штатов США исполь-

зуют публикуемые властями таблицы процентов годности, например [14: 15]. Подобные таблицы ежегодно пересматриваются, однако сами значения процентов годности для каждого вида машин изменяются незначительно.

Если принять допущение, что инфляция имеет групповой характер с некоторым (прогнозируемым на ближайшую перспективу) темпом i , то у машин в любом состоянии t рыночная стоимость $V(t)$ будет меняться с тем же темпом. Тогда с тем же темпом будет меняться и производная $V'(t)$. Но в таком случае, как видно из формулы (2), с тем же темпом будет меняться и ИВ новой машины B_0 . Все остальные соотношения модели остаются без изменения, с той лишь разницей, что в формулах (1)-(3) номинальная ставка дисконтирования r заменится на $r-i$. Такая, скорректированная (с учетом групповой инфляции) ставка близка по содержанию и величине к *реальной* безрисковой ставке дисконтирования, но отличается тем, что из номинальной ставки вычитается темп роста цен новых машин конкретной марки, а не темп общей инфляции в стране. Обычно значения скорректированной ставки не превышают 10% годовых, так что даже при максимальном сроке службы машин 40 лет значения $r-i$ будут не больше, чем $0,1 \times 40 = 4$. Мы учитываем это в приводимых далее примерах расчетов.

5. Экспериментальные расчеты

Основные расчеты проводились при нормированной ставке дисконтирования $r=1,8$. Вначале с помощью формул (7) были построены зависимости среднего значения T и коэффициента вариации v срока службы машины от интенсивности отказов λ и параметра ослабления деградации α (рис. 1-2). Как видим, не все сочетания λ и α отвечают правдоподобным значениям T и v .

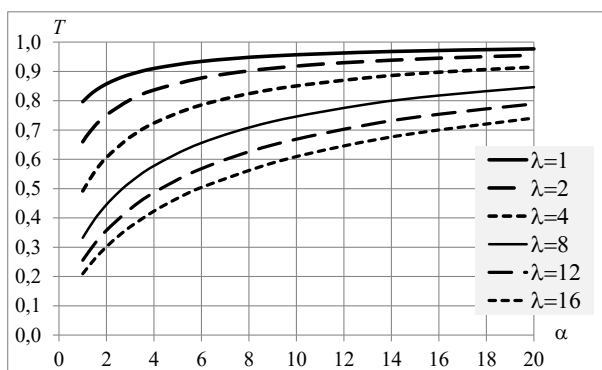


Рис. 1. Зависимости среднего срока службы машин от параметра ослабления деградации при разной интенсивности отказов

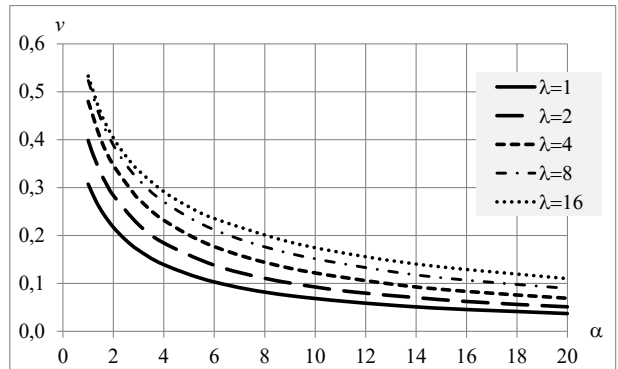


Рис. 2. Зависимости коэффициента вариации срока службы машин от параметра ослабления деградации при разной интенсивности отказов

Как уже отмечалось, для оценки поддержанных машин обычно используют коэффициенты годности (отношения РС машины к РС аналогичной новой машины). Для построения зависимости этих коэффициентов от состояния машины (отношения остаточного срока службы к максимальному) мы решали уравнение (2) и применяли формулу $k(s) = W(s)/W(1)$.

На рис. 3 приведены такие зависимости для коэффициента вариации срока службы $v=0,45$ и ряда соответствующих сочетаний параметров модели λ и α .

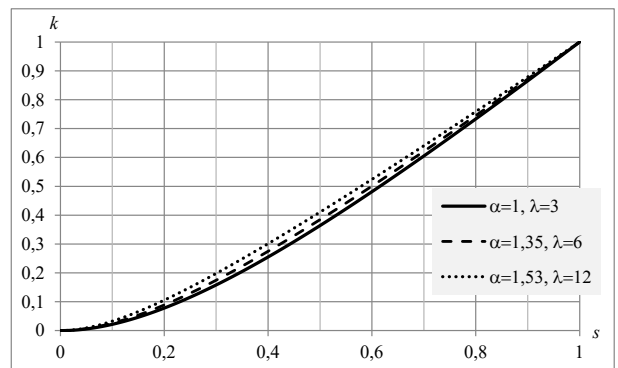


Рис. 3. Зависимости коэффициента годности машины от ее состояния при $v=0,45$ и ряда соответствующих сочетаний λ и α

Полученные зависимости достаточно близки, хотя соответствующие средние сроки службы сильно отличаются. Аналогичная ситуация наблюдается и при других значениях v .

Обычно оценщики поддержанных машин связывают коэффициенты годности с возрастом. Решение системы (10) и формула (9) позволяют построить аналогичную зависимость *средних* коэффициентов годности от возраста. Пример показан на рис. 4. В нем принята линейная зависимость интенсивности выгод от OCC ($b(s)=s$) и $v=0,45$.

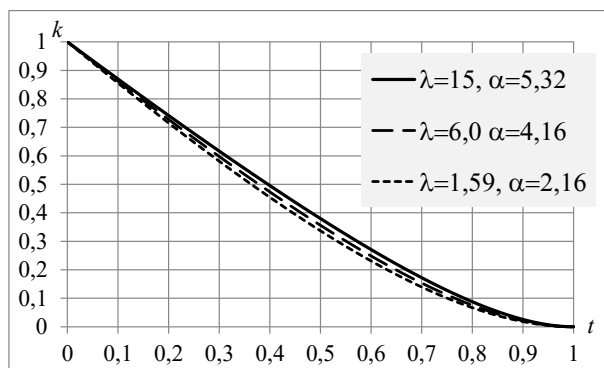


Рис. 4. Зависимости среднего коэффициента годности машины от возраста при $v=0,35$ и разных сочетаниях λ и α

И в этом случае полученные зависимости оказались близкими, несмотря на большие различия средних сроков службы. Подобная ситуация имеет место и при других значениях коэффициента вариации срока службы.

Напомним, что в нашей модели за единицу времени принят максимальный срок службы, поэтому «модельный» возраст t на рис. 4 отражает отношение хронологического возраста к *максимальному*. Между тем, как уже говорилось, для оценки подержанных машин часто используются зависимости средних коэффициентов годности от относительного возраста τ (отношения хронологического возраста к *среднему*), которые мало зависят от среднего срока службы (T), но сильно меняются при изменении коэффициента вариации срока службы v . Однако проведенные расчеты не подтвердили такого явления в нашей модели. В то же время, если зафиксировать v , то при разных соответствующих комбинациях λ и α зависимости СКГ(τ) оказываются очень близкими. Для разных T они приведены на рис. 5.

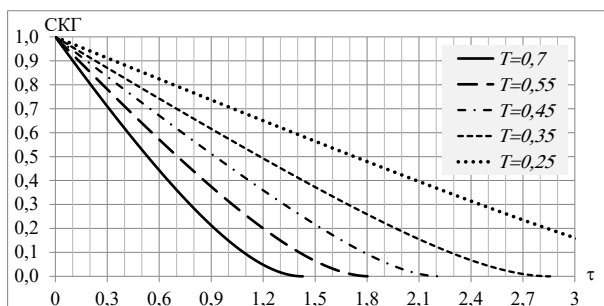


Рис. 5. Зависимости среднего коэффициента годности машины от относительного возраста при разных средних сроках службы (T)

Как уже говорилось, основные расчеты проводились применительно к нормированной ставке дисконтирования (произведения «обычной ставки» на максимальный срок службы) $\rho=1,8$. Вли-

яние изменения этой ставки на средние коэффициенты годности при $\alpha=1$ и некоторых значениях среднего срока службы T показано на рис. 6. Мы видим, что существенное изменение ставки мало влияет на значения СКГ.

Выше говорилось, что в системе национальных счетов используются различные зависимости интенсивности приносимых машиной выгод от возраста. В частности, в России и используется гиперболическая зависимость. Если выразить ее через относительный остаточный срок службы, она примет вид: $b(s)=2s/(1+s)$. При такой зависимости полученные результаты качественно не изменяются, но коэффициенты годности значимо увеличиваются. На рис. 7 сопоставляются результаты расчетов СКГ по линейной и гиперболической зависимостям, проведенных для некоторых значений среднего срока службы.

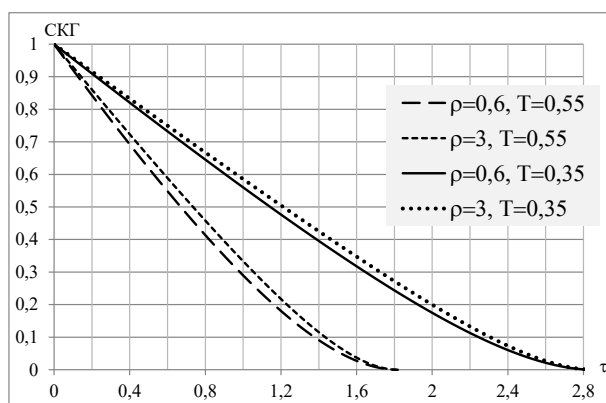


Рис. 6. Зависимости среднего коэффициента годности машины от относительного возраста при $\alpha=1$ и разных сочетаниях среднего срока службы и ставки дисконтирования

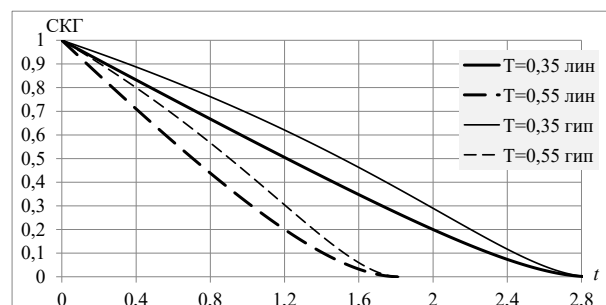


Рис. 7. Зависимости среднего коэффициента годности машины от относительного возраста для разных средних сроков службы (T) при линейной и гиперболической динамике интенсивности выгод

Заключение

Предложена и исследована новая модель случайного процесса деградации машин. В этом про-

цессе состояние машины характеризуется ее остаточным сроком службы (ресурсом), скачкообразно уменьшающимся при случайном отказе. Установлена зависимость среднего значения и коэффициента вариации срока службы машины, а также ее рыночной стоимости от ее состояния. При практической оценке подержанных машин оценщики чаще всего учитывают их возраст. Однако машины одного возраста могут находиться в разных состояниях и иметь разную стоимость, и оценщикам приходится ориентироваться на среднюю стоимость таких машин. В связи с этим построены зависимости средней рыночной стоимости машин от возраста. Представляется, что полученные результаты могут быть использованы не только для стоимостной оценки машин, но и для развития модельного аппарата теории надежности.

Литература

1. International Valuation Standards (IVS): Effective 31 January 2022. International Valuation Standards Council.
2. Федотова М.А. (ред.). Оценка машин и оборудования : учебник (изд. 2-е). М.: ИНФРА-М. 2018.
3. Erumban A.A. (2008). Lifetimes of machinery and equipment: Evidence from Dutch manufacturing. // Review of income and wealth. Series 54, Number 2.
4. Nomura K., Suga Y. Measurement of depreciation rates using microdata from disposal survey of Japan. In: The 35th IARIW General Conference, Copenhagen, Denmark. 2018, July.
5. Schmalwasser O., Schidlowski M. Kapitalstockrechnung in Deutschland // Wirtschaft und Statistik. 2006, No.11. 1107-1123.
6. РД 26-01-143-83. Надежность изделий химического машиностроения. Оценка надежности и эффективности при проектировании.
7. Острейковский В.А. Теория надежности: учебник для вузов. М.: Высшая школа. 2003.
8. Лейфер Л.А. (ред.). Справочник оценщика машин и оборудования. Корректирующие коэффициенты и характеристики рынка машин и оборудования. Изд. 3-е. Нижний Новгород: Приволжский центр методического и информационного обеспечения оценки. 2023.
9. Смоляк С.А. Оптимизация использования и стоимостная оценка машин. М.: ЦЭМИ РАН, 2023. 149 с. DOI: 10.33276/978-5-8211-0810-4
10. Kijima M. Some results for repairable systems with general repair. *Journal of Applied Probability*, 1989. Vol. 26. Pp. 89-102.
11. Смоляк С.А. Пуассоновский процесс деградации машин: применение к стоимостной оценке // Журнал Новой экономической ассоциации. 2020. № 4(48). с. 63-84. DOI: 10.31737/2221-2264-2020-48-4-3
12. Смоляк С.А. Стоимостная оценка машин, подвергающихся винеровскому процессу деградации // Экономика и математические методы. 2021. Т. 57. № 3. С. 97-109. DOI: 10.31857/S042473880016422-3.
13. СНС 2008. Система национальных счетов 2008. Европейская комиссия, Международный валютный фонд, Организация экономического сотрудничества и развития, ООН, Всемирный банк. Нью-Йорк. 2012.
14. 2022 Cost Index and Depreciation Schedules. North Carolina Department of Revenue
15. 2022 Business Personal Property Manual. Arizona Department of Revenue.

Смоляк Сергей Абрамович. Центральный экономико-математический институт Российской академии наук, г. Москва, Россия. Главный научный сотрудник, доктор экономических наук. Область научных интересов: математическое моделирование экономических процессов. E-mail: smolyak1@yandex.ru.

Valuation of machines with a randomly decreasing service life

S.A. Smolyak

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

Abstract. We consider machines that are subject to a Poisson failure stream and whose operational characteristics deteriorate during operation. The market value of the new machine and its assigned service life are known. In case of machine failure, its remaining service life is abruptly shortened by a random value distributed according to a power law. A new model has been built that links the dynamics of the market value of the machine with its remaining service life. This is not enough for a practical valuation, since appraisers often only know their age about cars. However, the machines of the same age may be in different condition, and here appraisers have to rely on the dependence of the average cost of machines on age. We have obtained formulas for constructing similar dependencies, according to which experimental calculations have been carried out. It is shown that such dependencies change little when the discount rate and the assigned service life change, although they differ with different coefficients of service life variation.

Keywords: *machinery, degradation, failure, service life, market value, group-specific inflation.*

DOI: 10.14357/20790279250201 **EDN:** FTKACT

References

1. International Valuation Standards (IVS): Effective 31 January 2022. International Valuation Standards Council.
2. *Fedotova M.A.* (ed.). *Otsenka mashin i oborudovaniya* [Machinery and Equipment Valuation : The textbook. 2nd ed. Moscow, INFRA-M. 2018]. (in Russian)
3. *Erumban A.A.* (2008). Lifetimes of machinery and equipment: Evidence from Dutch manufacturing. // Review of income and wealth. Series 54, Number 2.
4. *Nomura K., Suga Y.* Measurement of depreciation rates using microdata from disposal survey of Japan. In: The 35th IARIW General Conference, Copenhagen, Denmark. 2018, July.
5. *Schmalwasser O., Schidlowski M.* Kapitalstockrechnung in Deutschland // Wirtschaft und Statistik. 2006, No.11. 1107-1123.
6. The regulating Document 26-01-143-83. Nadyozhnost' izdeliy khimicheskogo mashinostroyeniya [Reliability of products of chemical mechanical engineering. An assessment of reliability and efficiency at design]. (in Russian)
7. *Ostreykovsky V.A.* Teoriya nadezhnosti [Reliability theory: Textbook for universities. Moscow: Vysshaya shkola. 2003]. (in Russian).
8. *Leyfer L.A.* (ed.). Spravochnik otsenshchika mashin i oborudovaniya [Reference book of the appraiser of machinery and equipment. Corrective factors and characteristics of the market of machinery and equipment. 3rd ed. Nizhny Novgorod: Volga Center for Methodological and Informational Support of Assessment. 2023]. (in Russian).
9. *Smolyak S.A.* Optimizatsiya ispolzovaniya i stoimostnaya otsenka mashin [Optimization of the use of machinery and Equipment and their Valuation. Moscow, CEMI RAS, 2023]. (in Russian) DOI: 10.33276/978-5-8211-0810-4
10. *Kijima M.* Some results for repairable systems with general repair. Journal of Applied Probability, 1989. Vol. 26. Pp. 89-102.
11. *Smolyak S.A.* Puassonovsky process degradatsii mashin: Primeneniye k stoimostnoy otsenke [The Poisson Process of machinery Degradation: Application to Valuation // Journal of the New Economic Association, 2020, Vol. 48 (4), pp. 63-84]. (in Russian). DOI: 10.31737/2221-2264-2020-48-4-3
12. *Smolyak S.A.* Stoimostnaya otsenka mashin, podverga shchikhsya vinerovskomu processu degradatsii [Valuation of Machinery and Equipment subject to the Wiener Degradation Process // Economics and Mathematical Methods, 2021, Vol. 57 (3), pp. 97-109]. (in Russian). DOI: 10.31857/S042473880016422-3.
13. System of National Accounts 2008 – SNA 2008. European Commission, International Monetary Fund, OECD, United Nations, World Bank. New York, 2009.
14. 2022 Cost Index and Depreciation Schedules. North Carolina Department of Revenue
15. 2022 Business Personal Property Manual. Arizona Department of Revenue.

Sergey A. Smolyak. Doctor of Economic Sciences. Central Economics and Mathematics Institute of Russian Academy of Sciences, 47, Nakhomovsky Prospect, Moscow, Russia. Research interests: mathematical modeling of economic processes. E-mail: smolyak1@yandex.ru

Государственные инфраструктурные проекты как объект ситуационного управления

И.А. Миронова, Т.И. Тищенко, М.П. Фролова

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

Аннотация. В статье исследованы проблемы, связанные с расчетом общественной эффективности проектов развития транспортной инфраструктуры в современных геополитических и экономических условиях развития страны. Предлагается новый подход к отбору инфраструктурных проектов для государственного финансирования, который характеризуется как элемент ситуационного управления отраслью.

Ключевые слова: государственный инвестиционный проект, транспортная инфраструктура, общественная эффективность, критерий эффективности, ситуационное управление.

DOI: 10.14357/20790279250202 **EDN:** GNFFKN

У меня есть сотни высокопрофессиональных советников, они могут построить все, что угодно, хоть египетскую пирамиду. Но у меня нет никого, кто мне бы толком объяснил, надо ее строить или нет.

Дж.Ф. Кеннеди

Введение

В 2024 году завершилась реализация национальных проектов «Безопасные и качественные автомобильные дороги» и «Комплексный план модернизации инфраструктуры». В настоящее время разрабатываются в органах власти и готовятся к реализации, начиная с 2025 года, два новых национальных проекта, имеющих отношение к транспортной инфраструктуре: «Инфраструктура для жизни» и «Эффективная транспортная система» [1, 2].

Национальный проект «Инфраструктура для жизни» включает, среди прочих, шесть федеральных проектов развития транспорта:

- «Развитие федеральной сети (самый крупный федеральный проект);»
- «Региональная и местная дорожная сеть»;
- «Общесистемные меры развития дорожного хозяйства»;
- «Безопасность дорожного движения»;
- «Развитие общественного транспорта»;
- «Развитие железнодорожной инфраструктуры Центрального транспортного узла».

В рамках национального проекта «Эффективная транспортная система» предполагается реализовать девять федеральных проектов:

- «Развитие высокоскоростных железнодорожных магистралей»;
- «Развитие Большого Северного морского пути»;
- «Развитие опорной сети железных дорог»;
- «Развитие опорной сети морских портов»;
- «Развитие опорной сети внутренних водных путей»;
- «Развитие опорной сети аэродромов»;
- «Развитие пунктов пропуска через Государственную границу Российской Федерации»;
- «Цифровая трансформация транспортной отрасли»;
- «Развитие кадрового потенциала транспортной отрасли».

Объем финансирования национальных проектов «Эффективная транспортная система» и «Инфраструктура для жизни» (в сфере транспорта) в 2025-2030 годах предварительно оценивается в 14 трлн рублей. В рамках нацпроекта «Эффективная транспортная система» предполагается потратить 7,2 трлн рублей, из которых только 0,6 трлн рублей будут привлечены из федерального бюджета, остальное - из внебюджетных источников. Финансовое обеспечение транспортной части нацпроекта «Инфраструктура для жизни» предварительно составит 6,8 трлн рублей, из которых порядка 5 трлн

рублей будут выделены из федерального бюджета [1]. Таким образом, из общего объема планируемых расходов на государственное финансирование приходится 40% (5,6 трлн руб.).

В конце 2024 года сообщалось, что Министерство транспорта РФ завершило работу над национальным проектом «Эффективная транспортная система», на реализацию которого до 2030 года будет суммарно предусмотрено около 1 трлн рублей, в том числе в проекте федерального бюджета на 2025–2027 годы зарезервировано на эти цели более 500 млрд рублей [2].

Для сравнения: в 2019–2024 годах на развитие транспортной инфраструктуры планировалось 11,1 трлн руб., из которых 7,6 трлн руб. (69%) – из бюджета [3].

С учетом увеличения стоимости строительства и эксплуатации инфраструктурных объектов на фоне растущей инфляции в предварительном варианте новых национальных проектов развития транспортной инфраструктуры наблюдается существенное снижение бюджетного финансирования.

В настоящее время идет подробная разработка перечисленных федеральных проектов, которая по логике вещей должна закончиться перечнем конкретных эффективных с общественной точки зрения инвестиционных проектов.

Проблема оценки эффективности проектов с государственным участием, или государственных инвестиционных проектов¹, имеет две стороны. Первая – это формирование собственно набора инвестиционных проектов, в рамках национальных, федеральных проектов или программ развития, решающих актуальные государственные задачи. Вторая – это проблема ранжирования совокупности сформированных проектов с точки зрения целесообразности и эффективности государственного финансирования в той или иной форме (прямое финансирование, льготное кредитование, предоставление государственной гарантии и т.д.).

«Неторопливость» и «основательность» процедуры формирования и отбора проектов развития транспортной инфраструктуры вызывает недоумение и не соответствует требованиям текущего момента, которые связаны с изменившимися гео-

политическими и экономическими условиями развития страны. С точки зрения влияния на транспортную инфраструктуру определяющую роль в ближайшем будущем будут играть санкции со стороны недружественных стран, высокие темпы инфляции, изменения географии товаропотоков, дефицит трудовых ресурсов, высокая стоимость инвестиций, постоянно растущая потребность разных сфер материального производства в бюджетном финансировании и дефицит бюджетных ресурсов. Проведение эффективной государственной экономической политики, выделение комплекса первоочередных задач и хозяйственных мероприятий и их приоритетное финансирование – это уже не просто требование законов экономики, а способ предотвращения серьезных последствий влияния новых внешнеэкономических и геополитических условий на экономику страны.

На текущем этапе важна тактическая составляющая в виде совокупности постоянно генерируемых, финансируемых и реализуемых проектов, решающих актуальные краткосрочные и среднесрочные задачи. Это означает переход к ситуационному управлению государственным инвестированием в инфраструктуру в условиях неустойчивости и стохастичности экономических процессов в стране и мире.

Ситуационное управление – понятие широкое и применимое как к техническим системам, так и социально-экономическим. Согласно экономическим словарям, данным термином обозначается оперативное управление, осуществляемое в дополнение к стратегическому, перспективному и заключающееся в принятии управленческих решений по мере возникновения проблем в соответствии со складывающейся ситуацией².

Как следует из приведенного определения, ситуационное управление – это не альтернатива, а дополнение к стратегическому управлению и планированию с целью нивелировать существенные для текущего момента риски «размытия» и без того относительно небольшие выделяемые государственные средства по крупномасштабным, плохо проработанным инвестиционным проектам с отдаленными через десятилетия (причем только в случае, если прогнозы в потребностях соответствующих транспортных услуг окажутся верными). В качестве таких проектов имеются в виду, например, проект развития Северного морского пути, проекты развития международных транспортных коридоров

¹ Государственный инвестиционный проект - инвестиционный проект, капитальные вложения в который осуществляются полностью или частично за счет средств федерального бюджета, бюджетов субъектов Российской Федерации, бюджетов государственных внебюджетных фондов Российской Федерации. (Стандарт внешнего государственного аудита (контроля) СГА 304 «Аудит государственных и международных инвестиционных проектов» (утвержден постановлением Коллегии Счетной палаты Российской Федерации, от 23.12.2016 г. N 8ПК).

² Райзберг Б.А., Лозовский Л.Ш., Стародубцева Е.Б. Современный экономический словарь. 2-е изд., испр. М.: ИНФРА-М., 1999. 479 с.; Кураков Л.П., Кураков В.Л., Кураков А.Л. Экономика и право: словарь-справочник. М.: Вуз и школа, 2004; Борисов А.Б. Большой экономический словарь. М.: Книжный мир, 2003. 895 с.

на территории Российской Федерации и некоторых дружественных стран, проекты создания высокоскоростных магистралей, потребность в которых требует серьезного научного обоснования. А между тем, по предварительным данным, самым крупным по объемам бюджетного финансирования федеральным проектом в 2025-2026 годах будет «Развитие Большого Северного морского пути», в который из бюджета направят порядка 119 млрд руб. [4].

В этой связи представляется возможным внести некоторые дополнения в системную методологию оценки эффективности инвестиционных проектов, разработанную коллективом авторов в составе П.Л. Виленского, В.Н. Лившица, С.А. Смольяка [5] и внедренную в правовое поле в виде Методических рекомендаций по оценке эффективности инвестиционных проектов, утвержденных Министерством экономики РФ, Министерством финансов РФ, ГК РФ по строительству, архитектуре и жилищной политике в 2000 году [6].

1. Критерии эффективности государственного инвестирования в транспортную инфраструктуру

В научном сообществе принято считать, что крупные инфраструктурные проекты - развитие региональной транспортной сети, создание логистического хаба, строительство высокоскоростной магистрали и т.п. – в случае их реализации сами по себе способствуют росту потребности в инфраструктурных услугах за счет экономического развития региона влияния, уровень которого измеряется величиной так называемого агломерационного эффекта, равной приросту валового регионального продукта. В условиях дефицита и высокой стоимости инвестиций рассматривать инфраструктурные проекты в качестве возможного «генератора» будущей потребности в транспортных услугах нецелесообразно.

Набор «тактических» задач следует формировать исходя из перечня выявленных на текущем этапе или прогнозируемых в краткосрочном и среднесрочном периодах «узких мест» в развитии отраслевой инфраструктуры, оказывающих очевидное отрицательное влияние на экономику страны. При этом важно обеспечить всесторонний учет сетевого характера инфраструктурных систем, взаимосвязанность сетевых элементов и наличие значительных синергических эффектов.

Государство как субъект инвестиционной деятельности должно опираться в принятии решений на оценки общественной эффективности инвестиционных проектов. Методика расчета обществен-

ной эффективности основана на максимизации эффекта (разность результатов и затрат) проекта за принятый расчетный период с учетом неравнозначности затрат и результатов во времени, инфляции. Величина денежных притоков и оттоков проекта при расчете общественной эффективности опирается на так называемые специальные экономические цены и не включает перетоки средств среди субъектов экономической деятельности внутри страны. В денежных потоках проекта отражаются последствия его реализации в других отраслях, социальной, экологической сферах [6].

Классический подход к оценке общественной эффективности инвестиционного проекта исходит из равнозначности всех учитываемых в расчетах эффектов, как внутренних (для участников проекта), так и внешних. Однако с точки зрения точности измерения соответствующих затрат и результатов эти величины существенно различаются. Внутренние потоки допускают точное стоимостное измерение, а внешние – нет. Они практически всегда устанавливаются, а затем оцениваются в денежном выражении экспертно.

Использование критерия общественной эффективности при государственном финансировании может привести к фатальным ошибкам при выборе направлений инвестирования, поскольку величина критерия в той или иной степени зависит от количества учитываемых внешних эффектов и их значений. В свою очередь сами внешние эффекты – понятие во многом субъективное. К примеру, проект можно теоретически превратить в «эффективный» за счет упомянутого выше агломерационного эффекта – роста валового внутреннего продукта в результате создания транспортной инфраструктуры в регионах прохождения трассы. Или, напротив, понизить эффективность проекта, включив в расчет потери от загрязнения окружающей среды в связи с увеличением транспортного потока или стоимость изъятых сельскохозяйственных земель, рассчитанных по утраченной прибыли сельского хозяйства и т.д. Как специалисты в сфере оценки внешних эффектов от развития и функционирования транспорта смеем утверждать, что при желании можно обосновать эффективность практически любого крупномасштабного проекта, хотя классики теории эффективности инвестиционных проектов считают иначе [7, 8].

Если главная опасность учета внешних эффектов – это отсутствие объективности и зависимость от мнений экспертов, то по поводу эффектов внутренних – разницы доходов и расходов самих участников проекта – ситуация несколько иная.

Транспортная инфраструктура – это, по сути своей, общественное благо. Ориентироваться при

ее создании на рост доходов участников проекта (на стадии реализации - разработчиков, проектировщиков, строителей, на стадии эксплуатации - юридических лиц, использующих инфраструктурный объект для оказания услуг) - неправильно и нелогично, тем более, что доходы пользователей напрямую зависят от тарифов, устанавливаемых, как правило, под контролем государства.

Общий вывод следующий: в качестве критерия оценки эффективности государственных инфраструктурных проектов в рамках ситуационного управления предлагается минимум затрат на производство заданного объема инфраструктурных услуг с использованием современных технологий, материалов, механизмов создания инфраструктурного объекта и его последующего функционирования. Внешние эффекты и доходы участников проекта из расчета исключаются.

Важно подчеркнуть, что объект финансирования в данном контексте - это конкретный сформированный инвестиционный проект, а не «перечень намерений». В соответствии с ст. 1 Федерального закона от 25.02.1999 г. №39-ФЗ «Об инвестиционной деятельности в Российской Федерации, осуществляемой в форме капитальных вложений» (далее также Закон №39-ФЗ), инвестиционный проект - это обоснование экономической целесообразности, объема и сроков осуществления капитальных вложений, в том числе необходимая проектная документация, разработанная в соответствии с законодательством Российской Федерации, а также описание практических действий по осуществлению инвестиций (бизнес-план).

При расчете величины критерия необходимо обращать особое внимание на существенную нестационарность текущего состояния экономики России и мира в целом, которая характеризуется резкими и плохо предсказуемыми изменениями макроэкономических показателей и параметров и обуславливает ситуацию неопределенности, высокие и переменные, плохо прогнозируемые риски инвестирования.

Конкретная сумма затрат государственных средств по каждому проекту развития инфраструктуры должна рассчитываться по следующим правилам:

- поэтапный расчет расходов, оценка на основе данных о цене аналогичных проектов в данном случае недопустима;
- расчет полной стоимости создания и эксплуатации инфраструктурного объекта в течение его срока службы (или за установленный расчетный период);

- максимально возможное применение в расчетах действующих стандартов и нормативов, установленных на федеральном уровне;
- объективная оценка стоимости разработки ИТ-продуктов, присутствующих в составе практически любого инвестиционного проекта в связи с активно протекающими процессами цифровой трансформации экономики;
- приведение всех составляющих капитальных и текущих затрат к текущему моменту времени с помощью коэффициента дисконтирования;
- корректировка каждой составляющей затрат с учетом прогнозируемого уровня инфляции именно для данной статьи расходов;
- учет неопределенности и рисков проекта на основании формирования нескольких вариантов денежного потока для разных сценариев изменениями макроэкономических показателей и параметров (мировые цены на основные энергоносители, ввод и отмена санкций, вторичных санкций и их влияние на экономику, уровень и динамика инфляционных процессов, ключевая ставка Центробанка РФ и т.д.);
- проверка устойчивости проекта применительно к конкретным рискам конкретного проекта, связанных с климатическими, географическими, геологическими, геополитическими и прочими факторами;
- проверка устойчивости всех проектов применительно к риску дефицита кадров.

Предлагается следующая процедура выделения средств для государственного финансирования инфраструктуры.

Этап 1. Формулировка конкретных задач краткосрочного и среднесрочного характера на основании экспертных опросов авторитетных отраслевых экспертов - специалистов ведущих научно-исследовательских организаций, занимающихся проблемами транспорта, Министерства транспорта, ОАО «РЖД», представителей региональных органов исполнительной власти, экспертов из крупных транспортных, логистических компаний, представителей частного бизнеса, владеющего портовой инфраструктурой, аэропортами и т.д.

Вопросы для экспертов должны быть сформулированы максимально четко и просто. Например, вопрос 1: «Назовите проблему в сфере перевозок грузов и/или пассажиров, которая возникла (или может возникнуть в краткосрочной или среднесрочной перспективе) из-за недостаточного развития транспортной инфраструктуры (с указанием конкретного региона)».

Вопрос 2: «Оцените дефицит пропускной способности объекта инфраструктуры в рамках названной Вами проблемы в тонно-км, пассажи-

ро-км, тоннах (в случае объекта транспортно-логистической инфраструктуры, порта), пассажирах (в случае аэропорта, вокзала, порта)».

В обозримой перспективе основная информация о проблемах транспортной инфраструктуры может быть получена из базы данных Национальной цифровой транспортно-логистической платформы (НЦТЛП)³ и государственной информационной системы «Транспортно-экономический баланс РФ» (ГИС «ТЭБ»)⁴, создаваемых в рамках федерального проекта «Цифровая трансформация транспортной отрасли». В дальнейшем на базе цифровизации транспорта будет внедрена автономная система принятия решений о развитии транспортной инфраструктуры [9] на основании данных транспортно-экономического баланса⁵.

Этап 2. Обобщение данных анкетного опроса экспертов. Составление списка актуальных проектов развития транспортной инфраструктуры на краткосрочный и среднесрочный период с учетом финансовых лимитов соответствующего федерального проекта (программы).

Этап 3. Разработка проектов развития инфраструктуры, планируемых к государственному финансированию.

Этап 4. Поиск частного инвестора для реализации проекта. В случае, если хозяйствующий субъект, заинтересованный в проекте отсутствует, переход к следующему этапу.

Этот этап необходим, поскольку имеют место варианты заинтересованности бизнеса в инфраструктурных проектах. Первая в стране частная железная дорога строится в Хабаровском крае от Эльгинского угольного месторождения в Якутии до порта Эльга на берегу Охотского моря. Эльгинское месторождение коксующегося угля считается крупнейшим в России и одним из самых крупных в мире. Основные покупатели в ближайшие годы – страны Азиатско-Тихоокеанского региона и Индия. Расстояния от месторождения до крупных портов – более 2 тыс. км, а до выхода к Охотскому морю – порядка 500 км. Эти обстоятельства заставили бизнес рискнуть и построить частную железную дорогу. Оправдан ли риск, покажет время.

Этап 5. Экспертная оценка затрат, рассчитанных разработчиками проекта с точки зрения следования приведенным выше правилам или нормативным документам, утвержденным на федеральном уровне (если таковые будут утверждены).

В качестве примеров формулировки проблемы (задачи) можно привести следующие:

- «Из-за недостатка пропускной способности железнодорожных подходов к порту «N», представленных однопутными неэлектрифицированными путями, нет возможности доставлять вовремя грузы в порт; примерный дефицит пропускной способности – 10 млн т»;
- «Пропускная способность инфраструктуры автомобильного пограничного перехода «N» в муниципальном округе «M» на российско-китайской границе составляет 20 грузовых и 20 пассажирских автомобилей в сутки, что в 10 меньше реальной потребности на текущий момент»;
- «Для обеспечения перевалки экспортных грузов требуется создание многофункционального грузового района в морском порту «N» и т.п.

Для реализации предлагаемой схемы отбора проектов необходимо создание единой организационной управленческой структуры, например, это может быть Фонд развития транспортной инфраструктуры по аналогии с Фондом развития промышленности. В настоящее время существует большое количество ведомств, комиссий, рабочих групп, федеральных, еще больше региональных, которые занимаются вопросами развития транспортной инфраструктуры, дублируют друг друга. Фактически проекты планируются и реализуются по автономным планам. Тот факт, что они позиционируются как решаемые в рамках нацпроектов, федеральных проектов или многочисленных региональных программ в данном случае ничего не меняет. Для текущей экономической ситуации это неправильно и экономически необоснованно. Не говоря уже о том, сколько сил и средств тратится на экономические обоснования разных проектов, включая крупномасштабные. Расчеты социально-экономической эффективности выполняются большими коллективами, и сами по себе существенно увеличивают стоимость проектов.

Предлагается ставить конкретную актуальную с точки зрения потребности в транспортных услугах задачу, которую можно решить в ближайшие 1-5 лет, разрабатывать проект на базе самых современных технологий строительства и функционирования объектов инфраструктуры, считать затраты на него с учетом рисков и приступать к реализации в кратчайшие сроки.

2. Существующая нормативная практика оценки эффективности инфраструктурных проектов, финансируемых за счет бюджетных средств

Согласно ст. 14 Закона №39-ФЗ, инвестиционные проекты, финансирование которых планирует-ся осуществлять полностью или частично за счет

³ <https://transport.gov.ru/node/420> (дата обращения 05.02.2025)

⁴ <https://nacmt.ru/analytics/transport-balance> (дата обращения 20.01.2025).

⁵ <https://regulation.gov.ru/Regulation/Npa/PublicView?npaID=151162> (дата обращения 01.02.2025)

средств федерального, региональных или местных бюджетов, подлежат проверке на предмет эффективности использования направляемых на капитальные вложения средств соответствующих бюджетов.

Постановлением Правительства РФ от 15.03.2023 г. №399⁶ установлены Правила проведения проверки эффективности использования средств федерального бюджета, направляемых на инвестиционные проекты, сметная стоимость которых превышает 3 млрд руб.

Правила основаны на проверке соответствия инвестиционного проекта целям и задачам федерального проекта или федеральной (региональной) программы, в рамках которой реализуется проект. Оценка эффективности осуществляется по методике, утвержденной Приказом Министерства экономического развития Российской Федерации от 21.02.2024 г. №108⁷ (далее также – Методика) и базируется на мнениях экспертов, которые присваивают проекту баллы по двум критериям: «обоснованность потребности в создаваемых мощностях» и «влияние реализации инвестиционного проекта на достижение показателей структурных элементов государственной программы, федерального или ведомственного проекта».

Итоговая оценка эффективности инвестиционного проекта определяется в процентах как средневзвешенная сумма оценок эффективности по указанным выше критериям с весовыми коэффициентами 0,6 и 0,4, соответственно. Инвестиционный проект признается эффективным в случае, если значение итоговой оценки составляет 60% и более; низкоэффективным – менее 60%.

Не прибегая далее к описанию всей Методики, остановимся, в качестве примера, на

алгоритме оценки критерия обоснованности потребности в создаваемых мощностях для объектов транспортной инфраструктуры и двух его подкритериев: «наличие потребителей услуг, создаваемых в результате реализации инвестиционного проекта» и «отсутствие в достаточном объеме замещающих услуг, оказываемых иными организациями».

Методикой определены правила оценки подкритериев в баллах. Например, для подкритерия «наличие потребителей услуг, создаваемых в результате реализации инвестиционного проекта» правила следующие:

- 1 балл – если проектная мощность создаваемого объекта будет использоваться в полном объеме (с учетом реализации других проектов программы, федерального, национального проектов) (условие 1), не установлены зоны с особыми условиями использования территорий, препятствующие осуществлению строительства, и территория строительства обеспечена инженерной инфраструктурой (условие 2);
- 0,8 балла – если условие 1 выполняется, а условие 2 не выполняется;
- 0,6 балла – если будет использоваться не менее 75% проектной мощности, условие 2 выполняется;
- 0,4 балла – если будет использоваться не менее 75% проектной мощности, условие 2 не выполняется;
- 0 баллов – если будет использоваться менее 75% проектной мощности, а также если реализация инвестиционного проекта возможна без привлечения средств федерального бюджета.

По объектам транспортной инфраструктуры (за исключением трубопроводного транспорта) итоговый балл по подкритерию «наличие потребителей услуг, создаваемых в результате реализации инвестиционного проекта» корректируется в зависимости от уровня экономической эффективности. Он равен отношению прироста валового внутреннего продукта Российской Федерации (ВВП) на эксплуатационной стадии реализации инфраструктурного проекта к сумме стоимостей всех видов продукции, используемой на инвестиционной стадии, и рассчитывается по правилам, установленным «Методикой оценки социально-экономических эффектов от проектов строительства (реконструкции) и эксплуатации объектов транспортной инфраструктуры, планируемых к реализации с привлечением средств федерального бюджета, а также с предоставлением государственных гарантий Российской Федерации и налоговых льгот», утвержденной Постановле-

⁶ Постановление Правительства РФ от 15.03.2023 №399 (ред. от 30.05.2024) «О случаях и порядке проведения проверки инвестиционных проектов на предмет эффективности использования средств федерального бюджета, направляемых на капитальные вложения, о внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации, приостановлении действия постановления Правительства Российской Федерации от 12 августа 2008г. №590 и отдельных положений некоторых актов Правительства Российской Федерации, а также признании утратившими силу некоторых актов и отдельных положений некоторых актов Правительства Российской Федерации».

⁷ Приказ Министерства экономического развития Российской Федерации от 21.02.2024 г. №108 «Об утверждении методики оценки эффективности использования средств федерального бюджета, направляемых на капитальные вложения, формы заключения об эффективности инвестиционного проекта, предусматривающего строительство, реконструкцию, в том числе с элементами реставрации, техническое перевооружение объектов капитального строительства, приобретение объектов недвижимого имущества, финансовое обеспечение которых полностью или частично осуществляется из федерального бюджета, и порядка ведения реестра указанных инвестиционных проектов, получивших заключение об эффективности использования средств федерального бюджета, направляемых на капитальные вложения».

нием Правительства Российской Федерации от 06.06.2024 г. №774⁸.

Критерий «влияние реализации инвестиционного проекта на достижение показателей государственной программы, федерального или ведомственного проекта» также оценивается в баллах и зависит от того, на сколько процентов выполняется целевой показатель в результате реализации проекта.

Подход к оценке инвестиционных проектов с помощью балльных оценок не имеет отношения к эффективности в научном определении этого термина. Балльные оценки лишены субъективности только на первый взгляд, поскольку, если даже принять тот факт, что данные по объемам производства услуг по проекту и их доле в целевых показателях, заложенных в федеральный проект или программу, точны, все остальные обстоятельства, которые должен принимать во внимание эксперт при присвоении балла, он просто объективно не в состоянии оценить. Например, лицо, дающее оценку проекту в баллах, должно иметь четкое представление о росте объема оказываемых услуг не только по оцениваемому, но и по всем остальным проектам федерального проекта или госпрограммы. Кроме всего прочего, это означает, что существует полный набор таких проектов.

Следует признать, тем не менее, что элементы теории эффективности присутствуют в рассматриваемых документах в виде корректировки баллов по транспортным проектам исходя из уровня экономической эффективности проекта. Не вдаваясь в методику расчета данного удельного показателя эффективности, следует отметить, что корректировка балльной оценки связывается со сравнением данного показателя с некой величиной среднего значения уровня экономической эффективности в соответствующей группе проектов, схожих между собой по своим параметрам и назначению. Что это за величина и как ее рассчитать в Правилах не объясняется.

В отличие от рассмотренных выше Правил Методика оценки социально-экономических эффектов транспортных проектов, планируемых к реализации с привлечением средств федерального бюджета, утвержденная Постановлением №774, реализует основные принципы и подходы классической теории эффективности инвестиционных транспортных проектов, включая подробную классификацию и алгоритмы расчета внешних эффектов, которые в течение многих лет находились в кругу научных интересов авторов статьи [10-12].

Для расчета социально-экономической эффективности проекта по данной Методике необходимо большое количество данных, значительная часть из которых – прогнозные или оценочные (экспертные оценки). Например, показатель *«увеличение численности населения агломерации за счет включения в ее состав n-го населенного пункта как результат реализации инфраструктурного проекта, а также реализации градостроительного потенциала со строительством новых жилых микрорайонов в году t»* и подобные ему являются примером полной неопределенности и самого широкого диапазона возможных оценок, от которых может в значительной степени зависеть величина критерия. В этой связи в качестве замечания к Методике следует указать отсутствие учета рисков и неопределенности.

Независимо от научной обоснованности и достоинств Методики следует тем не менее подчеркнуть, что с точки зрения отбора проектов для государственного финансирования на текущем этапе экономического развития она не актуальна.

Таким образом, в качестве вывода о существующей нормативной правовой практике оценки эффективности инфраструктурных проектов, финансируемых за счет бюджетных средств, можно сказать следующее. Документы для оценки существуют, учитывают специфику транспорта, но во многом основаны на субъективных оценках, плохо применимы к реальной экономической практике, процессам формирования, разработки, оценки и выбора актуальных инфраструктурных проектов.

Заключение

На фоне возможного сокращения финансирования развития транспортной инфраструктуры из всех источников, связанного с высокой ключевой ставкой, дорожающими инвестициями и дефицитом бюджетных средств, предлагается в части выделения средств из бюджета перейти к политике ситуационного реагирования на возникающие дисбалансы, которую авторы рассматривают как дополнение к долгосрочной экономической политике в области государственного финансирования отраслевых инфраструктур.

Природа инфраструктурных проектов, с одной стороны, и текущая экономическая ситуация в стране, с другой, требуют нового подхода к оценке эффективности государственного финансирования и выводят на первый план не вопрос «Высока ли эффективность построения «египетской пирамиды», а вопрос «Нужно ли нам строить египетскую пирамиду».

⁸ Постановление Правительства Российской Федерации от 06.06.2024 г. №774 «О внесении изменений в постановление Правительства Российской Федерации от 26.11.2019 г. №1512».

Литература

1. Старовойт: финансирование нацпроектов в сфере транспорта оценивается в 14 трлн рублей // <https://tass.ru/ekonomika/20988877> (дата обращения 02.02.2025).
2. Минтранс завершил работу над нацпроектом «Эффективная транспортная система» // <https://portnews.ru/news/370565/> (дата обращения 05.02.2025).
3. Предварительный бюджет нового транспортного нацпроекта оценили в Р10 трлн. Сколько средств направят на дороги и аэропорты до 2030 года // <https://www.rbc.ru/business/18/04/2024/661ff5149a79476a2b4e6403> (дата обращения 10.02.2025).
4. Новые нацпроекты и бюджет: сколько направят на инфраструктуру в ближайшие три года? // <https://sherpagroup.ru/analytics/dase9ib> (дата обращения 05.02.2025).
5. Виленский П.Л., Лившиц В.Н., Смоляк С.А. Оценка эффективности инвестиционных проектов. Теория и практика. 5-е изд. М.: ПолиПринт-Сервис, 2015. 1300 с.
6. Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов (Вторая редакция). Министерство экономики РФ, Министерство финансов РФ, ГК РФ по строительству, архитектуре и жилищной политике. М.: Экономика. 2000. 422 с.
7. Лившиц В.Н. Системный анализ рыночного формирования нестационарной экономики России: 1992-2013. М: ЛЕНАНД. 2013. 640 с.
8. Виленский П.Л., Лившиц В.Н. Эффективность инвестиционных проектов. М.: Аудит и финансовый анализ. 2000. №3. С. 97-138.
9. В России будет проведен эксперимент по созданию национальной цифровой транспортно-логистической платформы. // <https://mintrans.gov.ru/press-center/news/11335/> (дата обращения 09.02.2025).
10. Миронова И.А., Тищенко Т.И., Фролова М.П. Внешние эффекты от реализации общественно значимых проектов развития транспортной инфраструктуры // Труды ИСА РАН. 2021. Т. 71. Вып. 2. С. 80-91.
11. Лившиц В.Н., Миронова И.А., Швецов А.Н. Оценка эффективности инвестиционных проектов в различных условиях // Экономика в промышленности. 2019. Т. 12. №1. С. 29-43.
12. Миронова И.А. Оценка внешних эффектов в расчетах общественной эффективности крупных инвестиционных проектов строительства и реконструкции участков железной дороги // Аудит и финансовый анализ, 2013. № 4. С. 200-217.

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

Тищенко Татьяна Ивановна. Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук» г. Москва, Россия. Старший научный сотрудник, кандидат экономических наук. Область научных интересов: системный анализ эффективности естественных монополий. E-mail: ttischenko@isa.ru (ответственный за переписку).

Фролова Марина Петровна. Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук» г. Москва, Россия. Старший научный сотрудник, кандидат экономических наук. Область научных интересов: системный анализ эффективности естественных монополий. E-mail: marinafr2011@yandex.ru

State Infrastructure Projects as an Object of Situational Management

I.A. Mironova, T.I. Tischenko, M.P. Frolova

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

Abstract. The article examines the problems associated with calculating the public efficiency of transport infrastructure development projects in the current geopolitical and economic conditions of the country's development. A new approach to selecting infrastructure projects for public financing is proposed, which is characterized as an element of situational management of the industry.

Keywords: *state investment project, transport infrastructure, public efficiency, efficiency criterion, situational management.*

DOI: 10.14357/20790279250202 **EDN:** GNFFKN

References

1. Starovoit: financing of national projects in the transport sector is estimated at 14 trillion rubles. URL: <https://tass.ru/ekonomika/20988877> (accessed 02.02.2025).
2. The Ministry of Transport completed work on the national project «Efficient transport system». URL: <https://portnews.ru/news/370565/> (accessed 05.02.2025).
3. The preliminary budget of the new national transport project was estimated at P10 trillion How much money will be allocated to roads and airports by 2030. URL: <https://www.rbc.ru/business/18/04/2024/661ff5149a79476a2b4e6403> (accessed 10.02.2025).
4. New national projects and budget: how much will be allocated to infrastructure in the next three years? URL: <https://sherpagroup.ru/analytics/dase9ib> (accessed 05.02.2025).
5. Vilensky P.L., Livchits V.N., Smolyak S.A. Assessment of Investment Projects Efficiency. Theory and Practice. M.: Poly Print Service, 2015. 1300 p. (In Russ.).
6. Guidelines for Assessing Investment Projects Efficiency. Official publication. (Second Edition). The Ministry of Finance, the Ministry of Economic Development and the Gosstroy of the Russian Federation. M.: Economics, 2000. 422 p. (In Russ.).
7. Livchits V.N. Systems Analysis of Market Reforming Non-stationary Economy of Russia: 1992-2013. M.: LENAND, 2013. (In Russ.).
8. Vilensky P.L., Livchits V.N. Efficiency of Investment Projects // Audit and financial analysis. 2000. No. 3. Pp 97-138. (In Russ.).
9. An experiment will be conducted in Russia to create a national digital transport and logistics platform. <https://mintrans.gov.ru/press-center/news/11335/> (accessed 09.02.2025).
10. Mironova I.A., Tishchenko T.I., Frolova M.P. External Effects from the Implementation of Socially Significant Projects for the Development of Transport Infrastructure // Proceedings of ISA RAS. 2021. T. 71. Issue. 2. Pp. 80-91. DOI: 10.14357/20790279210210 (In Russ.).
11. Livchits V.N., Mironova I.A., Shvetsov A.N. Investment Projects Assessment in Different Conditions // Economics in Industry. 2019. Vol. 12. No.1. Pp. 29-43. (In Russ.).
12. Mironova I.A. Assessment of External Effects in Calculations of the Social Efficiency of Large Investment Projects for the Construction and Reconstruction of Railway Sections // Audit and financial analysis. 2013. No. 4. Pp. 200–217. (In Russ.).

Inna A. Mironova. PhD in economics, Federal Research Center “Computer Science and Control” of Russian Academy of Sciences, 117312, 9 Prospekt 60-Letiya Oktyabrya, Moscow, Russia, e-mail: makbat@mail.ru

Tatyana I. Tischenko. PhD in economics, Federal Research Center “Computer Science and Control” of Russian Academy of Sciences, 117312, 9 Prospekt 60-Letiya Oktyabrya, Moscow, Russia, e-mail: ttischenko@isa.ru

Marina P. Frolova. PhD in economics, Federal Research Center “Computer Science and Control” of Russian Academy of Sciences, 117312, 9 Prospekt 60-Letiya Oktyabrya, Moscow, Russia, e-mail: marinafr2011@yandex.ru

Цифровая трансформация системы здравоохранения

Е.Р. Орлова^I, М.Н. Перелыгина^{II}

^I Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление»
Российской академии наук», г. Москва, Россия

^{II} ФГБОУ ВО «Дубна», Дубна, Россия

Аннотация. В статье проведен краткий анализ направлений развития цифровой экономики в стране в целом, и в сфере здравоохранения, в частности. Изучены теоретические и методологические подходы к использованию информационных технологий в медицине. Показано, что на первых порах цифровая трансформация в здравоохранении была в основном связана с автоматизацией рутинных процессов. Сейчас наряду с автоматизацией полным ходом идет цифровизация, нацеленная на создание интеллектуальных производственных систем, способных адаптироваться к изменениям в реальном времени. Но необходимо подчеркнуть, что цифровые технологии в первую очередь призваны совершенствовать систему здравоохранения, повышать качество и результативность медицинской помощи. Внедрение цифровых технологий в медицину вовсе не означает, что они полностью заменят врача.

Ключевые слова: цифровая экономика, автоматизация, цифровизация, сфера здравоохранения, искусственный интеллект, роботизация, большие данные.

DOI: 10.14357/20790279250203 **EDN:** NNJIWT

Введение

Развитие цифровой экономики началось одновременно с появлением первых компьютеров, массовое распространение оно получило с разработкой бытовых приборов, основанных на микропроцессорах. Значительную роль в поддержке цифровой экономики играет государство, осуществляющее охрану интеллектуальной промышленной собственности; создающее инновационную инфраструктуру; реализующее мониторинг и прогнозирование инновационных процессов; ищущее и внедряющее передовые и наиболее эффективные технологии. [1] В Российской Федерации, наряду с другими развитыми странами, процесс развития и распространения цифровой экономики идет давно, но только в 2017 г. он был зафиксирован в программе «Цифровая экономика Российской Федерации». [2]

В Программе цифровой экономики важнейшее место занимают вопросы возможности применения современных информационных технологий (ИТ) в различных отраслях промышленности, здравоохранения, науки, культуры, социальной сферы. Наиболее часто, говоря о направлениях внедрения цифровых технологий выделяют:

– технологии Big Data и искусственный интеллект (ИИ),

- роботизацию;
- цифровые двойники;
- технологии дополненной (AR) и виртуальной реальности (VR);
- промышленный интернет вещей (IoT);
- 3D-моделирование и 3D-печать;
- BIM (Building Information Modeling) – технологии.

Причем вышеназванные технологии могут быть реализованы практически во всех отраслях, начиная со строительства и заканчивая медициной.

1. Материалы исследования

В данной статье основное внимание уделяется особенностям развития цифровой экономики, цифровой трансформации системы здравоохранения. Поэтому постараемся более четко определиться с тем, что она собой представляет.

Здравоохранение – это система социально-экономических и медицинских мероприятий, цель которых заключается в сохранении и повышении уровня здоровья каждого отдельного человека и населения в целом, а также во внесении положительного вклада в развитие общественного производства, обеспечении доступного уровня ме-

дицинского обслуживания населения. При этом здравоохранение рассматривают в двух аспектах:

- 1) как отрасль хозяйства – экономическая составляющая (хозяйственные формы, в рамках которых совершается профессиональная деятельность);
- 2) как область человеческой деятельности, которая представляет профессиональную составляющую (содержательный аспект медицинской деятельности).

В настоящее время информационные технологии являются одним из приоритетов развития сферы здравоохранения во всем мире, ежегодно этот рынок увеличивается на четверть. Ожидается, что данный процесс сможет обеспечить прорыв в доступности и качестве услуг без роста расходов на здравоохранение [3].

Следует отметить, что процесс цифровой трансформации состоит как минимум из двух этапов. Сначала идет автоматизация, а затем цифровизация. Автоматизация направлена на повышение производительности и снижение издержек, в то время как цифровизация нацелена на создание интеллектуальных производственных систем, способных адаптироваться к изменениям в реальном времени.

Поэтому на первых порах цифровая трансформация в здравоохранении была в основном связана с автоматизацией рутинных процессов и внедряемые информационные технологии были нацелены на:

- учет и ведение требуемой медицинской документации;
- создание и дальнейшее развитие аналитических схем для принятия решений и контроля использования ресурсов в сфере здравоохранения;
- рост электронного документооборота и улучшение качества компьютерного оборудования;
- создание более совершенного программного обеспечения, отвечающего поставленным целям и имеющего соответствующий уровень защиты.

Наиболее ощутимыми выгодами от внедрения перечисленных медицинских информационных технологий стало сокращение количества действий с картами, снижение времени, затрачиваемого на проведение поиска необходимой информации и возможность копирования записей; экономия затрат на лекарственные препараты; сокращение затрат на лабораторные и радиологические исследования; уменьшение сроков госпитализации; выгоды администрирования при работе с платёжными документами и др.

При анализе эффективности применения информационных технологий в здравоохранении наиболее сложной проблемой является количе-

ственная оценка результатов их внедрения. Считается, что при их реализации проще посчитать затраты. Результаты же выражаются, как правило, не стоимостными, а качественными показателями: совершенствованием медицинского обслуживания, облегчением работы медицинского персонала, улучшением здоровья пациентов и др. [1]

Анализируя нынешнюю ситуацию, можно констатировать, что наряду с продолжающейся автоматизацией типовых задач все большее значение приобретает цифровизация, ориентированная на широкое внедрение медицинских роботов, использование цифровых двойников, нацеленная на применение в здравоохранении искусственного интеллекта (алгоритмов машинного обучения, нейросетей, обработки естественного языка).

Во всем мире примерно 40% отраслей здравоохранения регулярно используют искусственный интеллект и алгоритмы машинного обучения.

Согласно данным издания AI in Healthcare Statistics рынок искусственного интеллекта (ИИ) в мире к 2030 году достигнет 187,95 млрд долл.

Artificial intelligence (AI) in healthcare market size worldwide from 2021 to 2030

(in billion U.S. dollars)

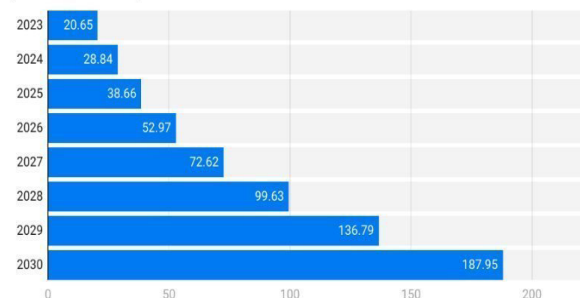


Рис. 1. Объем рынка искусственного интеллекта в здравоохранении в мире в период с 2023 по 2030 годы, млрд. долл. (AI in Healthcare Statistics)¹

Российский рынок медицинских услуг, использующий ИИ, также год от года растет. По данным агентства Smart Ranking в 2023 году российский рынок медицинских технологий увеличился на 27 %, до 46,63 млрд руб. в первую очередь за счет использования медицинских роботов и искусственного интеллекта.

Если говорить о роботизации, то ее преимущества в медицине невероятны. Например, благодаря роботам можно значительно снизить количество ошибок, совершаемых в ходе операций, а также ускорить процесс лечения пациентов. Ро-

¹ Стоит отметить, что авторы не могут с уверенностью сказать о верности приведенных цифр. В иных источниках приводятся более скромные объемы.

боты также могут применяться для доставки лекарств и медицинских препаратов, что особенно важно в условиях высокой загруженности больниц и нехватке медперсонала.

Однако, роботизация в медицине создает новые вызовы для здравоохранения. Во-первых, это отсутствие личного контакта между пациентом и врачом, который является одним из основных компонентов эффективного лечения. Во-вторых, роботизация требует более профессиональной подготовки медицинского персонала, что может стать значительной проблемой при нехватке кадров в медицинской отрасли.

На рис. 2 приведены данные по возможному объему хирургической робототехники согласно изданию «AI in Healthcare Statistics» (ИИ в здравоохранении).

Size of the Surgical Robotics Market Worldwide

Between 2021 and 2030

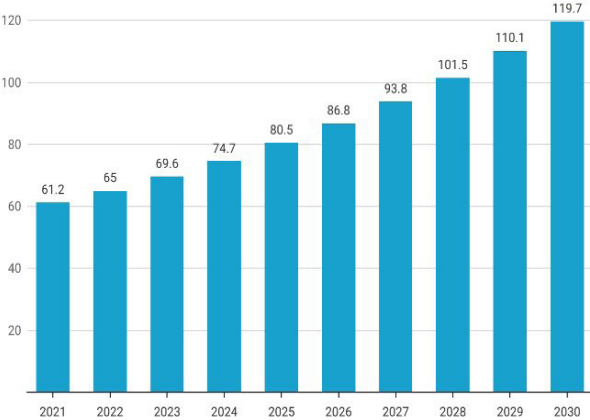


Рис. 2. Мировой объем хирургической робототехники, млрд долл.

Всего с начала использования в России медицинских роботов было выполнено около 28000 операций. Только за 2022 год проведено 4463 операции.

Согласно оценкам мэра Москвы Сергея Собянина, число высокотехнологичных операций, опирающихся на использование медицинских роботов в столице за 15 лет возросло в несколько раз.

Помимо вышеперечисленных трендов цифровой трансформации здравоохранения, связанных с роботизацией и искусственным интеллектом, стоит упомянуть и ряд других направлений, актуальных в настоящее время и для иных отраслей экономики:

- Создание цифровых двойников для решения самых разнообразных задач (например, технология, дающая возможность получить виртуальные копии пациентов и медицинских устройств);

- ВМ-технологии (проектирование зданий для медицинских учреждений);
- применение дополненной и виртуальной реальности (при реабилитации пациентов с заболеваниями опорно-двигательной системы, в работе с психосоматическими расстройствами);
- промышленный интернет вещей (IoT) (удаленный мониторинг, интеллектуальные датчики, интеграция медицинских устройств, фитнес-трекеры, носимые биометрические датчики, мониторы уровня глюкозы, дозаторы рецептов и умные кровати);
- 3D-моделирование и 3D-печать (3D-биопечать тканеинженерных конструкций и прототипов органов для регенеративной медицины);
- использование технологий Big Data (для ранней диагностики и прогнозирования заболеваний, оптимизации лечения и улучшения медицинских протоколов, мониторинга состояния пациента в реальном времени);
- применение технологии прогнозной (предиктивной) аналитики отказных состояний.

2. Результаты исследования

Использование всех вышеперечисленных технологий, связанных с цифровизацией здравоохранения приводит к совершенствованию системы, ведет к улучшению здоровья населения. В таблице 1 приведен перечень стран с лучшими системами здравоохранения согласно изданию CEOWORLD.

Табл. 1

Страны с лучшими системами здравоохранения в 2024 г. согласно журналу CEOWORLD.

Ранг	Страна	Медицинская инфраструктура и специалисты	Доступность и стоимость лекарств	Готовность правительства	Индекс Медицинской Помощи (Общий)
1	Тайвань	87.16	83.59	82.3	78.72
2	Южная Корея	79.05	78.39	78.99	77.7
3	Австралия	90.75	82.59	92.06	74.11
4	Канада	86.18	78.99	88.23	71.32
5	Швеция	78.77	74.88	74.18	70.73
6	Ирландия	92.58	96.22	67.51	67.99
7	Нидерланды	77.86	71.82	55.1	65.38
8	Германия	86.28	75.81	83.82	64.66
9	Норвегия	72.48	68.68	64.78	64.63
10	Израиль	88.63	75.61	90.25	61.73
15	США	79.73	68.59	75.73	56.71
42	Россия	88.12	72.84	91.25	42.31

Countries With The Best Health Care Systems, 2024 - CEOWORLD magazine

Как следует из табл. 1, Россия занимает не самое высокое место по уровню развития систем здравоохранения. Причем видно, что наиболее серьезные проблемы связаны именно с состоянием индекса общей медицинской помощи. Цифровая трансформация сферы здравоохранения в значительной степени может помочь решить и эту проблему, экономя и время, и силы, и деньги.

Хотя, когда речь идет о московских клиниках, то здесь ситуация более благостная. Получила развитие роботическая хирургия. В 2024 году было проведено на 91 % операций больше, чем в 2023 году. С помощью роботов-ортопедов выполняются операции по эндопротезированию суставов. Метод эндопротезирования коленного сустава с роботизированной системой включен в перечень высокотехнологичных операций. И за последний год их число выросло в 12 раз. На основе снимков КТ создаются 3D-модели для точного планирования операций и размещения имплантов, что позволяет сократить реабилитационный период на 4-6 недель. Что касается интернета-вещей, то он используется в персонализированной медицине, целью которой является предоставление лечения в зависимости от образа жизни пациента, факторов окружающей среды и генетических факторов.

Если говорить об автоматизации здравоохранения, то доля медицинских учреждений, которые перешли на электронный документооборот серьезно варьируется от региона к региону. В Москве планируется в 2025 году всю систему здравоохранения полностью перевести на электронный документооборот. К сожалению, в стране ситуация несколько иная. Помимо финансовых проблем для регионов характерен недостаточный уровень информационной зрелости в области здравоохранения.

Заключение

Как уже было сказано, сфера здравоохранения преобразуется в соответствии с новыми тенденциями развития общества. Изменения затронули такие вопросы, как персонификация данных пациентов и врачей, сохранность медицинской информации, новые методы верификации, валидация клинических дистанционных исследований. Цифровизация открыла перед медициной новые пути диагностики и лечения заболеваний, 3D-моделирование, самодиагностика с помощью специальных приспособлений, развитие синтетической биологии. Однако при использовании данных устройств человек может нанести себе определенный вред, поэтому необходим серьезный контроль со стороны государства.

Кроме того, нельзя забывать, что сфера здравоохранения охватывает самые широкие слои населения. В значительной степени она нацелена на поддержание здоровья пожилых людей, менее склонных к восприятию любого вида инноваций. Поэтому процесс внедрения таких хорошо зарекомендовавших себя за рубежом информационно-коммуникативных технологий, как телемедицина, электронные рецепты, электронные очереди и т.д., еще долго будет идти более медленными шагами, чем хотелось бы. Нельзя также не учитывать и недостаточный уровень компьютерной грамотности медицинских работников. Если в крупных городах эта проблема в значительной степени решена, то в регионах к ее решению еще и не приступали.

Литература

1. Орлова Е.Р., Квитатиани Э.В. Информационные технологии в медицине: возможности и проблемы // Анализ, моделирование, управление, развитие социально-экономических систем. Сборник научных трудов XII Международной школы-симпозиума АМУР-2018. 2018. С. 335-337.
2. Программа «Цифровая экономика Российской Федерации». URL: <http://d-russia.ru/wp-content/uploads/2017/05/programmaCE.pdf>
3. Орлова Е.Р., Бочарова И.Е., Козенко Т.Е., Федотова А.М. Основные направления цифровизации в области здравоохранения // Информационные технологии и вычислительные системы, 2023. № 2. С. 18-26.
4. Федеральный закон № 242-ФЗ от 29.07.2017 «О внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации по вопросам применения информационных технологий в сфере охраны здоровья»
5. Апатова Н.В. Интернет-глобальный рынок информационной экономики // Глобальная экономика в XXI веке: диалектика конфронтации и солидарности. Сборник научных трудов/ Под ред. д-ра экон. наук, профессора Сорокина Д.Е., д-ра экон. наук, доцента Альпидовской М.Л. Краснодар. 2017. с. 99-101.
6. Орлова Е.Р., Нуржанкызы А. Государственно-частное партнерство как способ финансирования объектов здравоохранения. М.: Вестник Московского университета им. С.Ю. Витте. Серия 1. Экономика и управление. № 1 (24). 2018. С. 15-20
7. Медицина и здравоохранение в современном обществе.

8. National standards (2021). <https://www.tc164.ru/>. Accessed 20 Jan 2022.
9. <https://internationalinvestment.biz>.
10. <https://md.school/blog/sovremennye-tehnologii-v-meditsine>.
11. Морозова Ю.А. (2020). Цифровая трансформация российского здравоохранения как фактор развития отрасли Интеллект. Инновации. Инвестиции 2: 36-47.
12. Муслимов М.И. (2018) Цифровое здравоохранение - как фактор революционных преобразований в отрасли Current problems of health care and medical statistics 3: 63-73.
13. Национальная технологическая инициатива «ХелсНет» (2021). <https://minzdrav.gov.ru/ministry/61/23/stranitsa-967/natsionalnaya-tehnologicheskaya-initsiativa-helsnet>. Accessed 20 Jan 2022
14. Национальные стандарты (2021). <https://www.tc164.ru/>. Accessed 20 Jan 2022
15. Паспорт национального проекта «Здравоохранение» (2019). <http://government.ru/info/35561/>. Accessed 20 Jan 2022

Орлова Елена Роальдовна. Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук, г. Москва, Россия. Заведующая отделом, доктор экономических наук, профессор. Область научных интересов: проблемы социально-экономического развития региона, инвестиционное развитие, цифровая трансформация. E-mail: orlova@isa.ru (Ответственная за переписку)

Перельгина Мария Николаевна. Государственный университет «Дубна», г. Дубна, Россия. Аспирант. Область научных интересов: проблемы развития систем здравоохранения. цифровая трансформация. E-mail: inyutina.maria@yandex.ru

Digital transformation of the healthcare system

E.R. Orlova^I, M.N. Perligina^{II}

^I Federal Research Center «Computer Sciences and Control» Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

^{II} FSBEI HE «Dubna», Dubna, Russia

Abstract. The article provides a brief analysis of the directions of development of the digital economy in the country as a whole, and in the field of health care, in particular, studies theoretical and methodological approaches to the use of information technologies in medicine. It is shown that at first, digital transformation in healthcare was mainly associated with the automation of routine processes. Along with automation, digitalization is now in full swing, aimed at creating intelligent production systems that can adapt to changes in real time. But it should be emphasized that digital technologies are primarily designed to improve the healthcare system, improve quality and effectiveness of medical care. The introduction of digital technologies in medicine does not mean that they will completely replace the doctor.

Keywords: *digital economy, automation, digitalization, healthcare, artificial intelligence, robotics, big data.*

DOI: 10.14357/20790279250203 **EDN:** HHJIWT

References

1. Orlova E.R., Kvitatiany E.V. Information Technologies in Medicine Opportunities and Challenges // Analysis, modeling, management, development of socio-economic systems. Collection of Scientific Papers of the XII International School-Symposium AMUR-2018. 2018. P. 335-337.
2. Program «Digital Economy of the Russian Federation». URL: <http://d-russia.ru/wp-content/uploads/2017/05/programmaCE.pdf>.
3. Orlova E.R., Bocharova I.E., Kozenko T.E., Fedotova A.M. The Main Directions of Digitalization in the Field of Healthcare // Information Technologies and Computing Systems. 2023. No 2. P. 18-26.
4. Federal Law No 242-FZ of 29.07.2017 «On Amendments to Certain Legislative Acts of the Russian Federation on the Use of Information Technologies in the Field of Health Care».
5. Apatova N.V. The Internet Global Market of the Information Economy // The Global Economy in the 21st Century: Dialectics of Confrontation and Solidarity. Collection of Scientific Works / Ed. by Dr. Econ. Sci., Professor Sorokin D.E., Dr. Econ.

- Sci., Associate Professor Alpidovskaya M.L. Krasnodar. 2017. С. 99-101.
6. *Orlova E.R., Nurzgankizi A.* Public-Private Partnership as a Way of Financing Health Care Facilities. M.: Bulletin of the Moscow University named after S.Y. Witte. Series 1. Economics and Management. No 1 (24). 2018. P. 15-20.
7. Medicine and Health Care in Modern Society.
8. National standards (2021). <https://www.tc164.ru>. Accessed 20 Jan 2022.
9. <https://internationalinvestment.biz>.
10. <https://md.school/blog/sovremennye-tehnologii-v-medsine>.
11. *Morozova S.A.* (2020). Digital transformation of Russian healthcare as a factor in the development of the Intelligence industry. Innovation. Investments 2: 36-47.
12. *Muslimov M.I.* (2018) Digital Healthcare - as a factor of revolutionary transformations in the industry Current problems of health care and medical statistics 3: 63-73.
13. National Technology Initiative "HelsNet" (2021). <https://minzdrav.gov.ru/ministry/61/23/stranitsa-967/natsionalnaya-tehnologicheskaya-initsiativa-helsnet>. Accessed 20 Jan 2022.
14. National standards (2021). <https://www.tc164.ru>. Accessed 20 Jan 2022.
15. Passport of the national project "Healthcare" (2019). <http://government.ru/info/35561/>. Accessed 20 Jan 2022.

Elena R. Orlova. Doctor of Economics, Professor, Head of Department, Federal Research Center "Computer Sciences and Control" RAS, Russia (Moscow), 9 Prosp. 60-Letia Oktyabrya, Moscow, 117312, Russia, orlova@isa.ru

Maria N. Pereligina. postgraduate student, FSBEI HE «Dubna», inyutina.maria@yandex.ru

О взаимосвязи организационных подходов стратегического анализа в контексте естественно-монопольной проблематики

Н.И. БЕЛОУСОВА

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

Аннотация. Рассматриваются вопросы взаимосвязи организационных подходов, развиваемых в рамках всеобщей организационной науки/ тектологии (организационной диалектики, как ее ключевой составляющей), и в теории естественной монополии, с расширением аналитических возможностей приложения. Представлены методологические положения стратегического анализа организационных трансформаций, основанные на организационной диалектике. Показаны направления синтеза организационных подходов по введению в стратегический анализ элементов аккумулированного организационного опыта в части структурных преобразований железнодорожного транспорта в сферах естественных монополий, уточнения процедур отбора мероприятий и анализа кризисных явлений во взаимосвязи с процедурами идентификации естественных монополий, расширения возможностей интерпретации результатов идентификации на базе представлений организационной диалектики. Определяются возможности включения в анализ организационной динамики сочетания аналитических механизмов, разрабатываемых в тектологии, и элементов методологического потенциала теории естественной монополии, ориентированного на диагностику организационных трансформаций.

Ключевые слова: стратегический анализ, всеобщая организационная наука/ тектология, организационная диалектика, теория естественной монополии, структурное реформирование, расщепление/ объединение инфраструктурных подсистем, организационные трансформации, диагностика, нормативная и поведенческая идентификация, синергические эффекты организации деятельности.

DOI: 10.14357/20790279250204 **EDN:** HSGEGV

Введение

Развитие новых теоретико-прикладных направлений, связанных со стратегическим анализом организационных трансформаций в различных сферах деятельности, и накопление организационного опыта имеющих структурную направленность социально-экономических преобразований предполагает необходимость поиска возможностей взаимной увязки и синтеза разрабатываемых методологических подходов.

Организационный компонент в системе государственного и корпоративного управления на различных этапах развития экономики и общества занимает значимое место как действенный инструмент включения в процессы управления имеющихся резервов повышения эффективности и оптимизации деятельности. Методология системного

анализа предполагает исследование организационной составляющей в качестве одного из ключевых элементов подготовки и принятия управленческих решений, их реализации [1].

При этом история развития и потенциал, заложенный в разработки специально ориентированной на анализ организации всеобщей организационной науки (тектологии) [2-5], во многом определяют – на новой основе – возрождение интереса к организационному направлению системных исследований¹. Достижения тектологической науки в последнее время изучаются и переосмыс-

¹ В том числе – в рамках обсуждений на периодически проводимых – вначале Всероссийской с международным участием, затем международных научно-практических конференциях-биеннале «Системный мир Александра Богданова» (2019, 2021, 2023гг.) в Финансовом университете при Правительстве РФ, на кафедре «Системный анализ в экономике».

ливаются, содержание и возможности расширяются и делаются попытки взаимного дополнения систем понятий, методов и подходов тектологии и методологии, разрабатываемой в рамках смежных теоретико-прикладных направлений, в потенциальных прикладных сферах приложения.

Развитие теории естественной монополии [6-8,9,10] существенным образом обусловленное проведением масштабных структурных преобразований инфраструктурных подсистем (преимущественно как организационных мероприятий), определило создание методологии и инструментария для оценки организационных трансформаций, в том числе сложных вертикально интегрированных комплексов.

Цель данной статьи – определение возможностей развития и взаимного дополнения методологических положений стратегического анализа организационных трансформаций, разрабатываемых в рамках тектологической науки и современной теории естественной монополии.

1. Формирование организационной точки зрения и организационный опыт структурных преобразований в сферах естественных монополий

Термин «организационная диалектика» получил развитие как ключевой элемент методологии в системе представлений всеобщей организационной науки (тектологии), которая исходит из необходимости изучения любого явления с позиции его организации [3-5].

Принятие организационной точки зрения и возможность включения в аналитический инструментарий стратегического анализа соответствующих организационных подходов, предполагает изучение любой системы (включая социально-экономическую) с учетом основных организационных механизмов формирования и регулирования систем, определенной терминологии и инструментария.

Формирующие механизмы – это соединение комплексов (конъюгация), вхождение элемента одного комплекса в другой (ингрессия) и распад комплекса (дезингрессия). Универсальный механизм регулирования систем (наиболее ярко проявившийся в биологии) определяется как отбор/подбор. Выделяются взаимодополняющие друг друга варианты отбора с усложнением комплексов, увеличением их разнородности, и с усилением однородности и упорядочения взаимосвязей.

В рамках методологии анализа, основанной на организационной диалектике, особо выделяются понятия/ характеристики формы, перехода от

одной формы к другой, организационного (тектологического) акта/ процесса, системной дифференциации и системной консолидации. В тектологии форма рассматривается как совокупность связей между элементами, а смена формы может состоять либо в уничтожении прежних связей, либо в возникновении новых, либо в том и другом вместе. Организационный акт – это образование новой тектологической формы, переход от одной формы к другой; системная дифференциация и системная консолидация – соответственно предполагают разрушение или создание дополнительных связей внутри и вне комплекса.

Введение в стратегический анализ организационных трансформаций естественно-монопольного компонента, прежде всего, предполагается с позиций организационного опыта структурных преобразований в сферах естественных монополий (как потенциального элемента аккумулированного организационного опыта) и организационных методов исследования тектологической науки и теории естественной монополии в их взаимосвязи.

Так, исходя из общих представлений тектологической науки, «методы всякой науки определяются прежде всего ее задачами. Задача тектологии – систематизировать организационный опыт; ... это наука эмпирическая и к своим выводам должна идти путем индукции. Тектология должна выяснить, какие способы организации наблюдаются в природе и в человеческой деятельности; затем – обобщить и систематизировать эти способы; далее – объяснить их, т.е. дать абстрактные схемы их тенденций и закономерностей; наконец, опираясь на эти схемы, определить направления развития организационных методов...» [3, с.127].

Организационный опыт масштабных структурных преобразований инфраструктурных отраслей с естественно-монопольным компонентом в европейских странах применительно к железнодорожному транспорту последних трех десятилетий – при постепенном формировании трендов и тенденций развития процессов реструктуризации – определяется организационным отделением инфраструктуры от операций железнодорожной отрасли (с обязательным разделением финансовых счетов) для национальных дорог, расширением условий открытого конкурентного доступа к инфраструктуре по всем видам грузового движения, обеспечением доступа к сетям государств-членов европейского сообщества для осуществления международных транзитных и комбинированных грузовых перевозок, международных пассажирских железнодорожных перевозок. Одновременно – на новой основе – имели место и процессы организа-

ционного объединения и корпоратизации в рассматриваемых сферах.

Непосредственно иницирующим импульсом, принципиальной основой для осуществления процессов организационной реструктуризации железнодорожной отрасли послужила законодательная Директива 91-440/ЕЕС², что определило подготовку и реализацию серии последующих железнодорожных пакетов и директив европейского сообщества – как комплекса долговременных мероприятий (обеспечение безопасности, эксплуатационной совместимости и др.) по проведению новой политики регулирования/ дерегулирования в железнодорожной отрасли [11].

В терминах тектологической науки – в процессе организационной трансформации определялись стратегические ориентиры системной консолидации на создание внутренних и международных дополнительных связей железнодорожных комплексов.

Реакция европейских стран на директивные указания была различной, динамика реформ значительно варьировалась; в ряде стран ограничилось выполнением минимального объема требований, а некоторые провели кардинальные реформы. Прежде всего, последнее относится к Великобритании, где ранее интегрированная железнодорожная компания была разбита на ряд организационно самостоятельных фирм. Германия и Нидерланды первоначально ограничилось разбиением интегрированных предприятий на инфраструктурное подразделение, отдельно подразделения грузовых и пассажирских перевозок. Далее в Германии пошли по пути корпоратизации и акционирования, создания холдинга. В Швеции раньше других стран было проведено разбиение единой национальной железнодорожной компании на компании, ответственные за инфраструктуру и операции, и установлены правила коммерческих взаимоотношений между вновь созданными структурами. Франция выполнила требования по международным транзитным и комбинированным грузовым перевозкам, были установлены условия доступа к инфраструктуре для внутренних перевозок.

Организационный опыт процессов реализации структурных преобразований железных дорог как естественных монополий (с выделением естественно-монопольного компонента) охватывает спектр моделей организационной трансформации – от полной вертикальной интеграции до конкурентного доступа и вертикального расщепления [11,12].

При этом ситуация вертикального расщепления, хотя и связывается с возможностями развития конкуренции между операторами, но и в наибольшей мере (в сравнении с другими вариантами организационной трансформации) подвержена рискам дезинтеграции управления, особенно для сетевых объектов.

Один из аргументов при выработке директивных рекомендаций для разбиения доминирующей на естественно-монопольном рынке фирмы на отдельные составляющие, деятельность которых связана с инфраструктурой и с выполнением перевозочных операций, в определенной мере принципиальная основа, – учет различий в оценке индикатора экономии от масштаба (как соотношения динамики затрат и выпуска/ спроса). Это интуитивно понятный индикатор, который легко интерпретируется и его удобно использовать для иллюстрации ситуации в экономических терминах, при растущей, падающей и постоянной экономии от масштаба, однако оценки этого индикатора не отвечают условиям естественной монополии, если исходить из положений теории [6,13,14].

Весьма показательным является организационный опыт структурного реформирования в США еще в 1980-х гг., направленность мероприятий которых – в части разбиения телекоммуникационного рынка на естественно-монопольный (местная телефонная связь) и либерализованные рынки (рынок дальней междугородной и международной связи) – была исследована и реализована, исходя существенным образом из подходов теории естественной монополии [6,15,16].

Не менее масштабный (но, как правило, не получивший должных обоснований с позиций теории естественной монополии) организационный опыт структурного реформирования отечественных естественных монополий связан с реализацией положений, имеющих упреждающий характер и законодательный статус, закрепленный в Федеральном законе РФ «О естественных монополиях», а также в пакете законодательных документов по структурной реформе в сферах естественных монополий³. При выделении в ФЗ принципиальных положений, определяющих условия естественной монополии, в явном виде – ориентация на индикатор экономии от масштаба. В документах по структурной реформе

² COUNCIL DIRECTIVE of 29 July 1991 on the development of the Community's railways 91 /440 /EEC // Official Journal of the European Communities. 24.8.91. No L 237/ 25

³ ФЗ РФ «О естественных монополиях» от 17.08.1995 № 147-ФЗ (с изм. и доп.); Указ Президента РФ от 28.04.1997 № 426 «Об основных положениях структурной реформы в сферах естественных монополий»; Пост. Прав-ва РФ от 25.05.1998 № 506 «О внесении изменения в Постановление Правительства Российской Федерации от 7 августа 1997 г. № 987 «Об утверждении Программы мер по структурной перестройке, приватизации и усилению контроля в сферах естественных монополий».

были заданы отраслевые сферы и направления реструктуризации – с охватом электроэнергетики, газовой сферы, железнодорожного транспорта и связи (далеко не в полной мере реализованные, особенно применительно к газовой отрасли).

Процессы структурного реформирования российских естественных монополий характеризуются определенной организационной динамикой, эти процессы растянулись на десятилетия и продолжаются до настоящего времени [17]. Еще непосредственно перед началом периода структурных реформ, в первой половине 1990-х гг., был дан старт интенсивным процессам консолидации новых организационных форм, созданию крупных инфраструктурных комплексов на рыночной основе с участием государства.

Постепенно – путем проведения внутри инфраструктурных корпораций мероприятий, направленных на реструктуризацию многоотраслевых производств, выделение и организационное обособление ряда непрофильных видов деятельности, создавались условия для системной дифференциации организационных форм, разрушения сложившихся ранее в рамках организационных структур связей. Вместе с тем, создавались и дополнительные связи по системной консолидации организационных форм путем налаживания новых схем кооперации, включения в логистические цепочки вновь возникающих хозяйственных взаимосвязей на внутрироссийском и международном уровнях, взаимного участия инфраструктурных корпораций в формировании и развитии рынков инфраструктурных услуг, их акционировании (в газовой, энергетической, телекоммуникационной, железнодорожной сферах деятельности).

Так, применительно к железнодорожному транспорту организационные трансформации проводились путем выведения из системы федерального железнодорожного транспорта объектов социальной сферы (в части бывшей ведомственной системы здравоохранения, образования и т.п.), непрофильных производственных мощностей (ремонтных, строительных, машиностроительных предприятий, непосредственно не относящихся к основным технологическим процессам транспортировки). Была создана корпорация ОАО «РЖД», другие инфраструктурные предприятия со статусом естественных монополистов. В качестве собственно естественно-монопольной была выделена сфера предоставления услуг по использованию инфраструктуры железнодорожного транспорта общего пользования с обеспечением возможностей доступа к инфраструктуре для различных перевозчиков. Отделение инфраструктуры от операций

по доставке грузов и пассажиров осуществлялось в виде организационного выделения в отдельные компании (в том числе, в форме создания дочерних и зависимых обществ) и т.п.

В процессе структурных реформ в сферах естественных естественных монополий идет накопление организационного опыта структурных преобразований, другими словами – организационных (тектологических) актов по расщеплению (обособлению, разбиению)/ объединению видов экономической деятельности на отраслевых и региональных рынках инфраструктурных услуг, приводящих к изменению отраслевой структуры сложных иерархически организованных, вертикально и горизонтально интегрированных отраслевых/межотраслевых конгломератов, переходу от одной тектологической формы к другой. При этом имеет место инерционность и импульсивность принятия управленческих решений безотносительно целесообразности тех или иных организационных трансформаций с позиций теории, и накопление негативного опыта структурных преобразований вследствие отсутствия стратегического анализа качества организационных трансформаций, в том числе, исходя из адекватных теоретических концепций, синтезирующих ключевые направления оценки.

2. Организационные методы исследования и возможности синтеза положений тектологии и теории естественной монополии

Организационные методы исследования, определяющие направления синтеза положений тектологии и теории естественной монополии, прежде всего, могут быть связаны с уточнением процедур отбора организационных мероприятий как тектологических актов во взаимосвязи с процедурами идентификации естественных монополий, заложенными в эти процедуры предпосылками.

В качестве значимых для стратегического анализа широкого круга организационных мероприятий предпосылок отбора – существенных для организационных подходов современной теории естественной монополии и практически не включаемых в рассмотрение в тектологии, – условие оптимизации ситуации исходного выбора, когда формируется гипотетическое пространство множества стратегических альтернатив организационных трансформаций. Для обеспечения корректного сравнения вариантов перспективных организационных трансформаций по каждому из вариантов необходимо предусмотреть, чтобы имеющиеся резервы организации деятельности (при заданной оптималь-

ной технологии) были максимально задействованы, и ситуация исходного выбора по сравниваемым вариантам отвечала идентичным условиям.

В проблематике организационных методов исследования ключевым является вопрос – как строить варианты отбора? В теории естественной монополии, исходя из подходов, ориентированных на процедуры оценки, позволяющие «уловить» специфические особенности технологии и дать рекомендации относительно рациональной организации, имеется возможность оценить целесообразность, или, напротив, нецелесообразность организационных трансформаций. Могут включаться в рассмотрение сложные отраслевые конгломераты с множеством видов деятельности, которые поддаются оценке на базе организационных подходов теории естественной монополии. Но в методологическом плане разрабатываемые в теории естественной монополии подходы, ориентированные на оценку организационных трансформаций, потенциально имеют более широкие сферы приложения.

С позиций возможности включения организационных методов исследования, разработанных в рамках теории естественной монополии, в аналитический инструментарий тектологической науки, из наиболее значимых для проведения отбора организационных мероприятий в системе технологических детерминант/ естественного монопольного индикаторов деятельности следует выделить индикатор экономии от структуры [18]. Оценки этого индикатора при проведении стратегического анализа вариантов расщепления/ объединения элементов структурной организации определяются на основе построения множества гипотетических вариантов форм организации совместной деятельности и функционального дополнения, специализированного производства (через т.н. ортогональные расщепления) и выбора из них наилучшего варианта организационной трансформации по заданному затратному критерию.

По крайней мере, исходя из возможностей обоснований в соответствии с подходами теории естественной монополии, не следует ограничиваться индикатором экономии от масштаба, широко используемом в экономическом анализе и стратегическом управлении, в том числе, при выработке рекомендаций относительно направлений структурных реформаций в сферах естественных монополий.

Методологический потенциал теории естественной монополии, несмотря на то, что существенным образом допускается и предполагается учет отраслевых особенностей технологии и орга-

низации, тем не менее дает принципиальную основу для проведения процедур отбора организационных мероприятий по обособлению/ объединению различных видов экономической деятельности, их адаптации и выработки достаточно общих организационных методов исследования.

В перечне взаимосвязанных процедур – нормативная идентификация, включение в оценки субаддитивности отраслевых многопродуктовых функций совокупных издержек технологических детерминант, поведенческая идентификация с оценками ценовой устойчивости, возможной апостериорной реакции участников процессов реорганизации, в целом – оценок синергических эффектов организации деятельности [6-10,19]. И уже на этой основе – принятие решений о целесообразности/ нецелесообразности проведения организационных трансформаций, приуроченных к определенному месту и времени.

Детализация подобных оценок, их мониторинг могут осуществляться в рамках алгоритмических систем диагностики организационных трансформаций, ключевых блоков диагностики (применительно к решению рассматриваемых задач – процедур идентификации) в их взаимосвязи и в режимах итеративного взаимодействия [20,21].

Системы диагностики могут носить многоцелевой характер, но направленность включаемых аналитических процедур в определенной мере варьируется – в зависимости от специфики решаемой задачи, особенностей исследуемого объекта и ситуации. Соответственно подходы к построению и реализации диагностических систем могут включать специальные аналитические блоки для детализации исследуемых направлений оценки системной диагностики, включая региональную диагностику, ориентированную на повышение эффективности регулирования регионального развития и принятие стратегических бизнес-решений [22,23].

Введение в стратегический анализ организационных процедур исследования кризисных явлений преимущественно определяется аналитическими возможностями тектологического подхода [3-5,24], представлениями о кризисе, значимым образом отличающимися от «обыденных». Вместе с тем, с включением в аналитические процедуры исследования кризисных явлений оценок естественного монопольного индикаторов деятельности (прежде всего, экономии от структуры), возможно формирование граничных оценок, связанных с организационными изменениями, потенциально приводящих к кризисным явлениям.

Организационный акт, т.е. образование новой тектологической формы, переход от одной формы

к другой предполагает возможности рассмотрения его во всей сложности протекания процесса, с включением кризисных явлений. С позиций тектологии понятие кризиса является вполне универсальным, кризис – «это просто особая точка зрения, применимая ко всему, что происходит в опыте: происходят только изменения, а всякое изменение можно рассматривать с точки зрения различия формы между начальным и конечным его пунктом» [5, с.67]. В результате просто происходит образование новой тектологической формы, переход от одной такой формы к другой.

При этом могут иметь место кризисы, возникающие как из «разрыва тектологических границ, следовательно, образования новых связей», так и «создания новых границ там, где их не было, то есть из разрыва связей» [5, с.18], из их сочетаний.

Принимая в качестве ключевого элемента исследования кризиса изменение, различие форм в начале и в конце периода преобразований, допускается представление в пространстве изменений, разбитых в цепь кризисов, и в каждой ситуации может потребоваться аналитика выявления взаимосвязей, оценки смешанных типов кризисов и т.п.

Возникновение цепи кризисов применительно к рассматриваемой ситуации организационных трансформаций в сферах естественных монополий может быть связано с трудностями реализации целей структурных реформ и воспроизведением на новом витке имеющихся насущных и в должной мере так и не разрешенных проблем социального характера (в том числе, ценового поведения участников), инвестиционных и др.

Организационные трансформации – не самоцель, и никак не дань «моде», хотя процессы структурного реформирования в сферах естественных монополий практически одновременно (с некоторыми лагами) были развернуты в различных странах. При этом обстоятельства, побудившие к проведению структурных реформ, были связаны как с необходимостью усиления транспортных взаимодействий и повышения роли железнодорожного транспорта, обеспечением доступа к инфраструктуре, но также и с попытками улучшить неустойчивое финансовое положение транспортных компаний, в том числе, в инвестиционном плане.

Применительно к отечественному опыту преобразований, в 2013-2015гг. «главное сокращение инвестиций произошло по линии крупных корпораций – Газпрома, Роснефти, РЖД, Росатома и Ростехнологии. Их суммарные инвестиции, которые составляли более четверти всех инвестиций в стране, снизились на 30%, прежде всего, за счет Газпрома...» [25, с.186].

В терминах характеристик организационной диалектики происходившие изменения в части инвестиций могут рассматриваться как структурный регресс (дисгармония), связанный с редуцирующим развитием – в отличие от целевых установок структурного прогресса связей структурных элементов и стимулирующей роли организационных трансформаций в динамике развития.

Представленные характеристики организационной диалектики, хотя и не рассматриваются в качестве модельного инструментария оценки, но могут являться эффективным аналитическим средством исследования организационной динамики.

Заключение

Предлагаемые подходы определяют возможности взаимосвязанного развития и взаимного дополнения методологических положений анализа организационной динамики, расширения и адаптации аналитических инструментов и механизмов организационных трансформаций, исследования их допустимости, преодоления нерациональных форм организации деятельности – что в целом создает основу для повышения обоснованности принимаемых управленческих решений по структурным преобразованиям, выработки мер стратегического системного взаимодействия и необходимых адаптационных механизмов.

Литература

1. Гвишиани Д.М. Организация и управление. М.: Наука, 1972. 2-е доп. изд. 536 с.
2. Тахтаджян А.Х. Тектология: история и проблемы // Системные исследования. Ежегодник. М.: Наука, 1971. С.200–275.
3. Богданов А.А. Тектология: (Всеобщая организационная наука). В 2-х кн. / Редкол. Л. И. Абалкин (отв. ред.) и др. / Отд-ние экономики АН СССР. М.: Экономика, 1989. Кн.1. 304с.
4. Богданов А.А. Тектология: (Всеобщая организационная наука). В 2-х кн. / Редкол. Л. И. Абалкин (отв. ред.) и др. / Отд-ние экономики АН СССР. М.: Экономика, 1989. Кн.2. 351 с.
5. Богданов А. Всеобщая организационная наука (Тектология). Часть III. Ленинград-Москва: Изд-во «Книга». 1929. 220 с.
6. Baumol W.J., Panzar J.C., Willig R.D. Contestable Markets and the Theory of Industry Structure. N.Y.: HBJ, 1982. 497 p.
7. Sharkey W.W. The Theory of Natural Monopoly. Cambridge: Cambr. Univ. Press. 1982. 229p.

8. *Baumol W.J., Willig R.D.* Contestability: Development since the Book // *Oxford Economic Papers, New Series. Supplement: Strategic Behavior and Industrial Competition*. 1986. Vol.38 (Nov.). P.9-36.
9. *Белоусова Н.И., Васильева Е.М.* Вопросы теории государственного регулирования и идентификации естественных монополий. М.: КомКнига, 2006. 320 с.
10. *Белоусова Н.И., Васильева Е.М., Ливиниц В.Н.* Модели идентификации естественных монополий и государственного управления ими (возможности расширения классической теории) // *Экономика и математические методы*. 2012. Т. 48. №3. С. 64-78.
11. *Белоусова Н.И.* Практика проведения реформ и теоретические модели государственного регулирования естественных монополий. М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2008. 112с.
12. *Campos J., Cantos P.* Rail Transport Regulation. Economic Development Institute of the World Bank. Washington D.C.1998. P.1-66.
13. *Кинэ Э.* Экономико-математические методы и политика Франции в области транспорта// *Экономика и математические методы*.1992. Т.28. №3. С.336-346.
14. *Кинэ Э.* Принципы экономики транспорта. Пер. с франц. М.: ИД Медиа Паблишер, 2023. 392 с. (Ориг. изд.: “Principles d’economie des transports”. Paris: Economica, 1998).
15. *Evans D., Heckman J.* A Test for Subadditivity of the Cost Function with an Application to the Bell System // *American Economic Review*. 1984. Vol. 74. Issue 4. P. 615-623.
16. *Evans D., Heckman J.* A Test for Subadditivity of the Cost Function with the Application to the Bell System: Erratum // *American Economic Review*. 1986. Vol. 76. Issue 4. P. 856-858.
17. *Белоусова Н.И.* Вопросы развития организационной диалектики в контексте естественно-монопольной проблематики // *Экономика и управление: проблемы, решения*. 2023. №1. Т.5. С.12-23; [https:// doi.org/10.36871/ek.ur.p.r.2023.01.05.002](https://doi.org/10.36871/ek.ur.p.r.2023.01.05.002).
18. *Белоусова Н.И.* Концепция тектологии и оценка организационных изменений в сферах естественных монополий // *Хроноэкономика*. 2019. №7(20) – декабрь. Спец. выпуск. Всероссийская научно-практ. конференция с межд. участием «Системный мир Александра Богданова» 10 декабря 2019 г. С.10-14.
19. *Белоусова Н.И., Бушанский С.П.* Моделирование оценок синергических эффектов организации деятельности в системе естественно-монопольных характеристик // *Труды ИСА РАН*. 2024.Т.74. Вып.3. С.3-10. DOI: 10.14357/20790279240301
20. *Белоусова Н.И., Бушанский С.П., Васильева Е.М., Васильев В.Б.* Естественно-монопольные свойства транспортных сетей: многопродуктовые модели диагностики// *Аудит и финансовый анализ*. 2018. Вып. 2. С.129–147.
21. *Белоусова Н.И., Васильева Е.М.* Диагностика свойств сетевых инфраструктурных технологий в реформируемой системе госрегулирования российских естественных монополий // *Российский экономический журнал*. 2019. №3. С.25-35. DOI: 10.33983/0130-9757-2019-3-25-35
22. *Лексин В.Н.* Региональная диагностика: сущность, предмет и метод, специфика применения в современной России (вводная лекция предлагаемого учебного курса) // *Российский экономический журнал*. 2003. № 9-10. С.64-86.
23. *Методы и модели системного анализа. Оценка эффективности инвестиционных проектов. Системная диагностика социально-экономических процессов.* Под ред. С.В. Емельянова // *Труды ИСА РАН*. 2011. Т.61. Вып.3. 120 с.
24. *Белоусова Н.И.* Кризисы форм и структурные преобразования в системе организационных изменений // *Теория и практика экономики и предпринимательства: Труды XIX Межд. научно-практ. конференции (Симферополь-Гурзуф, 14–16 апреля 2022).* – Симферополь: КФУ им. В. И. Вернадского, 2022. С. 4–6.
25. *Аганбегян А.Г.* О драйверах социально – экономического роста // *Труды ВЭО России. Аналитические материалы МАЭФ-2019*. 2019. Т. 218. С.180-209.

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

On interrelation of organizational approaches to strategic analysis in the context of natural monopoly issues

N.I. Belousova

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

Abstract. The issues of organizational approaches interrelation developed within the framework of general organizational science/ tektology (organizational dialectics as its key component), and in the theory of natural monopoly are considered, with the expansion of the analytical possibilities for application. The methodological provisions of the strategic analysis of organizational transformations, based on organizational dialectics, are presented. The directions for the synthesis of organizational approaches are shown in terms of introducing into strategic analysis the elements of accumulated organizational experience regarding structural changes of railway transport in natural monopoly spheres, clarification the procedures for selecting activities in conjunction with procedures for natural monopoly identification, and expanded opportunities for interpreting identification results based on the ideas of organizational dialectics. The possibilities of involving in the analysis of organizational dynamics a combination of analytical mechanisms of tektology, and the elements of methodological potential of natural monopoly theory, which focused on diagnostics of organizational transformations, are determined.

Keywords: *strategy analysis, general organizational science/ tektology, organizational dialectics, theory of natural monopoly, structure reforming, splitting/combining of infrastructure subsystems, organizational transformations, diagnostics, normative and behavioral identification, synergy effects under organizational activity.*

DOI: 10.14357/20790279250204 **EDN:** HSGEGV

References

1. *Gvishiani D.M.* Organization and management. M.: Science, 1972. 2nd ed. 536 p. (In Russ.).
2. *Tahtadjan A.H.* Tektology: history and problems. Systems Research. Yearbook. M: Science, 1971. P.200–275 (In Russ.).
3. *Bogdanov A.A.* Tektology: (General organizational science). In 2 books. / Ed. by L.I. Abalkin (ed.) et al /Department of Economics of the USSR Academy of Sciences. M.: Economica, 1989. Book 1. 304 p. (In Russ.).
4. *Bogdanov A.A.* Tektology: (General organizational science). In 2 books. / Ed. by L.I. Abalkin (ed.) et al /Department of Economics of the USSR Academy of Sciences. M.: Economica, 1989. Book 2. 351 p. (In Russ.).
5. *Bogdanov A.A.* General organizational science (Tektology). Part III. Leningrad-Moscow: Publishing house "Book". 1929. 220 p. (In Russ.).
6. *Baumol W.J., Panzar J.C., Willig R.D.* Contestable Markets and the Theory of Industry Structure. N.Y.: HBJ, 1982. 497 p.
7. *Sharkey W.W.* The Theory of Natural Monopoly. Cambridge: Cambr. Univ. Press. 1982. 229p.
8. *Baumol W.J., Willig R.D.* Contestability: Development since the Book // Oxford Economic Papers, New Series. Supplement: Strategic Behavior and Industrial Competition. 1986. Vol.38 (Nov.). P.9-36.
9. *Belousova N.I., Vasil'eva E.M.* Issues of the theory of state regulation and identification of natural monopolies. M.: KomKniga; 2006. 320 p. (in Russ.).
10. *Belousova N.I., Vasil'eva E.M., Livshitz V.N.* Models of identification of natural monopolies and their state regulation (opportunities for expanding the classical theory). *Ekonomika i matematicheskie metody.* 2012; 48(3): 64–78 (in Russ.).
11. *Belousova N.I.* The practice of reforms and theoretical problems of state natural monopolies regulation. M.: LIBROCOM Book House, 2008. 112 p. (In Russ.).
12. *Campos J., Cantos P.* Rail Transport Regulation. Economic Development Institute of the World Bank. Washington D.C.1998. P.1-66.
13. *Kine E.* Economic and mathematical methods and policy of France in the transport sphere. *Ekonomika i matematicheskie metody.* 1992; 28(3): 336–346 (in Russ.).
14. *Kine E.* Principles of transport economics. Transl. from French. M.: ID Media Publisher. 2023. 392 p. (Original ed.: "Principles d'economie des transports". Paris: Economica, 1998). (In Russ.).
15. *Evans D., Heckman J.* A Test for Subadditivity of the Cost Function with an Application to the Bell System // *American Economic Review.* 1984. Vol. 74. Issue 4. P.615-623.
16. *Evans D., Heckman J.* A Test for Subadditivity of the Cost Function with the Application to the Bell System: Erratum // *American Economic Review.* 1986. Vol. 76. Issue 4. P.856-858.

17. *Belousova N.I.* Issues of organizational dialectics development in the context of natural monopoly spheres. *Ekonomika i upravlenie: problem, resheniya*. 2023; 5(1):12-23. <https://doi.org/10.36871/ek.up.p.r.2023.01.05.002> (In Russ.).
18. *Belousova N.I.* Tektology conception and assessment of organizational changes in natural monopoly spheres. *Chronoeconomica*. 2019; 7(20) – dec. Special issue. Russian national scientific and practical conf. with intern. participation. «Alexander Bogdanov's systems world » 10 dec. 2019 г. P.10-14 (In Russ.).
19. *Belousova N.I., Bushanskij S.P.* Modeling assessments of synergy effects under organizational activity in the system of natural monopoly characteristics. *Trudy ISA RAN*. 2024; 74(3): 3-10. DOI: 10.14357/20790279240301 ((In Russ.).
20. *Belousova N.I., Bushanskij S.P., Vasil'eva E.M., Vasil'ev V.B.* Natural monopoly properties of transport networks: multiproduct models of diagnostics. *Audit i finansovyj analiz*. 2018; 2: 129–147 (In Russ.).
21. *Belousova N.I., Vasil'eva E.M.* Diagnostics of network infrastructure technologies properties under reforming the system of Russian natural monopolies state regulation. *Rossijskij e'konomicheskij zhurnal*. 2019; 3: 25-35. doi: 10.33983/0130-9757-2019-3-25-35 (In Russ.).
22. *Leksin V.N.* Regional diagnostics: essence, subject and method, specifics of application in modern Russia (introductory lecture of the proposed training course). *Rossijskij e'konomicheskij zhurnal*. 2003; 9-10. 64-86 (In Russ.).
23. Techniques and models of system analysis. Efficiency assessment of investment projects. Systems diagnostics of social and economic problems. Ed. by S.V. Yemelyanov. *Trudy ISA RAN*. 2011; 61(3): 3-10. 120 p. (In Russ.).
24. *Belousova N.I.* Form crises and structural transformations in the system of organizational changes. Theory and practice of economics and entertainment. Issues of XIX Int. scientific and practical conf. (Simferopol-Gurzuf, 14–16 apr.2022). Simferopol: KFU V.I. Vernadsky, 2022. P. 4–6 (In Russ.).
25. *Aganbegjan A.G.* On the drivers of socio-economic growth. *Trudy VEO Rossii. Analiticheskie materialy MAEF-2019*. 2019: 218:180-209 (In Russ.).

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

Обработка и анализ изображений и сигналов

Определение типа сканированного документа методом динамической трансформации временных осей

Т.Р. МАКСИМОВА^I, П.В. БЕЗМАТЕРНЫХ^{I,II}

^I ООО «Смарт Энджинс Сервис», г. Москва, Россия

^{II} Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление»
Российской академии наук, г. Москва, Россия

Аннотация. В работе решается задача выбора типа сканированного документа из предопределенного набора, возникающая в области автоматического распознавания изображений документов. Предлагаемый метод сопоставляет параллельные проекции входного изображения с эталонными проекциями образцов из предопределенного набора, для создания которых достаточно всего нескольких примеров. Сопоставление производится алгоритмом динамического выравнивания временных осей. Метод не требует бинаризации, распознавания ключевых слов или поиска геометрических примитивов, но необходима предварительная компенсации наклона документа. Проведенные эксперименты на изображениях деловых документов (8 типов документов) нормализованных вручную и автоматически показали точность типизации 99,79% и 99,76% соответственно. Среднее время обработки на ПК (AMD Ryzen 5 5600X, 64Гб) для изображений с наибольшим средним размером 2479×3589 пикселей составило 12,31±1,53 мс.

Ключевые слова: автоматическая обработка изображений документов, определение типа документа, динамическое программирование.

DOI: 10.14357/20790279250205 **EDN:** PXWRAG

Введение

Документы играют важную роль в современном мире. Без них нельзя устроиться на работу, путешествовать, водить машину, получить высшее образование и многое другое. При этом далеко не всегда используются физические носители, зачастую оказывается достаточно графического образа документа. Это стало сильно заметно при минимизации личных контактов во время пандемии COVID-19, особенно в делопроизводстве.

Для распознавания графических образов документов широко используются специализиро-

ванные системы автоматического распознавания изображений документов (СРИД) [1]. Они состоят из множества модулей, в рамках которых решаются различные задачи на стыке искусственного интеллекта, методов обработки изображений. Примеры прохождения изображения документа через модули СРИД проиллюстрирован рис. 1. Локализация изображения документа на входном изображении [2] предотвращает распознавание мусорных символов. После типизации документа [3] СРИД получит контекст, без которого нельзя верно интерпретировать информацию (например,



Рис. 1. Диаграмма типового процесса обработки документа в СРИД. Серым отмечен этап типизации, рассматриваемый в работе

какие поля на документе присутствуют, какие они имеют свойства). Знание типа документа дает много информации о правилах заполнения каждого поля. После локализации изменяемых реквизитов [4] есть возможность использовать свойства поля для более качественного распознавания. Распознавание реквизитов (текст [5], баркоды [6], чекбоксы [7]) выдает начальный результат обработки. После постобработки в результате распознавания не будет типичных ошибок системы. Например, исправляется результат распознавания нулей и букв «О» по контексту.

Контекст данной работы ограничен рассмотрением модуля типизации документа. Этот модуль является важным модулем СРИД, так как неверное определение типа документа на изображении, как видно из диаграммы на рисунке 1, ведет к нарушению работы всех последующих этапов работы системы. В работе рассматривается идентификация документа на изображении, полученного при помощи сканера, на заранее известном наборе типов документов, что является частным случаем типизации документа на изображении. Такой частный случай имеет прикладной характер. Например, при устройстве на работу в России требуется обязательный перечень документов [8], в который входят удостоверение личности (например, паспорт), трудовая книжка, документ об образовании, документы воинского учета, справка об отсутствии судимости и административных наказаний, подтверждение регистрации в системе индивидуального учета. Изучение сканированных документов также является важной прикладной задачей, например, для государственных учреждений и кадровых агентств неприемлема фотография документа, принимаются только сканы.

При описанных выше ограничениях важно быстро определять тип документа, так как это напрямую влияет на эффективность бизнес-процессов. Например, при массовом найме крупных компаний или в работе кадровых агентств, ежедневно обрабатывающих множество заявок, даже минимальная задержка в анализе каждого документа

приводит к значительным временным и финансовым потерям. Таким образом, при разработке методов стоит уделять особое внимание их производительности.

В работе предлагается метод идентификации типа документов на изображениях, полученных при помощи сканера, из заранее известного набора типов. В этом методе проекции производных входного изображения сопоставляются с набором референтных проекций при помощи алгоритма динамического выравнивания временных рядов. Описана интеграция предлагаемого метода с реальными методами компенсации угла изображения.

В разделе 1 рассматриваются работы, посвященные определению типа документа на изображении, и используемые алгоритмы; в разделе 2 ставится математическая задача идентификации типа документа на изображении для ограниченного набора типов; в разделе 3 описывается предлагаемый метод; в разделе 4 описывается план экспериментов; в разделе 5 представлены их результаты; затем, в разделе 6 анализируются результаты экспериментов, а в разделе «Заключение» подводятся итоги работы.

1. Литературный обзор

В настоящее время известно множество методов идентификации типа документа на изображении. Согласно работе [3], их можно разделить на три группы: а) на основе первично распознанного на изображении текста; б) на основе визуального содержания, например, логотипов или локальных особенностей изображения; в) на основе анализа структуры образа документа. К первой группе принадлежат такие методы, как анализ семантического векторного представления n -грамм на изображении [9], посимвольный анализ текста при помощи нейронных сетей [10], поиск ключевых слов документа [11] и многие другие. Методы, полагающиеся на анализ текста, сильно зависят от качества его первичного распознавания. Такое распознавание зачастую оказывается низкого качества, поскольку

нет возможности опереться ни на семантику, ни на геометрию документа. То есть ключевое слово может не быть обнаружено из-за ошибки распознавания, то же касается n -грамм и посимвольного анализа текста. При использовании методов из данной группы требуется повторное распознавание текста для улучшения качества распознавания, что приводит к лишним вычислениям.

Ко второй группе относится определение типа документа при помощи анализа дескрипторов локальных особенностей изображения [12]. В последнее время такой подход используется наиболее часто. Например, популярная открытая библиотека компьютерного зрения OpenCV [13] предоставляет множество алгоритмов для детекции и вычисления локальных особенностей. Использование в СРИД методов, анализирующих визуальное содержание, может требовать от пользователя проведения ряда предварительных работ, например, по созданию шаблонов типов документа, фильтрации зон с локальными особенностями изображений, их ретушированию и т.д. Так, в статье [3] предлагается маскирование на документе-примере зоны с изменяемыми реквизитами, на которых не будет вестись поиск локальных особенностей изображения. Такие зоны заменяются белыми прямоугольниками, поэтому в установлении корреспонденции будут участвовать дескрипторы точек, найденных только на неизменяемых частях документа. Заметим также, что выбор метода выделения локальных особенностей изображения является нетривиальной задачей [14].

К третьей группе относится анализ макета изображения документа с использованием скрытой марковской модели [15], фрагментация изображения на элементы и определение их типов (линии разграфки, статический текст, поля ввода) [16].

Также существуют методы, которые нельзя отнести к одной группе. Например, авторами работы [3] упоминается, что в статье [17] предложен метод, комбинирующий визуальные и текстовые дескрипторы.

Заметим, что при использовании нейронных сетей для решения задачи определения типа документа на изображении для обучения нужен репрезентативный и, возможно, большой объем данных, которого может не быть. При добавлении нового типа документа классификационная нейронная сеть требует переобучения. И, наконец, на мало-мощных устройствах нейросетевой подход может быть вычислительно затратным [14].

К методам, основанным на анализе структуры документа, также относится метод из доклада [18]. В докладе сформулирована идея использова-

ния в качестве описателя типа документа на изображении пары его проекций и сопоставления их с эталонными проекциями при помощи алгоритмов динамического программирования. Данная работа более детально рассматривает метод доклада [18] и развивает его идеи. Подобный метод затем также использовался в статье [19], посвященной сегментации регистрационных номеров автомобилей.

2. Постановка задачи и связанные определения

Приведем формальную постановку задачи определения типа документа. Пусть задано конечное множество рассматриваемых типов документов $T = \{t_1, t_2, \dots, t_N\}$. Пусть для входного изображения I зафиксирован способ g для построения его описателя и для каждого элемента из множества T известны эталонные описатели типов документов $E = \{e_1, e_2, \dots, e_N\}$. Пусть определен способ оценки близости $D(e(t_i), g(I))$, где $g(I)$ описатель для входного изображения, а $e(t_i)$ – эталонный описатель. Тогда, задача определения типа документа сводится к выбору наиболее близкого эталонного описателя к входному:

$$i_{best} = \underset{i \in \{1, \dots, N\}}{\operatorname{argmin}} D(e(t_i), g(I)). \quad (1)$$

В работе рассматриваются деловые документы, которые, как правило, являются представителями жестких структурированных документов. С формальным определением жесткого структурированного документа можно ознакомиться в работе Постникова В.В. [11]. Неформально, такие документы отличаются тем, что их статические элементы совпадают при наложении «на просвет» для всех образцов. Отличительной чертой класса деловых документов является их исходное проектирование для обработки с помощью ЭВМ, в результате чего они имеют множество таких графических элементов, как линии разграфки, решетки знакомест, таблицы, блоки текста, чекбоксы, штрих-коды и т.д. Показательные фрагменты типовых примеров документов такого класса приведены на рис. 2.

В предлагаемом методе сравниваются проекции изображений с использованием алгоритма динамической трансформации временной оси (далее ДТВО) [20]. Алгоритм позволяет найти соответствие между временными последовательностями, учитывая их возможные сдвиги и растяжения во времени. Сложность алгоритма составляет $O(m \times n)$, где m и n – размеры сравниваемых последовательностей.

При сканировании входные изображения зачастую оказываются наклонены [21]. Поэтому в реальной системе для использования предлагае-

form

1040

Department of the Treasury—Internal Revenue Service

U.S. Individual Income Tax Return

2022

OMB No. 1545-0074

IRS Use Only—Do not write or staple in this space.

Filing Status

☐ Single ☒ Married filing jointly ☐ Married filing separately (MFS) ☐ Head of household (HOH) ☐ Qualifying surviving spouse (QSS)

Check only one box.

If you checked the MFS box, enter the name of your spouse. If you checked the HOH or QSS box, enter the child's name if the qualifying person is a child but not your dependent:

Your first name and middle initial

Jason

Last name

Clark

Your social security number

5 6 8 9 9 2 0 1 5

If joint return, spouse's first name and middle initial

Olivia

Last name

Clark

Spouse's social security number

4 7 8 0 1 4 7 8 3

Home address (number and street). If you have a P.O. box, see instructions.

PO BOX 1002

Apt. no.

12

Presidential Election Campaign

Check here if you, or your spouse if filing jointly, want \$3 to go to this fund. Checking a box below will not change your tax or refund.

☐ You ☒ Spouse

City, town, or post office. If you have a foreign address, also complete spaces below.

LITCHFIELD

State

MN

ZIP code

55355-1003

Foreign country name

Foreign province/state/county

Foreign postal code

(a)

cerfa

feuille de soins - médecin

Art. R. 161-40 et suivants du Code de la sécurité sociale

Art. L. 212-1 du Code des pensions militaires d'invalidité et des victimes de la guerre

numéro de facture (facultatif)

date

N° 12541 *02

PERSONNE RECEVANT LES SOINS ET ASSURE(E)

PERSONNE RECEVANT LES SOINS (la ligne "nom et prénom" est obligatoirement remplie par le médecin)

nom et prénom

nom de famille (de naissance) suivi du nom d'usage (facultatif et s'il y a lieu)

numéro d'immatriculation

date de naissance

ASSURE(E) (à remplir si la personne recevant les soins n'est pas l'assuré(e))

nom et prénom

nom de famille (de naissance) suivi du nom d'usage (facultatif et s'il y a lieu)

numéro d'immatriculation

ADRESSE DE L'ASSURE(E)

code de l'organisme de rattachement en cas de dispense d'avance des frais (à remplir par le médecin)

(b)

0000000000

первичный ☐ дубликат ☐

ЛИСТОК НЕТРУДОСПОСОБНОСТИ

продолжение листка нетрудоспособности №

001 234 567 891

Ф

И

О

(фамилия, имя, отчество нетрудоспособного)

(место работы-наименования организации)

Основное ☐ По совместительству ☐

№

(фамилия, инициалы врача)

№ истории болезни

Дата выдачи

расписка получателя

(c)

Рис. 2. Примеры фрагментов типовых деловых документов с жесткой структурой: а) налоговая форма США; б) французская форма лечения; с) российский листок нетрудоспособности

мого метода потребуется предварительно автоматически нормализовать входные изображения. В данной работе в качестве метода нормализации используется метод, опубликованный в работе [22]. Этот метод базируется на анализе образа быстрого преобразования Хафа (далее – БПХ) [23] и отличается повышенной производительностью, что явля-

ется важным фактором в контексте данной работы. При этом, вычисление БПХ в нем осуществляется с помощью алгоритма Брейди-Ёна [24]. Введем определения, которые будут использоваться далее. Для сравнения проекций входного изображения с референтными, последние должны быть уже подготовлены. Назовем **эталонным изо-**

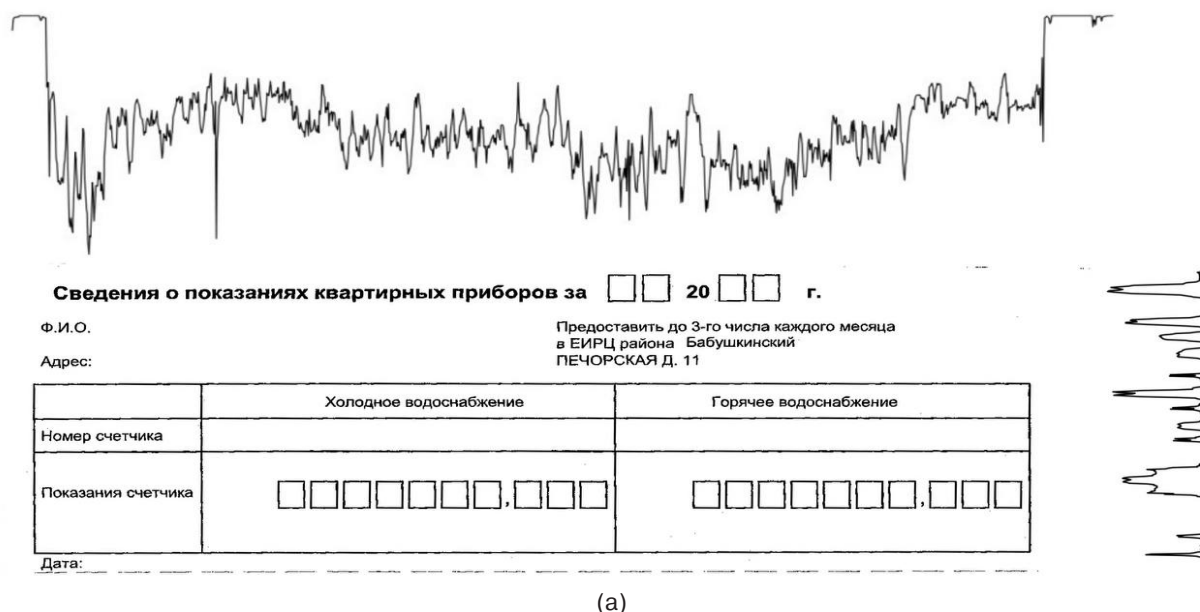


Рис. 3. Примеры изображений документов и проекций их производных.
а) Нормализованное изображение, б) Не нормализованное изображение

бражением типа документа – изображение типа документа, входящее в обучающий набор. **Эталонная проекция** типа документа – вектор, построенный по проекциям производной эталонных изображений на ось координат (при условии, что горизонтальные линии таблиц параллельны оси, вертикальные – оси) с использованием алгоритма ДТВО. **Вектор отклонений** – вектор такой же размерности, отвечающий за отклонения в проекциях производной эталонных изображений данного типа документа от эталонной проекции. Ненуле-

вая координата вектора отклонений указывает на допустимый разброс значений в соответствующей координате эталонной проекции.

3. Описание предложенного метода

В этой работе при помощи анализа проекций производных серого изображения определяется тип документа на изображении из конечного заданного набора типов. Считаем, на вход методу приходят серые изображения. В качестве описа-

теля g возьмем пару проекций производных изображения – проекцию на ось Oy производной изображения по x и проекцию на ось Ox производной изображения по y . В докладе [18] при решении этой задачи упоминались два пункта, на которые стоит обратить внимание. Во-первых, если изображение не нормализовано, то есть линии таблиц не параллельны осям координат, то яркостные проекции перестают отражать табличные свойства документа и становятся непригодными для типизации. Пример различия проекций приведен на рис. 3. Во-вторых, одного изображения для типизации может быть недостаточно, так как на документе присутствуют не только статические элементы, но и изменяемые поля, которые вносят свой вклад в проекции. Две проекции двух различных нормализованных изображений документа одного типа не будут равны. То есть, нужно некоторое количество изображений для построения эталонных проекций и их векторов отклонений. Первая проблема решается использованием быстрого преобразования Хафа и выбором нужной строки – проекции. Для решения второй мы воспользуемся вектором отклонений.

Теперь построим эталонные проекции типа документа. Если изображение нормализовано, то проекции считаем, суммируя пиксели на изображении проекции вдоль осей Ox и Oy , однако в реальных условиях изображения редко бывают нормализованными, поэтому воспользуемся быстрым преобразованием Хафа. Алгоритм вычисления проекции для ненормализованного изображения будет описан для проекции по оси Ox , для оси Oy аналогично.

Предварительно обрабатываем каждое эталонное изображение рассматриваемого типа документа. Сначала масштабируем изображение ε так, чтобы его ширина была равна w , а высота изменилась пропорционально, получаем изображение ε' . Применяем к ε' фильтр Гаусса A [25] с параметром σ_{gauss} для снижения шума на изображении, получаем изображение $A(\varepsilon')$. Затем вычисляем производную изображения $A(\varepsilon')$ по y [25], получаем изображение Dx . Вычисляем по производной Dx ее БПХ-образ по горизонтальным направлениям [26], получаем изображение $FHT(Dx)$. Вычисляем индекс i строки БПХ-образа, который отвечает за проекцию вдоль горизонтальных линий таблиц [22]. Наконец, по индексу i получаем строку БПХ-образа $FHT(Dx)[i]$ – необходимую проекцию на ось Ox .

Теперь для каждого эталонного изображения построена соответствующая ему проекция. Для построения эталонной проекции используем алгоритм, представленный на рис. 4.

Algorithm 1 Алгоритм построения эталонной проекции

Require: Массив π проекций эталонных изображений из n элементов

Ensure: Эталонная проекция

```

1:  $changed \leftarrow \{\}$  ▷ Множество измененных индексов массива
2:  $a \leftarrow 0$  ▷ Индекс изменяемого вектора
3: while  $changed.size() + 1 \neq n$  do
4:   for  $i \leftarrow 0$  to  $n$  do
5:     if  $i \in changed$  then
6:       continue
7:     end if
8:      $min\_dist \leftarrow +\infty$ 
9:     for  $j \leftarrow i + 1$  to  $n$  do
10:      if  $j \in changed$  then
11:        continue
12:      end if
13:       $d \leftarrow DTW(\pi[i], \pi[j])$ 
14:      if  $d < min\_dist$  then
15:         $min\_dist \leftarrow d$ 
16:         $changed.insert(j)$ 
17:         $a \leftarrow j$ 
18:      end if
19:    end for
20:     $\pi[a] \leftarrow (\pi[a] + \pi[i]) / 2$  ▷ Поэлементная операция с учетом ДТВО
21:  end for
22: end while
23: return  $\pi[a]$ 

```

Рис. 4. Алгоритм построения эталонной проекции

После алгоритма на рис. 4 получена эталонная проекция, однако не учитывается, что на документах есть изменяемые поля. Для решения этой проблемы построим вектор, размерность которого равна размерности уже построенного вектора, отвечающий за отклонения, алгоритм приведен на рис. 5.

Таким образом, строится эталонная проекция типа документа и вектор отклонений для каждого типа. Заметим, что вектор отклонений указывает на возможное положение изменяемых реквизитов.

Теперь определим к какому типу принадлежит документ на изображении:

1. Предварительно обрабатываем изображение, как описано выше, и получаем его проекцию.
2. Для каждой пары эталонных проекций типа документа вычисляем расстояние до эталонных проекций, добавляя весовую функцию в алгоритм ДТВО, причем $Dist(0, 0) = \frac{|e_0 - s_0|}{\sqrt{\sigma_0^2 + \lambda^2}}$.

$$Dist(i, j) = \frac{|e_i - s_j|}{\sqrt{\sigma_i^2 + \lambda^2}} + \min \begin{cases} P_{del} + Dist(i - 1, j) \\ Dist(i - 1, j - 1) \\ P_{ins} + Dist(i, j - 1) \end{cases} \quad (2)$$

где σ_i – i -ая координата соответствующего вектора отклонений, λ – настраиваемый параметр, e_i – i -ая координата эталонной проекции, s_j – j -ая координата проекции входного изображения, P_{del} и P_{ins} – величина штрафов за вставку в эталонную и входную проекцию соответственно.

3. Находим минимум по значениям функции критерия. Тип, значение до эталонных проекций которого наименьшее, является типом документа на входном изображении по формуле 1.

Построенный метод определения типа документа на произвольно повернутых изображениях

Algorithm 2 Алгоритм построения вектора отклонений

Require: Массив π проекций эталонных изображений из n элементов, эталонная проекция S , размера m
Ensure: Вектор отклонений

```

1:  $V \leftarrow \mathbf{0}$  ▷  $V$  – нулевой вектор размера  $m$ 
2: for  $i \leftarrow 0$  to  $n - 1$  do
3:   for  $j \leftarrow 0$  to  $m - 1$  do
4:      $k \leftarrow I_j$  ▷ Координата вектора  $\pi[i]$ , соответствующая координате  $j$  эталонной проекции  $S$ 
5:      $\sigma \leftarrow (|\pi[i][k] - S[j]|)/2$ 
6:     if  $\sigma > V[j]$  then
7:        $V[j] \leftarrow \sigma$ 
8:     end if
9:   end for
10: end for
11: return  $V$ 

```

Рис. 5. Алгоритм построения вектора отклонений

является полностью автоматическим. Для автоматизированных систем при построении эталонной проекции угол наклона эталонных изображений может быть компенсирован вручную.

4. План эксперимента

Для экспериментов был создан корпус данных K из сканов восьми жестких типов документов. В корпус K вошли такие типы документов как T_1 – второй регистрационный бланк; T_2 – третий регистрационный бланк; T_3 – четвертый регистрационный бланк; T_4 – сведения о показаниях квартирных приборов (рис. 3); T_5 – листок нетрудоспособности; T_6 – страховой полис; T_7 – заявление о выборе инвестиционного портфеля; T_8 – заявление на предоставление основной банковской карты.

Количество изображений каждого типа документа приведено в табл. 1. Для каждого типа документа было случайным образом отобрано 15 изображений для построения эталонных проекций.

Для каждого изображения из K была вручную проведена процедура геометрической нормализации, а именно компенсация угла наклона изображения документа, в результате которой опорные линии на его изображении оказались параллельны осям координат. Такое изображение далее будем называть **идеально нормализованным**. Идеально нормализованное изображение нужно для сравнения работы алгоритма в идеальных условиях и в условиях автоматического поворота изображения.

Для оценки точности определения типа документа Q используем функцию:

$$Q = \frac{\sum |c_t^i - c_m^i|}{\text{card}(c_m)}, \quad (3)$$

где c_t^i – тип документа на изображении, который определил метод, c_m^i – истинное значение типа, $\text{Card}(c_m)$ – мощность множества всех обработанных изображений, $[\cdot]$ – нотация Айверсона.

В экспериментах $\lambda=1$ в формуле 2, в качестве оценки близости между проекциями входного изображения $P = \{p_x, p_y\} = R(I)$ и эталонными проекциями $e(t_i) = \{p_x^0, p_y^0\}$ используется величина (4):

$$D(P, e(t_i)) = \sqrt{\frac{DTW(p_x, p_x^0) + DTW(p_y, p_y^0)}{|p_x| + |p_y| + |p_x^0| + |p_y^0|}}, \quad (4)$$

где величина $DTW(a, b)$ – обозначает расстояние ДТВО, то есть правый нижний заполненный элемент матрицы $\text{Dist}(i, j)$ из формулы 2 для векторов a и b .

Параметры w (ширина изображения) и σ_{gauss} равны 128 и 1.5 соответственно.

Для эксперимента на идеально нормализованных изображениях производные и БПХ-образы не строятся. Так как заранее известно, что проекции на оси координат совпадают с нужными нам проекциями, посчитаем их, сразу просуммировав пиксели вдоль осей координат.

5. Вычислительный эксперимент

Обозначим предлагаемый метод М1, а референтный метод из статьи [12] – М2. Результаты работы метода М1 на идеально нормализованных изображениях приведены в табл. 2а. Согласно формуле 3, точность типизации $Q=99.79\%$. Результаты работы метода М1 для изображений, угол поворота, которых априори не известен, приведены в табл. 2б. На них точность типизации $Q = 99.76\%$.

Результаты определения типа документа на изображении для идеально нормализованных изображений методом М2 приведены в таблице 3а, точность типизации $Q = 99.41\%$. 12 изображениям, содержащим документ типа T_5 , тип документа не был присвоен, реализация метода выдала ответ «untypified». Результаты определения типа документа на произвольных изображениях методом М2 приведены в табл. 3б, результат полностью совпадает с результатами, приведенными в 3а.

Время работы для каждого типа документа приведено в табл. 4. Под t_{type} понимается среднее время определения типа документа на идеально нормализованном изображении методом М1, то есть время вычисления ДТВО расстояний до эталонных

Табл. 1

Тип документа и соответствующее ему количество изображений.

Тип документа	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6	T_7	T_8
Количество изображений	462	472	958	329	246	193	279	61

Табл. 2

Типизация документов методом М1: а) матрица ошибок эксперимента на идеально нормализованных изображениях; б) матрица ошибок эксперимента на повернутых изображениях. Пустым ячейкам соответствуют нули

	а								б							
	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	T ₆	T ₇	T ₈	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	T ₆	T ₇	T ₈
T ₁	447								447							
T ₂		467								467						
T ₃			942								942					
T ₄				314								314				
T ₅					230								230			
T ₆						172		6					6	172		
T ₇							264							1	263	
T ₈								46								46

Табл. 3

Типизация документов методом М2: а) матрица ошибок на идеально нормализованных изображениях; б) матрица ошибок на повернутых изображениях. Пустым ячейкам соответствуют нули, U обозначает «untypified».

	а									б								
	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	T ₆	T ₇	T ₈	U	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	T ₆	T ₇	T ₈	U
T ₁	447									447								
T ₂		467									467							
T ₃			942									942						
T ₄				314									314					
T ₅				4	213	1			12				4	213	1			12
T ₆						178									178			
T ₇							264									264		
T ₈								46									46	

проекций и выбор минимума из этих расстояний. Под t_{total} понимается среднее общее время метода М1, то есть время изменения размера не нормализованного изображения, время вычисления производных и БПХ-образов, время вычисления проекций и время определения типа. Под t_{kps} понимается среднее время определение типа документа на идеально нормализованном изображении метода М2.

Все эксперименты проводились на ПК с процессором AMD Ryzen 5 5600X (6 ядер, 12 потоков) и 64Гб оперативной памяти. Программа написана на языке C++ с компилятором GCC 12.4.1.

6. Обсуждение

Согласно табл. 2а, все ошибки типизации метода М1 возникают на изображениях документа типа T_6 , тип которых неверно определяется как T_8 . Анализ ошибок показал, что при этом тип T_6 является второй альтернативой. Ошибка функции-критерия на этих изображениях лежит в диапазоне от 2.52% до 8.46%. Заметим, что в пяти из шести

случаях расстояние ДТВО до каждой из эталонных проекций T_6 больше, чем до эталонных проекций T_8 , только в одном случае расстояние до проекции по Оу у T_6 меньше.

Согласно табл. 2б, тип документа T_6 на шести изображениях неверно определен как T_5 и один типа T_7 определен как T_6 . Анализ ошибок показал, что только одно изображения, на котором неверно определен тип, совпадает с ошибочным изображением для идеально нормализованного случая. В данном случае для трех изображений тип T_6 не является второй альтернативой для тип документа, им оказывается тип T_2 . Аналогично для изображения с документом типа T_7 ; второй альтернативой также является T_2 . У всех семи изображений был неверно определен угол поворота, значит, неверно найдена проекция.

Отметим, что изображение, на котором возникает ошибка в случае идеальной нормализации и с поворотом, имеет множественные «паразитные» горизонтальные зачеркивания, которые меняют его структуру. Часть изображения приведена на рис. 6.

Табл. 4

Время работы метода для каждого типа документа.

Тип документа	Средний размер изображения, пэл	t_{type} , мс	t_{total} , мс	t_{kps} , мс
T_1	1664x2338	3.51 ± 0.13	9.37 ± 0.29	86.14 ± 15.35
T_2	1664x2338	3.73 ± 1.04	9.99 ± 0.54	107.44 ± 13.31
T_3	2338x1664	2.08 ± 0.85	6.77 ± 0.58	205.86 ± 28.82
T_4	1653x932	1.74 ± 0.23	5.70 ± 0.77	40.30 ± 9.29
T_5	2474x2954	3.16 ± 0.13	10.86 ± 1.90	190.06 ± 52.22
T_6	2479x3589	3.49 ± 0.20	12.31 ± 1.53	152.16 ± 16.60
T_7	2484x3503	3.46 ± 0.18	10.07 ± 0.99	81.69 ± 10.09
T_8	1655x2331	3.69 ± 0.08	9.77 ± 0.19	151.04 ± 19.73

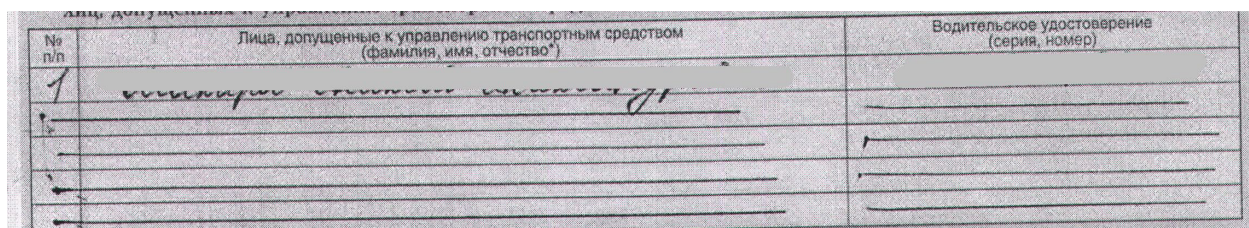


Рис. 6. Часть изображения типа T_6 из корпуса данных K, на котором множественные зачеркивания изменяют его структуру. Серым цветом замаскирована конфиденциальная информация

Сравнение результатов метода M1 и метода M2, приведенных на таблицах 2 и 3, демонстрирует, что метод M1 лучше в обоих случаях для типа T_5 , однако тип T_6 в методе M2 определяется безошибочно. Средняя точность типизации метода M1 для нормализованных изображений выше на 0.38%, для произвольных – на 0.35%, а количество ошибок метода M2 сокращается на 64.71% и 58.82% соответственно.

Согласно табл. 4, метод M2 для любого типа документа работает медленнее метода M1 в среднем в 10 раз. Общее время работы t_{total} в среднем больше времени работы определения типа t_{type} в 3 раза.

Заключение

В работе предложен метод определения типа делового документа на сканированном изображении из ограниченного набора типов. Метод основан на сопоставлении проекций производных изображений документа при помощи алгоритма динамической трансформации временной оси.

Предложенный метод не нуждается в бинаризации и предварительной обработке шаблона документа пользователем (например, выделение ключевых слов, геометрических примитивов и т.д.). Однако требуется компенсация угла наклона изображения. В работе была показана интеграция предложенного метода с существующим методом нормализации изображения на базе БПХ.

На корпусе данных, состоящем из восьми типов документов и 3008 изображений, предложенный метод показал высокую точность типизации – 99.79% на вручную нормализованных изображениях и 99.76% на произвольных изображениях. В сравнении метод, основанный на анализе дескрипторов локальных особенностей изображения, показал точность определения типа 99.41%. Более того, предложенный метод работает в среднем в 10 раз быстрее чем сравниваемый метод на нормализованных изображениях, что является важным аспектом для данной задачи. А именно, для типа документа с наибольшим средним размером изображений 2479x3589 пикселей среднее время работы метода составляет $12,31 \pm 1,53$ мс.

Литература

1. Arlazarov V.V., Andreeva E.I., Bulatov K.B., Nikolaev D.P., Petrova O.O., Savelev B.I., Slavin O.A. Document image analysis and recognition: A survey. // Computer Optics. 2022. 46(4) p. 567–589. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1020.
2. Skoryukina N.S., Arlazarov V.V., Nikolaev D.P., Faradjev I.A. Efficient Location and Identification of Documents in Images. Патент № US11574492B2, 02.09.2020 // United States Patent. С. 1-25.
3. Awal A.M., Ghanmi N., Sicre R., Furon T. Complex document classification and localization application on identity document images. // In 2017 14th IAPR

- International Conference on Document Analysis and Recognition (ICDAR). 2017. 426–431. IEEE. DOI:10.1109/ICDAR.2017.77.
4. *Gayer A.V., Arlazarov V.V.* Muldt: Multilingual ultra-lightweight document text detection for embedded devices. // IEEE Access. 2024. 12. p. 170530–170540. DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3474616.
 5. *Bahi H.E., Zatni A.* Text recognition in document images obtained by a smartphone based on deep convolutional and recurrent neural network. // Multimedia Tools and Applications. 2019. 78(18) p. 26453–26481. DOI:10.1007/s11042-019-07855-z.
 6. *Славин О.А., Федоров Г.О.* Об использовании штрих-кодирования и специализированных устройств в корпоративном электронном документообороте // Труды ИСА РАН. 2003. Т. 4. С. 185–1972.
 7. *Shengnan Z., Shanlei Y., Lianqiang N.* Automatic recognition method for checkbox in data form image. // In 2014 Sixth International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation. 2014. page 159–162. IEEE. DOI:10.1109/ICMTMA.2014.42.
 8. Какие документы могут потребовать при устройстве на работу? [Электронный ресурс] // КонсультантПлюс. URL: https://www.consultant.ru/edu/student/consultation/dokumenty_ustroystvo_na_rabotu/ (дата обращения: 01.05.2025)
 9. *Seifollahi S., Piccardi M., Jolfaei A.* An embedding-based topic model for document classification. // ACM Trans. Asian Low-Resour. Lang. Inf. Process. 20(3). 1–13. DOI:10.1145/3431728.
 10. *Xiao Y., Cho K.* Efficient character-level document classification by combining convolution and recurrent layers. // arXiv 2016. DOI:10.48550/arXiv.1602.00367.
 11. *Постников В.В.* Автоматическая идентификация и распознавание структурированных документов: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. // ИСА РАН 2001.
 12. *Skoryukina N., Arlazarov V., Nikolaev D.* Fast method of ID documents location and type identification for mobile and server application. // In 2019 International Conference on Document Analysis and Recognition (ICDAR) 2019. pages 850–857. IEEE. DOI:10.1109/ICDAR.2019.00141.
 13. Feature detection and description. [Электронный ресурс] // Open Source Computer Vision. – URL: https://docs.opencv.org/4.x/db/d27/tutorial_py_table_of_contents_feature2d.html. (дата обращения: 01.05.2025)
 14. *Skoryukina N.S., Tropin D.V., Shemiakina Y.A., Arlazarov V.V.* Document localization and classification as stages of a document recognition system. // Pattern Recognit. Image Anal. 2023. 33(4). 699–716. DOI: 10.1134/S1054661823040430.
 15. *Hu J., Kashi R., Wilfong G.* Document classification using layout analysis. // In Proceedings. Tenth International Workshop on Database and Expert Systems Applications. DEXA 99. pages 556–560. IEEE, 1999. DOI:10.1109/DEXA.1999.795245.
 16. *Постников В.В.* Формальный подход к задаче идентификации графических образов структурированных документов. // ИТиВС. 1999.— (4):280–299.
 17. *Rusin~ol M., Frinken V., Karatzas D., Bagdanov A. D., Llado's J.* Multimodal page classification in administrative document image streams. // International Journal on Document Analysis and Recognition (IJ DAR). 2014. 17(4). 331–341. DOI:10.1007/s10032-014-0225-8.
 18. *Безматерных П., Николаев Д., Постников В.* Метод идентификации типа документа по структуре проекций его изображения на координатные оси. // ИТиС. 2008. с. 498–501. ISBN 978-59-01158-08-0.
 19. *Поволоцкий М.А., Кузнецова Е.Г., Уткин Н.В., Николаев Д.П.* Сегментация регистрационных номеров автомобилей с применением алгоритма динамической трансформации временной оси. // Сенсорные системы. 2018. 32(1). С. 50–59. DOI: 10.7868/S0235009218010080.
 20. *Sakoe H., Chiba S.* Dynamic programming algorithm optimization for spoken word recognition. // IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing. 1(26):43–49. DOI:10.1109/TASSP.1978.1163055.
 21. *Hull J.J.* Document images skew detection: survey and annotated bibliography. // World Scientific. 1998. p. 40–64. DOI:10.1142/9789812797704_0003.
 22. *Безматерных П.В.* Нормализация изображения текста с помощью быстрого преобразования Хафа. // ИТиВС. 2024. (4):3–16. DOI: 10.14357/20718632240401.
 23. *Bezmaternykh P.V., Nikolaev D.P., Arlazarov V.L.* High-performance digital image processing. // Pattern Recognit. Image Anal. 2023. 33(4). 743–755. DOI: 10.1134/S1054661823040090.
 24. *Brady M.L., Yong W.* Fast parallel discrete approximation algorithms for the radon transform. // In Proceedings of the fourth annual ACM symposium on Parallel algorithms and architectures. pages 91–99. ACM. DOI:10.1145/140901.140911.
 25. *Gonzalez R.C., Woods R. E., Masters B.R.* Digital image processing, third edition. 14. 029901.

26. Алиев М.А., Кунина И.А., Николаев Д.П., Полевой Д.В. О практических аспектах вычисления Хаф-образа алгоритмом Брейди-Ёна. // Информационные процессы. 2023. 23(2). с. 250–273. DOI: 10.53921/18195822_2023_23_2_250.

Максимова Таисия Романовна. ООО «Смарт Энджинс Сервис», г. Москва, Россия. Программистка. Область научных интересов: распознавание текста, классификация типа документа на изображении, системы распознавания документов. E-mail: t.maksimova@smartengines.com (ответственная за переписку).

Безматерных Павел Владимирович. Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук, г. Москва, Россия. Программист первой категории. ООО «Смарт Энджинс Сервис», г. Москва, Россия. Научный сотрудник-программист. Область научных интересов: обработка изображений документов, распознавание штрихкодов. E-mail: bezmaternyh@isa.ru

Classification of a scanned document type using the dynamic time warping method

T.R. Maximova^I, P.V. Bezmaternykh^{I,II}

^I Smart Engines Service LLC, Moscow, Russia

^{II} Federal Research Center “Computer Science and Control”, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Abstract. The work addresses an important problem in the field of automatic document image recognition: determining the type of a scanned document from a predefined set of possible types. The proposed document classification method compares parallel projections of the input image with reference projections of templates from the target set, which can be generated using just a few document image samples. The matching is performed using a dynamic time warping algorithm. The classification method requires neither prior binarization of the sample, nor keyword extraction or recognition, nor detection of geometric primitives. However, it does require preliminary image deskewing. Experiments were conducted on a manually normalized dataset of business documents comprising eight distinct types, achieving a classification accuracy of 99.79%. For the same images normalized automatically, the accuracy reached 99.76%. For the document type with the largest average image size (2479x3589 pxs), the average processing time is 12.31 ± 1.53 ms on a PC with an AMD Ryzen 5 5600X CPU, 64GB RAM.

Keywords: automatic document image processing, document type classification, dynamic programming.

DOI: 10.14357/20790279250205 **EDN:** PXWRAG

References

1. Arlazarov V.V., Andreeva E.I., Bulatov K.B., Nikolaev D.P., Petrova O.O., Savelev B.I., Slavin O.A. Document image analysis and recognition: A survey. *Computer Optics*. 2022; 46(4):567–589. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1020.
2. Skoryukina N.S., Arlazarov V.V., Nikolaev D.P. and Faradjev I.A. “Efficient Location and Identification of Documents in Images,” United States Patent. Patent № US11574492B2, 02.09.2020. P. 1-25, 2023.
3. Awal A.M., Ghanmi N., Sicre R., Furon T. Complex document classification and localization application on identity document images. In 2017 14th IAPR International Conference on Document Analysis and Recognition (ICDAR). 2017; 426–431. IEEE. DOI:10.1109/ICDAR.2017.77.
4. Gayer A.V., Arlazarov V.V. Muldt: Multilingual ultra-lightweight document text detection for embedded devices. *IEEE Access*. 2024; 12:170530–170540. DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3474616.
5. Bahi H.E., Zatni A. Text recognition in document images obtained by a smartphone based on deep convolutional and recurrent neural network. *Multimedia Tools and Applications*. 2019; 78(18):26453–26481. DOI:10.1007/s11042-019-07855-z.
6. Slavin O.A. and Fedorov G.O. “Ob ispolzovanii shtrikh-kodirovaniya i spetsializirovannykh ustroystv v korporativnom elektronnom dokumentooborote,” *Trudy ISA RAN (Proceedings of ISA RAS)*, vol. 4, pp. 185-197, 2003.
7. Shengnan Z., Shanlei Y., Lianqiang N. Automatic recognition method for checkbox in data form

- image. In 2014 Sixth International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation. 2014; page 159–162. IEEE. DOI:10.1109/ICMTMA.2014.42.
8. ConsultantPlus. What documents may be required when applying for a job? 2024. (In Russ.) URL: https://www.consultant.ru/edu/student/consultation/dokumenty_ustroystvo_na_rabotu/.
 9. Seifollahi S., Piccardi M., Jolfaei A. An embedding-based topic model for document classification. ACM Trans. Asian Low-Resour. Lang. Inf. Process. 20(3):1–13. DOI:10.1145/3431728.
 10. Xiao Y., Cho K. Efficient character-level document classification by combining convolution and recurrent layers. arXiv. 2016. DOI:10.48550/arXiv.1602.00367.
 11. Postnikov V.V. “Avtomaticheskaya identifikatsiya i raspoznavanie strukturirovannykh dokumentov”. Dissertatsiya, pp. 1-126, 2001.
 12. Skoryukina N., Arlazarov V., Nikolaev D. Fast method of ID documents location and type identification for mobile and server application. In 2019 International Conference on Document Analysis and Recognition (ICDAR). 2019; pages 850–857. IEEE. DOI:10.1109/ICDAR.2019.00141.
 13. Open Source Computer Vision. Feature detection and description. URL: https://docs.opencv.org/4.x/db/d27/tutorial_py_table_of_contents_feature2d.html.
 14. Skoryukina N.S., Tropin D.V., Shemiakina Y.A., Arlazarov V.V. Document localization and classification as stages of a document recognition system. Pattern Recognit. Image Anal. 2023; 33(4):699–716. DOI: 10.1134/S1054661823040430.
 15. Hu J., Kashi R., Wilfong G. Document classification using layout analysis. In Proceedings. Tenth International Workshop on Database and Expert Systems Applications. DEXA 99, pages 556–560. IEEE, 1999. DOI:10.1109/DEXA.1999.795245.
 16. Postnikov V.V. Formalnyy podkhod k zadache identifikatsii graficheskikh obrazov strukturirovannykh dokumentov. ITiVS, (4):280–299, 1999.
 17. Rusin~ol M., Frinken V., Karatzas D., Bagdanov A. D., Llado's J. Multimodal page classification in administrative document image streams. International Journal on Document Analysis and Recognition (IJ DAR). 2014; 17(4):331–341. DOI:10.1007/s10032-014-0225-8.
 18. Bezmaternykh P., Nikolaev D., Postnikov V. Metod identifikatsii tipa dokumenta po strukture proektsiy ego izobrazheniya na koordinatnye osi. ITaS. 2008; c. 498–501, 2008. ISBN 978-59-01158-08-0.
 19. Povolotskiy M.A., Kuznetsova E.G., Utkin N.V., Nikolaev D.P. Segmentation of vehicle registration plates based on dynamic time warping. Sensory systems. 2018; 32(1):50–59. DOI: 10.7868/S0235009218010080.
 20. Sakoe H., Chiba S. Dynamic programming algorithm optimization for spoken word recognition. IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing. 1(26):43–49. DOI:10.1109/TASSP.1978.1163055.
 21. Hull J.J. Document image skew detection: survey and annotated bibliography. World Scientific. 1998. P. 40–64. DOI:10.1142/9789812797704_0003.
 22. Bezmaternykh P.V. Text Image Normalization Using Fast Hough Transform. ITiVS. 2024; (4):3–16. DOI: 10.14357/20718632240401.
 23. Bezmaternykh P.V., Nikolaev D.P., Arlazarov V.L. High-performance digital image processing. Pattern Recognit. Image Anal. 2023; 33(4):743–755. DOI: 10.1134/S1054661823040090.
 24. Brady M.L., Yong W. Fast parallel discrete approximation algorithms for the radon transform. In Proceedings of the fourth annual ACM symposium on Parallel algorithms and architectures. pages 91–99. ACM. DOI:10.1145/140901.140911.
 25. Gonzalez R.C., Woods R.E., Masters B.R. Digital image processing, third edition. 14(2):029901.
 26. Aliev M.A., Kunina I.A., Nikolaev D.P., Polevoy D.V. On the practical aspects of computing the Hough image by the Brady-Yong algorithm. Informatsionnye protsessy. 2023; 23(2):250–273. DOI: 10.53921/18195822_2023_23_2_250.

Taisiya R. Maximova. Smart Engines LLC, Moscow, Russia. Topics of interest: document type classification in images, document recognition systems. E-mail: t.maksimova@smartengines.com

Pavel V. Bezmaternykh. Federal Research Center «Computer Science and Control» of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia. Smart Engines LLC, Moscow, Russia. Topics of interest: document image analysis. E-mail: bezmaternyh@isa.ru

Системный анализ в медицине и биологии

Использование методики корреляционной адаптометрии для оценки эффективности проведенного лечения

М.И. Шпитонков

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

Аннотация. Методом корреляционной адаптометрии проведена обработка физиолого-биохимических данных у больных с различной степенью ожирения в процессе диетотерапии, а также у больных с различными видами операций на сердце. Показана эффективность применения диетотерапии и оценена эффективность проведенных операций с помощью методики корреляционной адаптометрии.

Ключевые слова: уравнение Колмогорова-Фоккера-Планка, корреляционная адаптометрия, вес корреляционного графа, метаболический синдром, дисперсия.

DOI: 10.14357/20790279250206 **EDN:** ONINEO

Введение

Изменение корреляций между физиологическими параметрами организма при изменении интенсивности воздействия внешней среды на популяцию может считаться достаточно проверенным научным фактом эмпирического характера [1].

Подход к оценке этого воздействия был назван методом корреляционной адаптометрии. Попытка конструирования подхода для объяснения этого метода на уровне математического моделирования, базирующаяся на использовании принципов эволюционной оптимальности и адаптации в условиях полифакториальности, нашли своё отражение в работах [1,7], где помимо чисто теоретических результатов представлена также методика корреляционного анализа конкретных данных.

Исследования, связанные с практическими применениями данного метода для оценки эффективности лечения некоторых заболеваний были продолжены рядом авторов [2,3,4,5,9,12-15]. В

этих работах показано, что при различных методиках проведенного лечения уровень корреляций между физиологическими параметрами организма уменьшается тем сильнее, чем эффективнее терапия. Так, например метод корреляционной адаптометрии применяли при изучении послеоперационной реабилитации онкологических больных [8]. Он позволил не только выявить общие закономерности восстановления функций в послеоперационный период, но и определить критические дни, в которые возможно резкое ухудшение состояния больного. В последнее время методика корреляционной адаптометрии стала использоваться не только в медицине и биологии, но и в экономике и финансах. В этих областях на ее основе, например, предсказывают экономические кризисы [6,7,16].

В работе [11] на основе методов эволюционной оптимальности была построена и обоснована диффузионная модель корреляционной адаптоме-

трии для n -мерной выпуклой области параметров биологической популяции.

Эффект изменения корреляций касается не только и не столько самих физиолого-биохимических параметров, сколько системы взаимосвязей между ними. Обычно критерий интенсивности адаптации рассчитывают, оценивая связанность анализируемых параметров, с помощью веса корреляционного графа: $G = \sum |r_{i,j}|$, где $r_{i,j}$ - попарные коэффициенты корреляции. В этой работе мы покажем, что можно пользоваться также и дисперсией, причем характер изменения дисперсии прямо противоположен изменению G .

1. Диффузионная модель со сносом и ее применение к задаче корреляционной адаптометрии

Рассматривается абстрактная популяция, особи которой отличаются не только своим местоположением в пространстве, но и значениями некоторых индивидуальных параметров. Считаем, что число этих параметров конечно, они непрерывны и ограничены, так что каждый их набор может быть описан некоторым элементом $x \in \Omega \subset R^n$ (n -число рассматриваемых параметров). При этом область Ω (гомеостазиса) считается фиксированной.

Далее, будем считать, что изменения параметров отдельной особи могут быть описаны непрерывным диффузионным марковским процессом. Тогда плотность распределения численности популяции $u(x, t)$ в области пространства параметров, будет удовлетворять уравнению Колмогорова-Фоккера-Планка

$$\partial_t u = -(\nabla, \vec{b}u) + a\Delta u. \quad (1)$$

Здесь $u = u(x, t)$, $a > 0$ коэффициент диффузии, $\vec{b} \neq 0$ - n -мерный - вектор направленного сноса, моделирующий внешнее воздействие, $x = (x_1, \dots, x_n) \in \Omega \subset R^n$, $t \in R_+$, $\nabla = (\partial_{x_1}, \dots, \partial_{x_n})$, $\partial_{x_i} = \partial / \partial x_i$, $\Delta = (\nabla, \nabla)$ - оператор Лапласа по x . Считается, что ограниченная область Ω имеет достаточно гладкую границу $\partial\Omega$, на которой существует единственная точка $s(\vec{b}) \in \partial\Omega$ такая, что вектор внешней нормали к границе в этой точке совпадает как по направлению, так и по знаку с вектором $\vec{b}$, причем вся область находится по одну сторону от $s(\vec{b})$ по направлению $\vec{b}$. Будем считать, что ортогональная система координат в R^n выбрана таким образом, что $s(\vec{b})$ находится в её начале, а $-x_n$ совпадает с направлением вектора $\vec{b}$, так что $\vec{b} = -be_n$, где $b > 0$, а e_n - единичный вектор в направлении x_n .

Для граничных условий непроницаемости

$$(bu - a\nabla u, \nu)|_{\partial\Omega} = 0 \quad (2)$$

где ν - вектор внешней нормали к $\partial\Omega$ существует единственное стационарное решение задачи (1) вида:

$$u(x) = v(x_n) = v_0 e^{-\frac{bx_n}{a}} \quad (3)$$

Математической моделью измеряемых в задачах корреляционной адаптометрии величин являются наборы линейных функций

$$\varphi = \sum_{i=1}^n \varphi_i x_i, \quad \psi = \sum_{i=1}^n \psi_i x_i \quad (4)$$

с ненулевым набором компонент, а моделью определяющих значимые свойства адаптации статистических характеристик (вес корреляционного графа и т. п.) - их коэффициенты корреляции по распределению (3):

$$K(\varphi, \psi) = \frac{M[(\varphi - M\varphi)(\psi - M\psi)]}{(M[(\varphi - M\varphi)^2]M[(\psi - M\psi)^2])^{1/2}} \quad (5)$$

где

$$M\varphi(x_1, \dots, x_n) = \frac{\int \varphi(x)u(x)dx}{\int u(x)dx} \quad (6)$$

- среднее значение функции $\varphi(x)$ по распределению $u(x)$ в области Ω

Рассмотрим задачу исследования зависимости выражения (5) от параметров уравнения (1) с учетом (4).

Параболической аппроксимацией области Ω будем называть параболическую область вида:

$$\Omega_p = \{x: x_n \geq \sum_{i=1}^{n-1} a_i x_i^2\} \quad (7)$$

Расчеты коэффициентов корреляции (5) для распределения (3) будем проводить для области (7), так что в (6) интегрирование осуществляется по области Ω_p вместо Ω . Каждой функции φ из (4) сопоставим вектор $\vec{\varphi} = (\frac{\varphi_1}{\sqrt{a_1}}, \dots, \frac{\varphi_{n-1}}{\sqrt{a_{n-1}}}, 0)$. Угол между

векторами $\vec{\varphi}$ и $\vec{\psi}$ будем обозначать как $\angle \vec{\varphi} \vec{\psi}$.

Для параболической области (7) и функций из (4) справедлива **Теорема[11]**.

- 1) при $b \rightarrow \infty$ и $\vec{\varphi} \neq 0$, $\vec{\psi} \neq 0$ $K(\varphi, \psi) \rightarrow \cos(\angle \vec{\varphi} \vec{\psi})$.
- 2) при $b \rightarrow 0$ и $\varphi_n \psi_n \neq 0$ $K(\varphi, \psi) \rightarrow \text{sign}(\varphi_n \psi_n)$;

Далее рассмотрим поведение дисперсии при увеличении внешней нагрузки на популяцию.

Дисперсию будем вычислять по формуле $Dx = Mx^2 - M^2x$.

Вначале вычислим математическое ожидание Mx . Будем считать, что все показатели в медико-биологических задачах являются неотрицательными величинами. Тогда

$$Mx = \int_0^\infty x e^{-\frac{bx}{a}} dx = -\frac{a}{b} e^{-\frac{bx}{a}} (x-1)|_0^\infty = \frac{a}{b} \quad M^2x = \frac{a^2}{b^2}$$

$$Mx^2 = \int_0^{\infty} x^2 e^{-\frac{b}{a}x} dx = -\frac{a}{b} e^{-\frac{b}{a}x} (x^2 - 2x + 2) \Big|_0^{\infty} = \frac{2a}{b}$$

Окончательно получаем:

$$Dx = \frac{2a}{b} - \frac{a^2}{b^2}.$$

Анализируя полученное выражение можно заметить, что $Dx \rightarrow 0$ при $b \rightarrow \infty$ (для $b \geq a$), т.е. при увеличении внешнего воздействия на популяцию дисперсия уменьшается.

Обычно, критерий интенсивности адаптации популяции к внешним воздействиям рассчитывается путем введения оценки связности анализируемых параметров при помощи веса корреляционного графа G .

2. Больные ожирением

В исследование было включено 285 пациентов в возрасте от 31 до 79 лет, страдающих ожирением 1-3 степени алиментарного генеза без сопутствующих заболеваний и с наличием осложнений функционального или органического характера. Все пациенты в зависимости от степени ожирения и характера сопутствующей патологии были разделены на 3 группы. В 1-ю группу исследования вошли больные ожирением первой степени (индекс массы тела в пределах от 30 до 35). Вторую группу составили пациенты, страдающие ожирением 2-й степени (индекс массы тела в пределах от 35 до 40) в сочетании с функциональными нарушениями различных органов и систем организма (гипертоническая болезнь 1-й степени, астенический синдром и т.д.). В третью группу вошли больные, у которых на фоне ожирения третьей степени (индекс массы тела более 40) констатировались органические поражения (язвенная болезнь, гипертоническая болезнь 3-й ст. и т.д.).

Все пациенты в течение 60 дней получали традиционный курс лечения, направленный на снижение массы тела и коррекцию метаболических и органных нарушений, включавший диетотерапию, индивидуализированный комплекс лечебной физкультуры, симптоматическую или патогенетическую фармакотерапию, адекватную имеющейся патологии.

Используемые варианты были редуцированы по калорийности (1200-1500 ккал), содержали 60-70 г жира и 120-150 г углеводов с исключением моносахаридов, ограничением холестерина, пуриновых оснований и поваренной соли. Лечение пациентов 1-й группы ограничивалось только диетотерапией, 2-й группы – с дополнительным назначением симптоматических средств, 3-й группы – с включением патогенетической медикаментозной терапии. Оценка фактического питания больных проводилась частотным методом с использованием стандартной программы.

В процессе лечения были исследованы следующие параметры: индекс массы тела, общий холестерин, липопротеины низкой плотности, липопротеины высокой плотности, триглицериды, глюкоза, АЛТ, АСТ, креатинин, билирубин. Размерность биохимических показателей – ммоль/л.

Далее нами был вычислен вес корреляционного графа G . Это следующая величина: $G = \sum_{i < j, i, j=1}^n |r_{i,j}|$,

где $r_{i,j}$, где – коэффициент корреляции между i и j параметрами. Вес графа характеризует эффективность лечения: чем он больше падает, тем эффективнее проведено лечение. Полученные данные представлены в табл. 1 и табл. 2.

Табл. 1

Вес корреляционного графа

	До лечения	После лечения
1 группа	8.43	7.24
2 группа	10.87	8.15
3 группа	13.85	11.48

Табл. 2

Суммарная дисперсия

	До лечения	После лечения
1 группа	398	422
2 группа	435	476
3 группа	512	531

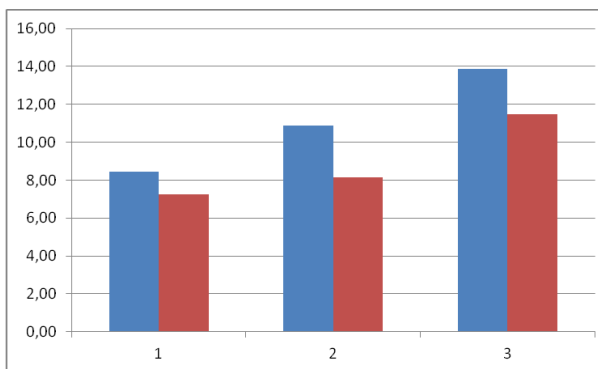


Рис. 1. Вес корреляционного графа

На фоне проведенной диетотерапии величина веса корреляционного графа становится значительно меньше, чем до лечения, причем во всех трех группах больных. Анализ данных показывает также, вес корреляционного графа увеличивается от 1-й к 3-й группе, то есть по мере возрастания тяжести заболевания. Анализ суммарной дисперсии показывает противоположную тенденцию. Сум-

марная дисперсия после проведенного лечения увеличивается, причем во всех трех группах.

3. Операции на сердце

Целью настоящей работы явилась оценка эффективности трех видов операций аортокоронарного шунтирования на сердце методом корреляционной адаптометрии. Первый вид операции – это аортокоронарное шунтирование с кардиopleгией. Кардиopleгия – это временное выключение сердца из кровообращения в целях создания обескровленного поля при вмешательствах на открытых полостях сердца. Второй тип операции – это аортокоронарное шунтирование с параллельным искусственным кровообращением. Третий вид – это аортокоронарное шунтирование на работающем сердце. Каждый из трех видов операций имеет свои преимущества и недостатки и с использованием методики корреляционной адаптометрии, мы оцениваем эффективность проведенных операций.

В исследование было включено 120 больных в возрасте от 39 до 84 лет. Больные были разделены на три группы в соответствии с видом операции. Первая группа состояла из 42 человек, вторая – из 39 человек, третья – из 41 человек. У больных определяли показатели: креатинин, билирубин, АЛТ, АСТ, калий, тропонин, лейкоциты, протромбин, альбумин. Все показатели были измерены в трех временных точках: до операции, первые сутки после операции и седьмые сутки после операции.

Далее были вычислены веса корреляционных графов для всех групп больных в трех временных точках. Уровень значимости оценок коэффициентов корреляции был задан равным 0.02.

В итоге были получены следующие результаты.

Табл. 3

Вес корреляционного графа

	До операции	1 сутки после операции	7 суток после операции
1 группа	6.2	5.31	4.85
2 группа	6.23	5.16	4.36
3 группа	6.38	5.73	5.27

Табл. 4

Суммарная дисперсия

	До операции	1 сутки после операции	7 суток после операции
1 группа	318	356	415
2 группа	314	351	432
3 группа	320	354	410

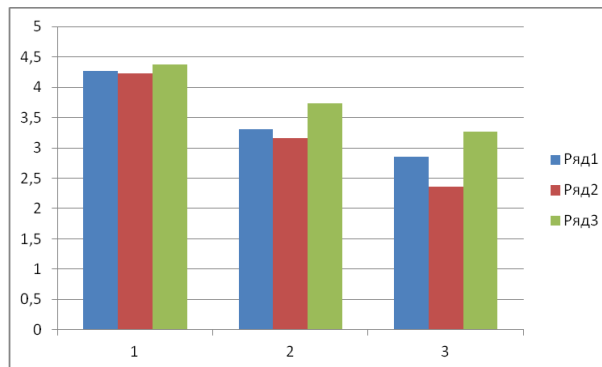


Рис. 2. Вес корреляционного графа

Ряд 1 – вес графа до операции, ряд 2 – вес графа на первые сутки после операции, ряд 3 – вес графа на седьмые сутки после операции

Анализ полученных результатов показал следующее. В результате проведенной операции аортокоронарного шунтирования у всех трех групп пациентов вес корреляционного графа существенно снизился, что говорит о хорошей эффективности проведенной операции. Наибольший эффект наблюдается для пациентов второй группы (аортокоронарное шунтирование с параллельным искусственным кровообращением). Второй по эффективности оказалась операция аортокоронарного шунтирования с кардиopleгией. Динамика суммарной дисперсии наоборот увеличивалась с течением времени, причем у всех трех групп пациентов, что также подтверждает эффективность проведенных операций.

Заключение

Наличие многопараметрических исследований является характерной чертой современных исследований в клинической практике. Одновременно возникает проблема разработки информативных критериев оценки эффективности проведенного лечения, с применением новых математических методов.

Полученные результаты показывают, что вес корреляционного графа является достаточно информативным показателем. Оценка веса корреляционных графов дает возможность довольно просто сравнивать различные методики проведенных операций и выбирать среди них наиболее эффективные. Возможно и использование суммарной дисперсии для оценки эффективности различных методик лечения.

Литература

1. Горбань А.Н., Манчук В.Е., Петушкова Е.В. Динамика корреляций между физиологическими параметрами и эколого-эволюционный

- принцип полифакториальности. // Проблемы экологического мониторинга и моделирование экосистем. Л.: Гидрометеиздат., 1987, Т.10, с. 187-198.
2. *Светличная Г.Н., Смирнова Е.В., Покидышева Л.И.* Корреляционная адаптометрия как метод оценки кардиоваскулярного и респираторного взаимодействия. // Физиология человека, 1997. Т.23, №3, с.58-62.
 3. *Смирнова Е.В., Чеусова Е.П., Зайцева О.И.* Оценка эффективности проводимой терапии методом корреляционной адаптометрии. // Тез. докл. Второй научно – практической конференции «Проблемы информатизации города», 14-16 марта 1995 г. Красноярск 1995, С. 106-108.
 4. *Стрыгина С.О., Дементьев С.Н., Усков В.М., Чернышов Г.И.* Динамика системы корреляционных взаимодействий между физиологическими параметрами больных инфарктом миокарда. Труды конференции “Математика, компьютер, образование (МКО)”, 24-29 января 2000 г., г. Дубна, 2000, вып. 7, с. 685-689.
 5. *Пругов П.В., Волошенко Е.В., Мансурова Т.П., Нефедов В.П.* Оценка эффективности использования клофелина с помощью метода корреляционной адаптометрии. / Материалы VIII Всероссийского съезда анестезиологов-реаниматологов, 11-15 сентября 2002 г., Омск.
 6. *Масаев С.Н., Доррер М.Г.* Оценка системы управления компанией на основе метода адаптационной корреляции к внешней среде. // Проблемы Управления, №3, 2010, с. 45-50.
 7. *Gorban A.N., Smirnova E.V., Tyukina T. A.* Correlations, Risk and Crisis: from Phisiology to Finance, Physica A, Vol.389, Issue 16, 2010, p. 3193-3217.
 8. *Abanov A.G., Polonskaya M.G., Smirnova Y.V.* Correlation between physiological parameters and pathological process in “Global and Regional Ecological Problems”. Transactions of international conference. Krasnoyarsk, 11-14 may 1994. Krasnoyarsk Technical University Press. 1994. P. 473-498.
 9. *Васильев А.В., Мальцев Г.Ю., Хрущева Ю.В., Разжевайкин В.Н., Шпитонков М.И.* Применение метода корреляционной адаптометрии для оценки эффективности лечения больных ожирением. // Вопросы питания. Том 76, №2, 2007, с.36-38.
 10. *Разжевайкин В.Н., Шпитонков М.И., Герасимов А.Н.* Применение метода корреляционной адаптометрии в медико-биологических задачах. // Исследование операций (модели, системы, решения). М.: ВЦ РАН, 2002, с.51-55.
 11. *Разжевайкин В.Н., Шпитонков М.И.* Корреляционная адаптометрия. Модели и приложения к биомедицинским системам. // Математическое моделирование. 2008, т.20, №8, с. 13-27.
 12. *Нохрин Д.Ю., Грибовский Ю.Г., Давыдова Н.А.* Корреляционная адаптометрия микроэлементного состава тканей как метод оценки средового стресса (на примере популяции промысловых рыб минерализованного водоема) // Вопросы нормативно-правового регулирования в ветеринарии. 2018. №4, С. 4-8.
 13. *Беньков А.А., Нагорнев С.Н., Фролков В.К., Еделев Д.А., Корляков О.В.* Информативность метода корреляционной адаптометрии для оценки выраженности корректирующего эффекта сочетанного применения лечебных физических факторов на примере метаболического синдрома. // Физиотерапия, бальнеология и реабилитация. 2023. Т.22, №1, с.5-14.
 14. *Несмелова Н.Н.* Корреляционная адаптометрия как метод изучения адаптации человека к информационной нагрузке. // Современные тенденции развития образования, науки и технологий: Материалы VIII международной научно-практической конференции (Москва, 28.02.2019 г.). Москва. 2019. С. 349-351.
 15. *Гуцина М. Ю., Жуманова Е. Н., Корчажкина Н. Б., Колгаева Д. И.* Эффективность применения импульсной магнитотерапии, высокоинтенсивной магнитной стимуляции мышц тазового дна и внутриматочной плазмотерапии для восстановления рецептивности эндометрия после внутриматочных вмешательств: рандомизированное исследование. // Физиотерапевт, 2024, №1, с. 11-23.
 16. *Gorban A.N., Smirnova E.V., Tyukina T. A.* General laws of adaptation to environmental factors: from ecological stress to financial crisis.// Mathematical modeling of natural phenomena, 2009, pp. 3-52.

Шпитонков Михаил Иванович. Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» РАН, Москва, Россия. Старший научный сотрудник. Кандидат физико-математических наук, доцент. Область научных интересов: математические модели в биологии, медицине, эпидемиологии, физиологии, экологии. E-mail: mixash@bk.ru

The use of correlation adaptometry techniques to evaluate the effectiveness of the treatment

M.I. Shpitonkov

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

Abstract. The method of correlation adaptometry was used to process physiological and biochemical data in patients with varying degrees of obesity during diet therapy, as well as in patients with various types of heart surgery. The effectiveness of diet therapy is shown and the effectiveness of the performed operations is evaluated using the technique of correlation adaptometry.

Keywords: *Kolmogorov-Fokker-Plank equation, correlation adaptometry, correlation graph weight, metabolic syndrome, variance.*

DOI: 10.14357/20790279250206 **EDN:** ONIHEO

References

1. Gorban' A.N., Manchuk V.E., Petushkova E.V. Dinamika korrelyatsij mezhdu fiziologicheskimi parametrami i ekologo-evolucionnyi printsip polifaktorial'nosti [Dynamics of correlations between physiological parameters and ecological-evolutionary principle of polyfactorial] // Problemy ekologicheskogo monitoringa i modelirovanie ekosistem [Ecological monitoring problems and ecosystems modeling]. 1987. V10. P.187-198.
2. Svetlichhaya G.N., Smirnova E.V., Pokidysheva L.I. Korrelyatsionnaya adaptometriya kak metod otsenki kardiovaskulyarnogo i respiratornogo vzaimodejstviya [Correlation adaptometry as a method of evaluating cardiovascular and respiratory interaction] // Human physiology. 1997. Vol.23, No. 3. P. 58–62.
3. Smirnova E.V., Cheusova E.P., Zajtseva O.I. Otsenka effektivnosti provodimoj terapii metodom korrelyatsionnoj adaptometrii [Evaluation of the therapy effectiveness by the correlation adaptometry technique]. Trudy 2 Nauchno-practicheskoy konferentsii "Problemy informatizatsii goroda" [Proc. 2th scientific-practical conference "Problems of the city informatization"]. Krasnoyarsk, 1995. P.106-108.
4. Strygina S.O., Dement'ev S.N., Uskov V.M., Chernyshov G.I. Dinamika sistemy korrelyatsionnykh vzaimodejstvij mezhdu fiziologicheskimi parametrami bol'nykh infarktomiokarda [The dynamics of the system correlation interactions between physiological parameters of patients with myocardial infarction]. Trudy konferentsii Matematika, komp'yuter, obrazovanie [Proc. conference "Mathematics, computer, education"]. Dubna, 2000. —issue 7. —P.685-689.
5. Prugov P.V., Boloshenko E.V., Mansurova T.P., Nefedov V.P. Otsenka effektivnosti ispol'zovaniya klofelina s pomoshch'yu metoda korrelyatsionnoj adaptometrii [Evaluation of effectiveness to use of clonidine by the correlation adaptometry technique]. Trudy VIII Vserossijskogo s'ezda anesteziologov-reanimatologov [Proc. of the VIII all-Russian Congress of anaesthesiologists]. — Omsk, 2002. —P.43-48.
6. Masaev S.N., Dorrer M.G. Otsenka sistemy upravleniya kompaniej na osnove metoda adaptatsionnoj korrelyatsii k vneshnej srede [Assessment of the company's management system based on the method of adaptive correlation to the environment]. // Control Problems. 2010. No. 5. P. 45–50.
7. Gorban A.N., Smirnova E.V., Tyukina T. A. Correlations, Risk and Crisis: from Phisiology to Finance, Physica A, Vol.389, Issue 16, 2010, p. 3193-3217.
8. Abanov A.G., Polonskaya M.G., Smirnova Y.V. Correlation between physiological parameters and pathological process in "Global and Regional Ecological Problems". Transactions of international conference. Krasnoyarsk, 11-14 may 1994. Krasnoyarsk Technical University Press. 1994. P. 473-498.
9. Vasil'ev A.V., Mal'tsev G. Yu., Khrushcheva Yu. V., Razhevajkin V.N., Shpitonkov M.I. Primenenie metoda korrelyatsionnoj adaptometrii dlya otsenki effektivnosti lecheniya bol'nykh ozhireniem [Application of correlation adaptometry technique to assess the effectiveness of treatment of patients with obesity] // The nutriation issues. 2007. Vol. 76, No. 2. P. 36–38.
10. Razhevajkin V.N., Shpitonkov M.I., Gerasimov A.N. Primenenie metoda korrelyatsionnoj adaptometrii v medico-biologicheskikh zadachakh [Application of the correlation adaptometry technique to biomedical tasks] // Trudy CCRAS Issledovanie operatsij (modeli, sistemy, resheniya) [Operations research (models, systems, solutions)]. 2002. P. 51-55.

11. *Razhevajkin V.N., Shpitonkov M.I.* Korrelyatsionnaua adaptometriua. Modeli I prilozheniya k biomeditsinskim sistemam [Correlation adaptometry. Models and applications to biomedical systems] // Mathematical modeling. . 2008. Vol. 20, No. 8. P. 13–27.
12. *Nokhrin D.Yu., Gribovskii Yu.G., Davydova N.A.* Korrelyatsionnaua adaptometriua mikroelementnogo sostava tkanei kak metod otcenki sredovogo ctressa (na primere populyatsii promyslovykh ryb mineralizhovannogo vodoema) [Correlation adaptometry of microelement composition of tissues as a method for assessing environmental stress (using the example of a population of commercial fish in a mineralized reservoir)] // Voprosy normativno-pravovogo regulirovaniya v veterenarii [Issues of regulatory regulation in veterinary medicine]. 2018. №4, P. 4-8.
13. *Benkov A.A., Nagornev S.N., Frolkov V.K., Edelev D.A., Korlyakov O.V.* Informativnost metoda korrelyatsionnoi adaptometrii dlya otcenki vyrazhenosti korriruyushchego effekta sochetannogo primeneniya lechebnykh fizicheskikh faktorov na primere metabolicheskogo sindroma.[The informative value of the correlation adaptometry method for assessing the severity of the corrective effect of the combined use of therapeutic physical factors using the example of metabolic syndrome] // Fizioterapiya, balneologiya I reabilitatsiya [Physiotherapy, balneology and rehabilitation]. 2023. T.22, №1, P.5-14.
14. *Nesmelova N.N.* Korrelyatsionnaua adaptometriua kak metod izycheniya adaptatsii cheloveka k informatsionnoi nagryzhke [Correlation adaptometry as a method of studying human adaptation to information load] // Sovremennye tendentsii razvitiya obrazovaniya, nayki i tekhnologii: Materialy VIII mezhdynarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii (Moskva, 28.02.2019 г.). [Modern trends in the development of education, science and technology: Proceedings of the VIII International Scientific and Practical Conference (Moscow, 02.28.2019)]. Moscow.2019. P. 349-351.
15. *Gushchina M.Yu., Zhumanova E.N., Korchazhkina N.B., Kolgaeva D.I.* Effektivnost primeneniya impulsnoi magnitoterapii, vysokointensivnoi magnitnoi stimulyatsii myshts tazovogo dna I vnutrimatochoiplazmoterapii dlyavosstanovleniya retseptivnosti endometrii posle vnutrimatochnykh vmeshatelstv: randomizirovannoe issledovanie [The effectiveness of pulsed magnetic therapy, high-intensity magnetic stimulation of the pelvic floor muscles and intrauterine plasma therapy to restore endometrial receptivity after intrauterine interventions: a randomized study] // Fizioterapevt. [Physical therapist]. 2024. №1. P. 11-23.
16. *Gorban A.N., Smirnova E.V., Tyukina T. A.* General laws of adaptation to environmental factors: from ecological stress to financial crisis. // Mathematical modeling of natural phenomena, 2009, pp. 3-52.

Mikhail I. Shpitonkov. Candidate of Physico-mathematical Sciences, Federal Research Center “Computer Science and Control” of Russian Academy of Sciences, 44/2 Vavilova str., Moscow, Russia. E-mail: mixash@bk.ru

Системный анализ значимости факторов, влияющих на эпидемиологическую ситуацию по туберкулезу в России

В.Н. Крутько, Т.М. Смирнова

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

Аннотация. Системный анализ взаимосвязей между показателями эпидемической ситуации по туберкулезу (ЭСТ) и экономическими, демографическими и климатическими факторами, показал, что эффективность управления этой ситуацией зависит от всей совокупности факторов, что необходимо учитывать при разработке оптимальных стратегий управления как в Российской Федерации, так и в других странах, характеризующихся значительной неоднородностью региональных характеристик. При значительных различиях между регионами стратегии управления должны базироваться в первую очередь на конкретных значениях динамики исследуемых факторов внутри каждого региона, а не на обобщенных показателях страны в целом. Наряду с экономическими показателями, важными детерминантами ЭСТ в субъектах РФ являются температурный режим и плотность населения. Общий экономический уровень, определяющий качество жизни в субъектах РФ, сильнее влияет на ЭСТ, чем целенаправленное финансирование противотуберкулезных мероприятий.

Ключевые слова: *Российская Федерация, регионы, туберкулез, системный анализ, заболеваемость, смертность, финансирование противотуберкулезных мероприятий, валовый региональный продукт, душевой доход, плотность населения, температурный режим.*

DOI: 10.14357/20790279250207 **EDN:** WVUZOS

Введение

В настоящее время в мире нет ясного понимания эффективности экономических мер для снижения уровня заболеваемости туберкулезом и смертности от него, поскольку данная эффективность может существенно зависеть не только от уровня финансового обеспечения, но и от других значимых факторов – организационно-управленческих, экологических, демографических, инфраструктурных и др. Необходим системный анализ значимости данных факторов. Эпидемиологическая ситуация по туберкулезу (ЭСТ) и детерминирующие ее факторы в России характеризуются существенной неоднородностью в пространстве и времени [1]. Так, например, один из самых неблагополучных по туберкулезу субъектов Российской Федерации (РФ) – Чукотский АО – по объему подушевого финансирования противотуберкулезных мероприятий (ПФПТМ) уступает только Ненецкому АО. В то же время, Республика Дагестан, имеющая самый низкий уровень ПФПТМ среди 85 субъектов

РФ, по заболеваемости активным туберкулезом (З) занимает 72-е место, а по смертности (С) от туберкулеза – 76-е. Поэтому для эффективного управления эпидемиологической ситуацией необходимо провести комплексный анализ по возможности наиболее полной совокупности факторов, значимо влияющих на риски З и С и результативность противотуберкулезных мероприятий в различных регионах страны.

Туберкулез (ТБ) считается болезнью бедняков. От уровня материального благополучия как на индивидуальном, так и на популяционном уровне зависят своевременность диагностики ТБ и оказание помощи больным. Этот эффект показан для стран Европейского региона ВОЗ [2], стран Ближнего Востока и Северной Африки [3], стран Африки южнее Сахары [4], Бразилии [5], Китая [6]. Регионы России крайне неоднородны и по уровню экономического развития, что неизбежно сказывается на ПФПТМ, поскольку противотуберкулезная работа финансируется из бюджетов субъектов РФ.

Важными детерминантами риска З и С являются погодноклиматические условия. Сезонные вариации температуры и влажности воздуха, силы ветра и интенсивности солнечного света могут породить, с соответствующими временными задержками, значительные изменения З [7]. Влияние климата на эпидемическую ситуацию по ТБ неоднозначно. С одной стороны, холодный климат заставляет группы людей проводить много времени в замкнутых пространствах, увеличивая, таким образом, вероятность контакта с туберкулезной палочкой, если в группе есть больной туберкулезом [8]. С другой стороны, для регионов с суровым климатом характерна низкая плотность населения (ПН). Вероятность контакта с больным ТБ увеличивается пропорционально плотности населения [8]. В то же время, низкая ПН затрудняет и удорожает медицинское обеспечение, в частности, увеличению расходов способствует недостаточная транспортная доступность лечебных учреждений [9].

Климат России достаточно разнообразен. Значительная часть наиболее неблагоприятных по ТБ федеральных округов - Сибирского и Дальневосточного - расположена в зоне резко континентального, субарктического и арктического климата.

Средняя ПН по России составляет 8,57 чел./км² [10]. Среди развитых стран меньшую ПН, чем Россия, имеют только Канада, Австралия и Исландия [11]. Распределение населения по территории России крайне неравномерно. ПН в субъектах РФ варьирует от 0,07 чел./км² в Чукотском АО (что вдвое меньше, чем в Гренландии [11]) до 4831 чел./км² в городе федерального значения Москве.

1. Цель исследования

Целью настоящего исследования являлся анализ динамики показателей эпидемиологической ситуации по туберкулезу (ЭСТ) (заболеваемости туберкулезом (З) и смертности от него (С) в субъектах РФ) - оценка значимости взаимосвязей этой динамики с экономическими показателями: подушевое финансирование противотуберкулезных мероприятий (ПФПТМ); валовый региональный продукт на душу населения (ВРПД); душевой доход (ДД), - а также с плотностью населения (ПН) и с температурным режимом (Т).

2. Материалы и методы

В работе проведена оценка значимости взаимосвязей между показателями ЭСТ (З и С) и факторами, определяющими величины этих показателей, - ПФПТМ, ВРПД, ДД, ПН, Т. Для анализа были ис-

пользованы официальные данные Федеральной службы государственной статистики (Росстат) и Федерального центра мониторинга противодействия распространению туберкулеза в Российской Федерации [10, 12 - 17]. Анализ данных проводили с использованием методов корреляционного, регрессионного и дисперсионного анализа (analysis of variance). Статистические расчеты выполнены с помощью пакета Statistica, версия 6.

3. Результаты

Начиная с 2017 г., уровень С был ниже, чем в 1986-1991 гг. - наилучшем для России периоде XX века по этому показателю (рис. 1). Уровень З до сих пор выше исторического минимума - уровня 1990 г. При этом различия между субъектами РФ по З и С были огромны (табл. 1). «Лихие 90-е» привели к резкому подъему З и С. Устойчивое снижение началось лишь с 2000 г. по З и с 2005 г. по С.

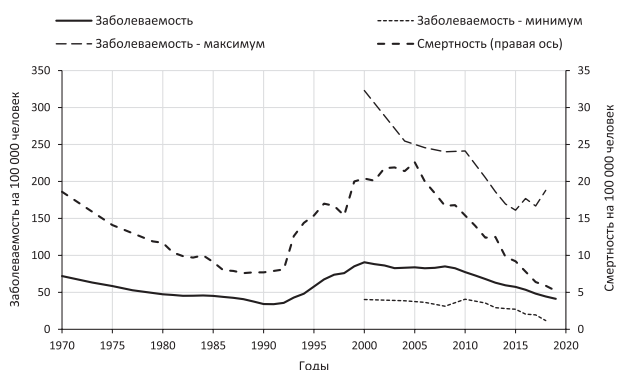


Рис. 1. Динамика заболеваемости активным туберкулезом (среднее по РФ, минимальные и максимальные значения по субъектам РФ) и смертности от туберкулеза (среднее по РФ)

В табл. 1 представлены характеристики различий между субъектами РФ по всем исследованным показателям: отношения максимального среди субъектов значения каждого показателя к минимальному для каждого года, а также оценки различий между субъектами, полученные с помощью дисперсионного анализа (analysis of variance). Каждому региону был присвоен индекс, а затем были выполнены вычисления по схеме однофакторного дисперсионного анализа для фактора «индекс региона». Статистика Фишера F, значения которой приведены в табл. 1, - это отношение факторной дисперсии (factor variance), характеризующей различия между регионами (различия между средними региональными значениями фактора), к остаточной дисперсии (residual variance), характеризующей разброс значений фактора по годам вну-

Табл. 1

Кратность различий между субъектами РФ (отношение максимального значения показателя к минимальному) и оценки влияния фактора «индекс региона»

Показатель	2013 г.	2014 г.	2015 г.	2016 г.	2017 г.	2018 г.	F	p
З	6.4	6.0	5.9	8.6	8.6	15.9	42.72	$<10^{-6}$
С	31.3	31.2	Не опр.	Не опр.	45.6	Не опр.	13.09	$<10^{-6}$
ПФПТМ	37.9	26.0	22.2	22.2	26.1	13.8	72.95	$<10^{-6}$
ВРПД	44.0	55.5	48.7	53.0	54.8	—	94.25	$<10^{-6}$
ДД	5.7	5.2	4.7	4.8	5.1	5.1	56.38	$<10^{-6}$
ПН	65962	66718	67593	68586	69640	70410	18631	$<10^{-6}$

Примечания: — — нет данных; Не опр. — отношение невозможно определить, т.к. минимальное значение равно 0

три региона (отклонения ежегодных значений фактора от регионального среднего). Почти для всех показателей факторная дисперсия оказалась на порядок больше остаточной, а для ПН — на 4 порядка. Очень низкие уровни значимости p свидетельствуют о крайне высоких различиях между регионами.

Для показателя T расчет соотношения максимального и минимального уровней не имеет смысла, т.к. эти значения имеют разный знак: в наиболее теплых регионах России средняя температура января положительна, а в остальных — отрицательна. Уровень значимости различий между регионами по этому показателю имеет тот же порядок, что и для экономических показателей ($F=41.56$, $p<10^{-6}$).

Снижение $З$ в 2013-2018 гг. имело место в 84 из 85 субъектов РФ — как при исходно высоком, так и при исходно низком уровне $З$. В 75 регионах линейный тренд $З$ был значим с $p<0.05$. Единственный субъект РФ, где наблюдался значимый рост $З$ ($r=0.835$, $p=0.019$) — Чукотский АО (рис. 2).

—*— Чукотский АО —□— Респ. Тыва —◇— г. Москва —▲— Приморский край

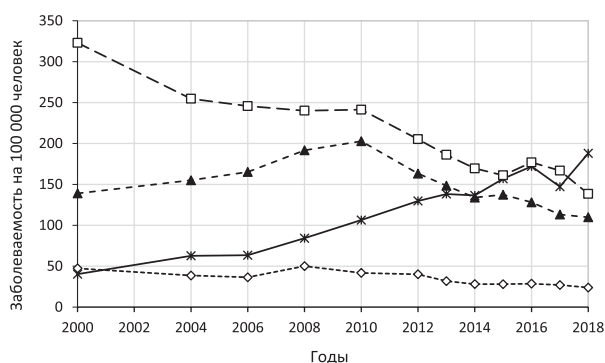


Рис. 2. Динамика заболеваемости туберкулезом в отдельных субъектах РФ

На рис. 2 представлена динамика $З$ в трех регионах, имевших в 2018 г. наихудшие показатели среди субъектов РФ, а также в Москве — одном из наиболее благополучных регионов (в 2013-2018 гг. 84-е место по $З$ и 81-е по $С$). Как видно на этом

рисунке, в этих регионах к началу исследуемого периода были неодинаковы и уровни $З$, и сложившиеся тенденции ее изменения. В период после 2012 г. $З$ снижалась высокими темпами в Приморском крае и Республике Тыва. В Москве снижение $З$ было в 4 раза более медленным, чем в этих регионах, но также статистически значимым. Чукотский АО — единственный регион России, где имел место устойчивый рост $З$. Зачем

Тенденция к снижению $С$ в 2013-2018 гг. имела место в 81 субъекте РФ, из них в 71 — с $p<0.05$. Тенденции к росту $С$ не наблюдалось ни в одном из регионов. В Республике Тыва имел место скачкообразный рост $С$ (с 6.3/100000 чел. в 2016 г. до 45.6/100000 чел. в 2017 г.; снижение в 2018 г. было незначительным), из-за чего для этого региона оказался близким к достоверному тренд в сторону повышения ($p=0.07$). Примечательно, что рост $С$ там произошел через 2 года после резкого (на 28% по сравнению с предыдущим годом) снижения в 2015 г. ПФПТМ в данном регионе. В 2016 г. в этом регионе повысилась и $З$ (рис.2), но с 2017 г. она начала снижаться параллельно увеличению финансирования. Данный пример говорит о том, что эффекты от проведения тех или иных мероприятий по снижению $З$ и $С$ могут быть отсрочены на несколько лет и это необходимо учитывать при анализе эффективности мероприятий.

Для проверки гипотезы о комплексном влиянии экономических, природно-климатических и демографических факторов на ЭСТ был проведен корреляционный анализ связей $З$ и $С$ с ВРПД, ДД, ПФПТМ, ТР и ПН (таблица 2). Поскольку распределение всех перечисленных показателей значительно отличается от нормального, был использован ранговый коэффициент корреляции Спирмена — R , который в этом случае лучше отражает монотонные связи между переменными, чем коэффициент корреляции Пирсона — r . Вычисления выполнены в двух вариантах. В первом случае были использованы все значения показателей по всем регионам за каждый

Табл. 2

Коэффициенты корреляции между показателями ЭСТ и экономическими, климатическими и демографическими показателями для субъектов РФ

Показатель 1	Показатель 2	Все данные		Региональные средние	
		R	p	R	p
З	ВРПД	0.004	0.935	0.073	0.509
	ДД	-0.186	$5.56 \cdot 10^{-6}$	-0.064	0.563
	ПФПТМ	0.412	$2.79 \cdot 10^{-22}$	0.587	$3.56 \cdot 10^{-9}$
	ПН	-0.452	$5.34 \cdot 10^{-27}$	-0.501	$1.05 \cdot 10^{-6}$
	Т	-0.606	$5.93 \cdot 10^{-26}$	-0.589	$4.62 \cdot 10^{-9}$
С	ВРПД	0.008	0.872	0.057	0.603
	ДД	-0.140	0.002	-0.033	0.764
	ПФПТМ	0.255	$5.42 \cdot 10^{-9}$	0.435	$3.16 \cdot 10^{-5}$
	ПН	-0.315	$3.93 \cdot 10^{-13}$	-0.366	$5.75 \cdot 10^{-4}$
	Т	-0.421	$6.32 \cdot 10^{-12}$	-0.433	$4.43 \cdot 10^{-5}$

год исследования, во втором – региональные средние показателей за период исследования.

В обоих вариантах коэффициенты корреляции показателей ЭСТ с неэкономическими были достоверно отрицательны, что вполне ожидаемо: чем теплее в регионе зима и чем выше плотность населения, тем ниже З и С, – поскольку более высокая плотность населения в России тесно связана с более высоким уровнем жизни. Менее ясны полученные оценки связи З и С с экономическими показателями. Отрицательный коэффициент корреляции З и С с ДД статистически значим только в том случае, если учитываются данные за каждый год. Связь ВРПД с эпидемиологическими показателями оказалась недостоверной. Такой результат отчасти объясним за счет того, что некоторые регионы с высоким ВРПД находятся в зоне сурового климата (в том числе Чукотский АО, который по ВРПД занимает 4-е место среди субъектов РФ и опережает Москву), а регионы Северо-Кавказского и Южного федеральных округов, имеющие низкий ВРПД, относятся к наиболее теплым. Парадоксальной и контринтуитивной представляется положительная корреляция З и С с ПФПТМ, тем более, что, как показано выше на примере Республики Тыва, рост ПФПТМ приводил к снижению З, а уменьшение ПФПТМ – к росту З. Однако, если учесть данные табл. 1, свидетельствующие о крайне высоких различиях между регионами по обоим этим показателям, становится ясно, что в коэффициент корреляции между З, С и ПФПТМ очень большой вклад вносят различия между средними региональными уровнями и значительно меньший – различия этих показателей в каждом отдельном регионе в разные годы.

Рис. 3 показывает, что между региональными средними уровнями ПФПТМ и З действительно имеется прямая корреляция. По-видимому, она объясняется тем, что в каждом регионе расходы на противотуберкулезную деятельность планируются в зависимости от текущего уровня З, т.е. эта корреляция характеризует скорее эффект влияния З на ПФПТМ, а не наоборот. Поэтому для того, чтобы оценить реальную эффективность целевого финансирования, необходимо исследовать корреляционные связи З с ПФПТМ, а также с другими экономическими показателями в каждом регионе отдельно.

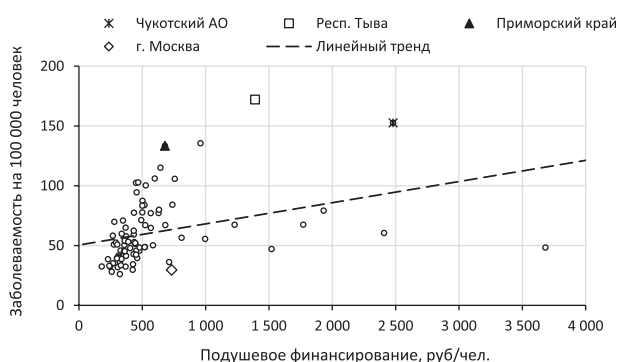


Рис. 3. Средние уровни подушевого финансирования противотуберкулезных мероприятий и заболеваемости туберкулезом в субъектах РФ в 2013-2018 гг

Как видно на рис. 3, разброс данных относительно линии регрессии очень высок. В Приморском крае и Москве уровни ПФПТМ были близки, но уровни З различались в 4.5 раза. Очевидно, что различия эффективности целевого финансирования были связаны с неодинаковым уровнем экономического развития этих субъектов РФ. Москва в 2013-2018 гг. занимала 6-е место среди субъектов

РФ по ВРПД и 4-е – по ДД, Приморский край, соответственно, 29-е и 18-е. К преимуществам Москвы относятся также более теплый климат (часть населенных пунктов Приморского края приравнена к районам Крайнего Севера) и более развитая инфраструктура здравоохранения, в частности, лучшая транспортная доступность. В Чукотском АО уровень ПФПТМ был в 3.4 раза выше, чем в Москве, но З при этом была в среднем в 5.1 раза выше и, в отличие от всех прочих субъектов РФ, имела достоверную тенденцию к росту (см. рис. 2). Очевидно, что для этого региона уровень финансирования был недостаточен для того, чтобы компенсировать эффекты сурового климата, а также сложность и дороговизну транспортного обеспечения (для многих населенных пунктов доступ к лечебным учреждениям возможен только с помощью санитарной авиации).

Характер связи между С и ПФПТМ был аналогичен связи З с ПФПТМ. Поэтому для оценки влияния целевого финансирования на С также необходим анализ для каждого региона отдельно.

Для анализа связей между эпидемиологическими и экономическими показателями была использована модель линейной регрессии:

$$y = a + b \cdot x, \quad (1)$$

где x – независимая переменная (экономический показатель), y – зависимая переменная (З или С), а a и b – постоянные коэффициенты, b – коэффициент чувствительности зависимой переменной к независимой.

Анализ связи З с экономическими показателями отдельно по каждому субъекту РФ позволил

выявить положительное влияние всех этих показателей на снижение заболеваемости. Коэффициент чувствительности З к ПФПТМ для 26 регионов был достоверен и отрицателен. Отрицательный коэффициент чувствительности отражает снижение З с ростом финансирования, т.е. целевой эффект ПФПТМ. Ни одного случая значимой положительной корреляции между ПФПТМ и З на уровне регионов не выявлено. В таблице 3 приведены значения коэффициентов чувствительности З к изменениям ПФПТМ (10 субъектов с наибольшей чувствительностью), а также коэффициенты чувствительности З к ВРПД и ДД. Для этих показателей достоверная корреляция с З имела место чаще, чем для ПФПТМ. Для ВРПД отрицательная корреляция с З была значима с $p < 0.05$ для 64 регионов, ни одного случая значимой положительной корреляции не выявлено. Для ДД достоверная отрицательная корреляция с З отмечена для 69 регионов, а единственный случай достоверной положительной корреляции относится к Чукотскому АО. ДД в 2013-2018 гг. в этом регионе рос достоверно и почти линейно ($r=0.996$), но и З – тоже ($r=0.974$), поэтому корреляция между этими показателями была достоверна и положительна. Отрицательным коэффициент корреляции между ДД и З был в тех регионах, где рост ДД обеспечивал снижение заболеваемости. Но в Чукотском АО уровень ДД, несмотря на постоянное его повышение (отчасти съеданное ростом цен), явно был недостаточен для компенсации всех неблагоприятных факторов – не только природно-климатических (один из самых холодных регионов с одной из самых длинных зим – 10 мес., самая высокая скорость ветра, ми-

Табл. 3

Коэффициенты чувствительности заболеваемости активным туберкулезом к изменениям экономических характеристик субъектов РФ. Субъекты ранжированы по убыванию чувствительности к ПФПТМ

Рейтинг	Субъект РФ	Коэффициенты чувствительности З к экономическим показателям:		
		ПФПТМ	ВРПД	ДД
1	Приморский край	-0.232*	-0.324**	-3.704**
2	Костромская обл.	-0.200	-0.231*	-1.959*
3	Самарская обл.	-0.194*	-0.157	-7.484
4	Саратовская обл.	-0.182	-0.243**	-3.153**
5	Чувашская Респ.	-0.172*	-0.423***	-4.318**
6	Респ. Адыгея	-0.171	-0.366***	-2.916***
7	Респ. Бурятия	-0.161**	-1.025*	-6.856*
8	Брянская обл.	-0.160*	-0.316***	-3.652***
9	Ставропольский край	-0.152	-0.237***	-3.701***
10	Астраханская обл.	-0.141	-0.064	-2.547

Примечание: * - $p < 0.05$; ** - $p < 0.05$; *** - $p < 0.001$.

Табл. 4

Коэффициенты чувствительности смертности от туберкулеза к изменениям экономических характеристик субъектов РФ. Субъекты ранжированы по убыванию чувствительности к ПФПТМ

Рейтинг	Субъект РФ	Коэффициенты чувствительности С к экономическим показателям:		
		ПФПТМ	ВРПД	ДД
1	Респ. Хакасия	-0,111	-0,340	-11,260*
2	Томская обл.	-0,079	-0,161	-3,471
3	Еврейская авт. обл.	-0,061	-0,163*	-3,451
4	Ростовская обл.	-0,055*	-0,056*	-0,976**
5	Саратовская обл.	-0,055	-0,091**	-1,194**
6	Красноярский край	-0,054	-0,042	-2,006*
7	Нижегородская обл.	-0,053*	-0,071**	-1,093**
8	Астраханская обл.	-0,049	-0,067*	-2,016
9	Самарская обл.	-0,043*	-0,078**	-3,179
10	Ставропольский край	-0,039*	-0,049***	-0,887**

Примечание: * - $p < 0.05$; ** - $p < 0.05$; *** - $p < 0.001$.

нимум часов солнечного освещения, самая низкая плотность населения и плотность автомобильных дорог с твердым покрытием), но и низкого качества жизни населения (по ОПЖ до 2017 г. включительно Чукотский АО устойчиво занимал предпоследнее место в России, а в 2018 г. сместил Туву с традиционно последнего места).

Большее число достоверных отрицательных корреляций 3 с ДД и ВРПД, по сравнению с ПФПТМ, означает, что связь 3 с общими показателями экономического благополучия более весома, чем с целевым финансированием противотуберкулезных мероприятий.

Сходные результаты были получены и при анализе чувствительности С к экономическим показателям. Все коэффициенты чувствительности, значимые с $p < 0.05$, были отрицательны (19 для ПФПТМ, 49 для ВРПД и 54 для ДД), ни одного значимого положительного коэффициента не выявлено. Как и в случае 3, связь С с ДД и ВРПД оказалось более тесной, чем с ПФПТМ.

Для проверки гипотезы о зависимости ПФПТМ от уровня 3 и экономического развития региона была использована модель множественной линейной регрессии:

$$\text{ПФПТМ} = a + b_1 \cdot 3 + b_2 \cdot \text{ВРПД} + b_3 \cdot \text{ДД}, \quad (2)$$

где a , b_1 , b_2 , b_3 – постоянные коэффициенты (b_1 , b_2 , b_3 – коэффициенты чувствительности).

Переменные, включенные в формулу (2), имеют размерность:

ПФПТМ – руб./чел,
3 – на 100 000 чел.,

ВРПД – тыс. руб./чел.,
ДД – тыс. руб./чел. в месяц.

Получены следующие оценки параметров модели:

$$\begin{aligned} a &= -537.77, p = 3.35 \cdot 10^{-17}; \\ b_1 &= 6.56, p = 5.87 \cdot 10^{-30}; \\ b_2 &= 0.31, p = 2.50 \cdot 10^{-15}; \\ b_3 &= 21.40, p = 2.42 \cdot 10^{-18}. \end{aligned}$$

Все коэффициенты чувствительности положительны и достоверно отличны от 0. Точность линейной аппроксимации (коэффициент детерминации²) составил 0.681. Это означает, что 68,1% вариации ПФПТМ в регионах за исследуемый период времени можно связать с уровнями 3, ВРПД и ДД. Это означает, что уровень финансирования противотуберкулезных мероприятий в регионах зависит как от текущего уровня заболеваемости, так и от экономических возможностей региона.

4. Обсуждение

Проведенный системный анализ показал, что между субъектами РФ имеются очень большие различия как по ЭСТ и тенденциям ее развития, так и по экономическим, климатическим и демографическим характеристикам регионов, которые могут детерминировать эту ситуацию. Вследствие этих различий оценить эффективность целевого финансирования противотуберкулезных мероприятий можно только для каждого региона отдельно с учетом всех прочих характерных для него детерминант заболеваемости и смертности.

Выявленная отрицательная корреляция эпидемиологических показателей с ПН и Т представляется вполне закономерной. Чем ниже плотность населения (а это тесно коррелирует с уровнем жизни) и чем холоднее зима в регионе, тем выше З и С от туберкулеза.

В силу крайне высоких различий между регионами по всем детерминантам ЭСТ для корректного выявления влияния ПФПТМ на З и С необходим анализ связей между этими показателями отдельно для каждого конкретного региона.

Меньшее количество достоверных отрицательных корреляционных связей С и З с ПФПТМ, по сравнению с ВРПД и ДД, может быть свидетельством того, что общий экономический уровень, определяющий качество жизни в регионах, сильнее и/или быстрее влияет на ЭСТ, чем целенаправленное финансирование противотуберкулезных мероприятий. ДД можно рассматривать как индикатор качества жизни на индивидуальном уровне, а ВРПД – на популяционном. Хорошо известно, что индивидуальный уровень дохода и определяемые им качество питания, бытовые условия и уровень доступности платных медицинских и оздоровительных услуг влияют на индивидуальное здоровье. В то же время наличие лечебно-профилактических учреждений, их оснащение, обеспеченность квалифицированными кадрами и транспортная доступность в большей степени зависят от уровня экономического развития региона в целом, т.е. ВРПД. Необходимо также учитывать, что реакция индивидуального и популяционного здоровья на изменения ДД и ВРПД может быть очень быстрой, без задержки во времени. Поэтому характер связи между таким возмущающим воздействием и переменными отклика, т.е. показателями здоровья, может быть очень близким к линейному. В то же время, эффект противотуберкулезных мероприятий может проявляться со значительной задержкой, причем неодинаковой для разных видов мероприятий, что обуславливает нелинейный характер переменной отклика.

Использованные в данном исследовании модели линейной регрессии, безусловно, являются крайне упрощенными. Для построения более точных моделей, пригодных для оценки эффективности противотуберкулезных мероприятий, необходимы данные, позволяющие оценить как затраты, так и отклик на различные противотуберкулезные мероприятия. Более детальным должно быть и описание природно-климатических факторов. Например, действующий в России нормативный документ по строительной климатологии [18] включает широкий перечень климатических па-

раметров, которые необходимо учитывать при проектировании строительства и эксплуатации зданий, как жилых, так и ЛПУ. Этот перечень включает, отдельно для теплого и для холодного периода года: температуру воздуха; ее среднюю и максимальную амплитуду (по месяцам); скорость ветра; барометрическое давление; количество осадков. Очевидно, что значения этих параметров влияют на величину базового финансирования в регионах, обеспечивающего эпидемиологическое благополучие.

Для анализа нелинейных связей эпидемиологических показателей с экономическими и неэкономическими детерминантами ЭСТ необходимы значительно более длинные ряды данных, чем использованные в данном исследовании.

Ожидаемый результат проведенного исследования – повышение эффективности процессов управления ЭСТ. Найденные в работе закономерности и взаимосвязи должны учитываться при планировании мероприятий по управлению ЭСТ как в РФ, так и в других странах мира, особенно в тех, в которых имеются значительные различия в экологических, экономических и демографических характеристиках разных регионов.

Заключение

Системный анализ взаимосвязей между показателями ЭСТ и экономическими, демографическими и климатическими факторами, показал, что эффективность управления этой ситуацией зависит от всей совокупности факторов, что необходимо учитывать при разработке оптимальных стратегий управления как в Российской Федерации, так и в других странах, характеризующихся значительной неоднородностью региональных характеристик.

При значительных различиях между регионами стратегии управления должны базироваться в первую очередь на конкретных значениях динамики исследуемых факторов внутри каждого региона, а не на обобщенных показателях страны в целом.

Для Российской Федерации в целом и для большинства ее субъектов в последние годы было характерно улучшение эпидемиологической ситуации по туберкулезу. В настоящее время компенсировано резкое повышение заболеваемости и смертности, имевшее место в 90-е годы прошлого века.

Между субъектами Российской Федерации имеются очень большие различия как по заболеваемости и смертности от туберкулеза, так и по экономическим, климатическим и демографическим показателям, которые могут влиять на эпидемиологические показатели.

Наряду с экономическими показателями, важными детерминантами ЭСТ в субъектах РФ являются температурный режим и плотность населения.

Подушевое финансирование противотуберкулезных мероприятий в субъектах РФ зависит от уровня заболеваемости туберкулезом и экономического состояния регионов.

Общий экономический уровень, определяющий качество жизни в субъектах РФ, сильнее влияет на ЭСТ, чем целенаправленное финансирование противотуберкулезных мероприятий.

Эффекты от проведения тех или иных мероприятий по снижению З и С могут быть отсрочены на несколько лет и это необходимо учитывать при анализе эффективности мероприятий.

Между показателями ЭСТ и финансированием существуют как прямые, так и обратные взаимосвязи – не только З и С зависят от уровня финансирования, но и уровень финансирования зависит от З и С.

Список обозначений

АО – автономный округ

ВОЗ – Всемирная организация здравоохранения

ВРПД – валовый региональный продукт на душу населения

ДД – душевой доход

З – заболеваемость

ЛПУ – лечебно-профилактическое учреждение

ПН – плотность населения

ПФПТМ – подушевое финансирование противотуберкулезных мероприятий

РФ – Российская Федерация

С – смертность

Т – температура воздуха

ТБ – туберкулез

ЭСТ – эпидемическая ситуация по туберкулезу

Литература

1. Peter K. Yablonskii, Alexandr A. Vizel, Vladimir B. Galkin, Marina V. Shulgina. Tuberculosis in Russia. Its History and Its Status Today. *Am J Respir Crit Care Med*. 2015 Feb 15;191(4):372-6.
2. George B. Ploubidis, Melissa J. Palmer, Charlotte Blackmore, Tek-Ang Lim, Davide Manissero, Andreas Sandgren, Jan C. Semenza. Social Determinants of Tuberculosis in Europe: A Prospective Ecological Study. *Eur Respir J*. 2012 Oct;40(4):925-30.
3. Eltayeb D., Pietersen E., Engel M., Abdullahi L. Factors associated with tuberculosis diagnosis and treatment delays in Middle East and North Africa: a systematic review. *East Mediterr Health J*. 2020 Apr 16;26(4):477-486.
4. Fentabil Getnet, Meaza Demissie, Nega Assefa, Bizatu Mengistie, Alemayehu Worku. Delay in Diagnosis of Pulmonary Tuberculosis in Low-And Middle-Income Settings: Systematic Review and Meta-Analysis. *BMC Pulm Med*. 2017 Dec 13;17(1):202.
5. Daniel Barros de Castro, Elvira Maria Godinho de Seixas Maciel, Megumi Sadahiro, Rosemary Costa Pinto, Bernardino Cláudio de Albuquerque, José Uelers Braga. Tuberculosis Incidence Inequalities and Its Social Determinants in Manaus from 2007 to 2016. *Int J Equity Health*. 2018 Dec 29;17(1):187.
6. Qi Wang, Liang Guo, Jing Wang, Leijie Zhang, Wanqi Zhu, Yan Yuan, Juansheng Li. Spatial Distribution of Tuberculosis and Its Socioeconomic Influencing Factors in Mainland China 2013-2016. *Trop Med Int Health*. 2019 Sep;24(9):1104-1113.
7. Yuanyuan Xiao, Limei He, Ying Chen, Qinying Wang, Qiong Meng, Wei Chang, Lifeng Xiong, Zhen Yu. The Influence of Meteorological Factors on Tuberculosis Incidence in Southwest China From 2006 to 2015. *Sci Rep*. 2018 Jul 3;8(1):10053.
8. Hans L. Rieder. Epidemiologic Basis of Tuberculosis Control. First edition 1999. International Union against Tuberculosis and Lung Disease 68, boulevard Saint-Michel, 75006 Paris.
9. Stracker N., Hanrahan C., Mmolawa L., Nonyane B., Tampi R., Tucker A., West N., Lebina L., Martinson N., Dowdy D. Risk Factors for Catastrophic Costs Associated With Tuberculosis in Rural South Africa. *Int J Tuberc Lung Dis* 2019; 23(6):756-763.
10. Регионы России. Социально-экономические показатели. 2019: Стат. сб. / Росстат. М., 2019. 1204 с. URL: https://www.gks.ru/storage/mediabank/Region_Pokaz_2019.pdf.
11. World Development Indicators 2020. Last Updated Date 09.04.2020. URL: <http://api.worldbank.org/v2/en/indicator/EN.POP.DNST?downloadformat=excel>.
12. Эпидемическая ситуация по туберкулезу в Российской Федерации в 2018 году. URL: https://mednet.ru/images/materials/CMT/2018_god_tuberkulez_epidsituaciya.pdf
13. Эпидемическая ситуация по туберкулезу в Российской Федерации в 2016 г. URL: https://mednet.ru/images/stories/files/2016_god_tuberkulez_epidsituaciya.pdf
14. Эпидемическая ситуация по туберкулезу в Российской Федерации в 2014 г. URL: <https://mednet.ru/images/stories/files/CMT/2014tb.pdf>

15. Ресурсы и деятельность противотуберкулезных организаций Российской Федерации в 2013-2014 годах. URL: https://mednet.ru/images/materials/CMT/rf_tuberkulez_resursy_2013-2014.pdf
16. Ресурсы и деятельность противотуберкулезных организаций Российской Федерации в 2015-2016 годах. URL: https://mednet.ru/images/stories/files/2016_god_tuberkulez_epidsituaciya.pdf
17. Ресурсы и деятельность противотуберкулезных организаций Российской Федерации в 2017-2018 годах. URL: https://mednet.ru/images/materials/CMT/tb-res_2017-2018.pdf
18. Свод правил Строительная климатология. Актуализированная редакция СНиП 23-01-99*. Введено в действие 14.06.2018. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200095546>

Крутько Вячеслав Николаевич. Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» РАН, г. Москва, Россия. Заведующий отделом. Доктор технических наук, кандидат биологических наук, профессор. Область научных интересов: медицинская информатика и компьютерные системы для оценки и прогноза здоровья и старения. E-mail: krutkovn@mail.ru.

Смирнова Татьяна Михайловна. Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» РАН, г. Москва, Россия. Главный специалист. Область научных интересов: медицинская информатика, медицинская статистика, эпидемиология. E-mail: smirnova.tatyana@gmail.com.

A systems analysis of the significance of factors influencing the epidemiological situation of tuberculosis in Russia

V.N. Krut'ko, T.M. Smirnova

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

Abstract. A systematic analysis of the interrelationships between the indicators of the epidemic situation of tuberculosis (EST) and economic, demographic and climatic factors has shown that the effectiveness of managing this situation depends on the totality of factors that must be taken into account when developing optimal management strategies both in the Russian Federation and in other countries characterized by significant heterogeneity of regional characteristics. With significant differences between regions, management strategies should be based primarily on specific values of the dynamics of the studied factors within each region, rather than on generalized indicators of the country as a whole. Along with economic indicators, important determinants of EST in the subjects of the Russian Federation are the temperature regime and population density. The general economic level, which determines the quality of life in the constituent entities of the Russian Federation, has a stronger impact on EST than targeted financing of anti-tuberculosis measures.

Keywords: *Russian Federation, regions, tuberculosis, system analysis, morbidity, mortality, financing of anti-tuberculosis measures, gross regional product, per capita income, population density, temperature regime.*

DOI: 10.14357/20790279250207 **EDN:** WVUZOS

References

1. Peter K. Yablonskii, Alexandr A. Vizel, Vladimir B. Galkin, Marina V. Shulgina. Tuberculosis in Russia. Its History and Its Status Today. *Am J Respir Crit Care Med*. 2015 Feb 15;191(4):372-6.
2. George B. Ploubidis, Melissa J. Palmer, Charlotte Blackmore, Tek-Ang Lim, Davide Manissero, Andreas Sandgren, Jan C. Semenza. Social Determinants of Tuberculosis in Europe: A Prospective Ecological Study. *Eur Respir J*. 2012 Oct;40(4):925-30.
3. Eltayeb D., Pietersen E., Engel M., Abdullahi L. Factors associated with tuberculosis diagnosis and treatment delays in Middle East and North Africa: a systematic review. *East Mediterr Health J*. 2020 Apr 16;26(4):477-486.
4. Fentabil Getnet, Meaza Demissie, Nega Assefa, Bizatu Mengistie, Alemayehu Worku. Delay in Diagnosis of Pulmonary Tuberculosis in Low-And Middle-Income Settings: Systematic Review and Meta-Analysis. *BMC Pulm Med*. 2017 Dec 13;17(1):202.

5. *Daniel Barros de Castro, Elvira Maria Godinho de Seixas Maciel, Megumi Sadahiro, Rosemary Costa Pinto, Bernardino Cláudio de Albuquerque, José Ueleres Braga.* Tuberculosis Incidence Inequalities and Its Social Determinants in Manaus from 2007 to 2016. *Int J Equity Health.* 2018 Dec 29;17(1):187.
6. *Qi Wang, Liang Guo, Jing Wang, Leijie Zhang, Wanqi Zhu, Yan Yuan, Juansheng Li.* Spatial Distribution of Tuberculosis and Its Socioeconomic Influencing Factors in Mainland China 2013-2016. *Trop Med Int Health.* 2019 Sep;24(9):1104-1113.
7. *Yuanyuan Xiao, Limei He, Ying Chen, Qinying Wang, Qiong Meng, Wei Chang, Lifeng Xiong, Zhen Yu.* The Influence of Meteorological Factors on Tuberculosis Incidence in Southwest China From 2006 to 2015. *Sci Rep.* 2018 Jul 3;8(1):10053.
8. *Hans L. Rieder.* Epidemiologic Basis of Tuberculosis Control. First edition 1999. International Union against Tuberculosis and Lung Disease 68, boulevard Saint-Michel, 75006 Paris.
9. *Stracker N., Hanrahan C., Mmolawa L., Nonyane B., Tampi R., Tucker A., West N., Lebina L., Martinson N., Dowdy D.* Risk Factors for Catastrophic Costs Associated With Tuberculosis in Rural South Africa. *Int J Tuberc Lung Dis* 2019; 23(6):756-763.
10. Регионы России. Социально-экономические показатели. 2019: Стат. сб. / Росстат. М., 2019. 1204 с. URL: https://www.gks.ru/storage/mediabank/Region_Pokaz_2019.pdf
11. World Development Indicators 2020. Last Updated Date 09.04.2020. URL: <http://api.worldbank.org/v2/en/indicator/EN.POP.DNST?downloadformat=excel>
12. Эпидемическая ситуация по туберкулезу в Российской Федерации в 2018 году. URL: https://mednet.ru/images/materials/CMT/2018_god_tuberkulez_epidsituaciya.pdf
13. Эпидемическая ситуация по туберкулезу в Российской Федерации в 2016 г. URL: https://mednet.ru/images/stories/files/2016_god_tuberkulez_epidsituaciya.pdf
14. Эпидемическая ситуация по туберкулезу в Российской Федерации в 2014 г. URL: <https://mednet.ru/images/stories/files/CMT/2014tb.pdf>
15. Ресурсы и деятельность противотуберкулезных организаций Российской Федерации в 2013-2014 годах. URL: https://mednet.ru/images/materials/CMT/rf_tuberkulez_resursy_2013-2014.pdf
16. Ресурсы и деятельность противотуберкулезных организаций Российской Федерации в 2015-2016 годах. URL: https://mednet.ru/images/stories/files/2016_god_tuberkulez_epidsituaciya.pdf
17. Ресурсы и деятельность противотуберкулезных организаций Российской Федерации в 2017-2018 годах. URL: https://mednet.ru/images/materials/CMT/tb-res_2017-2018.pdf
18. Свод правил Строительная климатология. Актуализированная редакция СНиП 23-01-99. Введено в действие 14.06.2018. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200095546>

Vyacheslav N. Krut'ko. Professor, Doctor of Technical Sciences, Candidate of Biological Sciences. Federal Research Center "Computer Science and Control" of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia. Research interests: medical informatics and computer systems for the assessment and prognosis of health and aging. E-mail: krutkovn@mail.ru

Tatiana M. Smirnova. Federal Research Center "Computer Science and Control" of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia. Research interests: medical informatics, medical statistics, epidemiology. E-mail: smirnova.tatyana@gmail.com

Информационные технологии

Увеличение быстродействия операций в СУБД с помощью аппаратных ускорителей FPGA

А.В. СОЛОВЬЕВ

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

Аннотация. В статье выполнен обзор способа ускорения операций обработки данных в СУБД с помощью FPGA. Выполнен обзор возможностей FPGA, архитектур использования FPGA, рассмотрены практические примеры использования FPGA. Определены достоинства и недостатки применения FPGA. Отмечен ряд проблем и альтернативных технологий, которые существенно загромождали применение FPGA в промышленных СУБД и системах хранения данных. Применение FPGA для ускорения обработки данных в СУБД, можно утверждать, что подход позволяет ускорять операции в БД, связанные с обработкой запросов, сжатием и шифрованием данных, параллельной обработкой данных. Однако, применение FPGA также усложняет систему в целом, не позволяет гибко и быстро перенастраивать функциональные возможности системы, увеличивает общую стоимость владения. В дальнейших исследованиях планируется рассмотреть альтернативные технологии ускорения операций обработки данных.

Ключевые слова: системы управления базами данных, СУБД, FPGA, ускорения операций обработки данных.

DOI: 10.14357/20790279250208 **EDN:** XQCEYD

Введение

В условиях цифровой трансформации экономики и общества критичными становятся практически все операции добавления новых и обработки хранящихся данных для поддержания высокой согласованности данных с одновременной высокой доступностью этих данных.

На практике это означает, что самые последние изменения в данных должны быть доступны в режиме онлайн всем пользователям, имеющим права доступа к этим данным.

В этой связи, ведущие производители СУБД стараются не только повысить производительность своих продуктов, функционирующих на стандартных компьютерах и серверах, но и по возможности ускорить ряд операций с помощью различных аппаратных ускорителей. К таким аппаратным

ускорителям относят сопроцессорные устройства, например, GPU (Graphics Processing Unit (графический процессор)) и DPU (Data Processing Unit (сoproцессор для обработки данных)), ставшими популярными за счет возможности разгрузить CPU (Central Processing Unit (центральный процессор)).

Ряд производителей пытаются выполнить ускорения ряда операций с помощью интересных, но вызывающих дискуссии об эффективности применения RISC-V (расширяемая открытая и свободная система команд и процессорная архитектура на основе концепции RISC (Reduced Instruction Set Computer – архитектура процессора, в которой быстродействие увеличивается за счёт упрощения инструкций)).

Данное исследование нацелено на обзор способа ускорения операций в СУБД с помощью



Рис. 1. Схема архитектуры «в пути»

FPGA (Field-Programmable Gate Array (программируемая пользователем вентиляционная матрица)). Перейдем непосредственно к обзору возможностей FPGA, архитектур их использования, а также рассмотрению практических примеров использования FPGA.

1. Краткий обзор источников, основных областей и архитектур применения FPGA

Исследование источников, посвященных применению FPGA, показывает высокую активность научной дискуссии и актуальность темы аппаратного ускорения операций в СУБД с помощью FPGA. Так, например, из обзора источников [1-6] можно сделать вывод о том, что FPGA в настоящее время активно используется для ускорения любых вычислительных процедур, а также для следующих областей:

- реализация алгоритмов искусственного интеллекта (ИИ);
- реализация алгоритмов машинного обучения (ML);
- реализация нейронных сетей «на кристалле»;
- реализация аппаратных модулей безопасности;
- реализация алгоритмов шифрования.

Согласно современным исследованиям (см., например, [1-6]), к достоинствам использования FPGA относят:

- возможность аппаратной реализации определенных вычислений и алгоритмов;
- возможность разгрузки CPU за счет выполнения вычислений и алгоритмов на отдельном вычислительном устройстве.

В современной литературе (см., например, [7]) выделяют три основных архитектуры применения FPGA:

- «в пути»;
- «на стороне»;
- «сопроцессор».

При реализации архитектуры «в пути», FPGA размещается между хранилищем (БД) и CPU, как показано на рис. 1.

Некоторые примеры реализации данной архитектуры:

- Netezza (машина БД на FPGA, см. [8]): FPGA применялись для эффективного аппаратного выполнения операций сжатия БД. Над упакованным сегментом БД матрица FPGA в Netezza умела выполнять проекцию и фильтрацию, а все прочие операции, включая агрегации и группировки, осуществлялись CPU;
- SmartNIC и платформа ExtraV: FPGA выполняет функцию фильтра сетевого трафика. Применяя сжатие/декомпрессию или дедупликацию, FPGA значительно повышают эффективную пропускную способность приложений связи между сетью и хранилищем (БД).

Достоинства применения архитектуры «в пути»:

- исследования показывают (см., [7, 8]), что даже без выполнения распаковки, выполняя только фильтрацию и агрегирование на FPGA, можно значительно уменьшить объем данных, отправляемых на CPU;
- эффективно использовать архитектуру для приложений с обработкой потоков данных, чувствительной к задержкам.

При реализации архитектуры «на стороне», FPGA взаимодействует с основной памятью хоста через память дополнительных устройств или через дополнительное соединение, например, с помощью PCIe, как показано на рис. 2.



Рис. 2. Схема архитектуры «на стороне»

В данной архитектуре FPGA выполняет роль ускорителя операций ввода-вывода. Примеры реализации архитектуры:

- Kickfire's MySQL Analytic Appliance. CPU соединен с FPGA через PCIe;

- Xtremedata's dbX: FPGA совместима по контактам с CPU.

К достоинствам архитектуры относят:

- возможность ускорения ключевых операций работы с данными БД: объединения, сортировки, группировки, агрегирование.

К недостаткам относят:

- требуются дополнительные копии данных (например, данных из памяти хоста в память устройства или наоборот), что приводит к увеличению времени обработки данных.

Однако, если вся БД может быть размещена в памяти (In-Memory DB, см. [7]), применение данной архитектуры может уменьшить количество копий данных для обработки.

При реализации архитектуры «сопроцессор», FPGA либо соединена с CPU через общую память (рис. 3), либо интегрирована вместе с CPU.

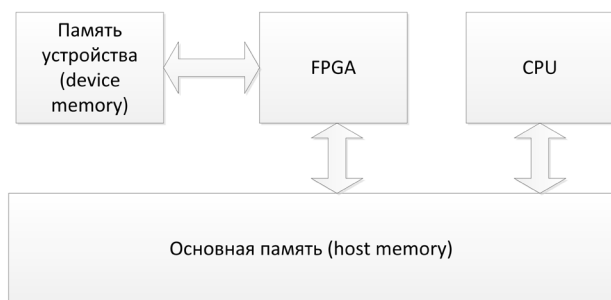


Рис. 3. Схема архитектуры «сопроцессор»

Примеры реализации архитектуры:

- DorrioDB: ускорение общих операций работы с БД (объединение, сортировка, компрессия и декомпрессия данных).

Достоинства применения данной архитектуры:

- FPGA может обращаться к памяти хоста напрямую, что не потребует дополнительных копий данных;
- связь между CPU и FPGA осуществляется через общую память, что позволяет избежать задержек при копировании данных, т.к. доступ к памяти хоста в качестве разделяемой памяти поможет избежать копирования данных из / в память устройства;
- при размещении на одном кристалле FPGA и CPU возможно существенное ускорение обработки данных за счет разделения операций.

Недостатки:

- при размещении на одном кристалле FPGA и CPU крайне трудно синхронизировать производительность устройств, т.к. FPGA значительно уступает CPU в производительности.

Экспериментальные исследования по применению FPGA в СУБД показывают, что за счет FPGA достигается:

- ускорение обработки данных In-memory БД. В частности, исследования (см., например, [7]) показывают, что теоретически можно ускорить работу потоковых операторов, сортировки и сопоставления с регулярными выражениями;
- ускорение алгоритмов сжатия данных в БД (см., например, [9]), FPGA-реализация алгоритма сжатия на основе LZMA (Lempel-Ziv-Markov chain-Algorithm (алгоритм основан на использовании последовательных повторений данных для достижения высокой степени сжатия)), позволяет сжимать 100+ Гб данных в 10-20 раз быстрее, чем без использования FPGA.

Но это теоретико-экспериментальные исследования, а как обстоят дела с применением FPGA в промышленных СУБД? Приведем краткие результаты обзора таких применений.

2. Обзор применения FPGA в промышленных СУБД

Примером достаточного универсального аппаратного ускорителя можно считать SQL2FPGA (см., например, [10]). В основе устройства лежит принцип автоматического ускорения обработки SQL-запросов с помощью использования платы Alveo U280 FPGA на базе AMD/Xilinx HBM. Тестирование показало, что использование SQL2FPGA обеспечивает в среднем ускорение производительности от 10 (для небольших баз данных размером до 1 Гб) до 14 раз (для БД размером 30 Гб) по всем 22 тестовым запросам теста производительности TPC-H (стандартный тест для тестирования производительности сложных аналитических запросов, см. подробнее <https://tpc.org/tpch/>).

Следующим примером может служить платформа Centaur, которая предназначена для совместного использования CPU-FPGA в архитектуре «сопроцессор» с целью ускорения выполнения запросов к БД. Платформа позволяет существенно ускорять построение планов запросов за счет динамического распределения операторов с помощью FPGA для планов запросов, а затем за счет конвейерной передачи операторов и гибридное (CPU-FPGA) выполнение операторов запросов (см. подробнее [11]).

Еще одним примером, хотя и находящимся на стадии разработки можно считать ускоритель выполнения запросов Sailfish (см. [12]). Принцип функционирования Sailfish предположительно позволяет преодолеть недостаток использования архитектуры «сопроцессор», а именно тот факт, что оптимизаторам запросов практически невозможно распределить согласованные вычислительные

ресурсы, чтобы обеспечить одинаковую производительность обработки на уровне CPU и FPGA. Sailfish позволяет регулировать вычислительные ресурсы времени выполнения на стороне CPU, чтобы соответствовать производительности обработки на стороне FPGA. Кроме того, в Sailfish реализован ускоритель FPGA, который поддерживает параллельную обработку хэш-соединения. Интегрируя с PostgreSQL разработанный FPGA-ускоритель Sailfish в экспериментальных тестах показывает значительное превосходство производительности по сравнению с встроенной подсистемой оптимизации запросов PostgreSQL.

FPGA используется в ускорителе Swarm64, специально разработанном для повышения производительности выполнения запросов для СУБД PostgreSQL, MySQL, MariaDB. Swarm64 встраивается между подсистемой хранения и подсистемой обработки данных, сжимает БД в сжатый столбцовый формат, что позволяет экономить на памяти для работы с данными и ускорять выполнение аналитических запросов (см. [8]).

Примером полностью промышленного использования FPGA можно считать разработку Alibaba X-DB компании Alibaba Cloud (Китай). Alibaba X-DB создана на основе MySQL и использует FPGA для ускорения выполнения запросов. Alibaba X-DB дает эффект на транзакционных нагрузках. FPGA задействованы в упаковке LSM-дерева, что освобождает CPU и оставляет ему непосредственно транзакционную работу. На одном узле распределенной СУБД с ускорителем FPGA на TPC-C-подобном тесте получено около 15% прироста производительности по сравнению с обычной реализацией без FPGA (см. [8]).

Примером «железной» машины БД выступает разработка Netezza (приобретена компанией IBM в 2010 году, см. [8]). Матрицы FPGA применялись для эффективного фактически аппаратного выполнения операций сжатия данных БД. Над упакованным сегментом БД Netezza умела выполнять операции обработки данных для запросов: проекции и фильтрации. Все прочие операции, включая агрегации и группировки, осуществлялись с помощью CPU. Несмотря на успехи проекта, IBM прекратила выпуск Netezza.

Еще одним примером промышленного использования FPGA является отечественная ERP-система 1С:Предприятие 8.3. Для ускорения обработки больших массивов данных БД используется FPGA Xilinx Alveo U280 для PostgreSQL v.11 на ОС Ubuntu (см. [13]). Ускорение обработки данных достигается за счет распараллеливания обработки аналогично многоядерной схеме обработки на

CPU. Вообще же принцип распараллеливания вычислений с помощью FPGA не нов, так, например, возможно ускорения выполнения программ за счёт параллельного выполнения программ на FPGA (см., например, [14]).

Безусловно, примером промышленного использования FPGA является проект AQUA компании Amazon для СУБД Redshift (см. подробнее [15]).

По сути, AQUA – это распределенный кэш с аппаратным ускорением для узлов СУБД Redshift. AQUA использует чипы AWS Nitro, адаптированные для ускорения шифрования и сжатия данных, а также записи данных на SSD для аппаратного ускорения сжатия, шифрования и обработки (поиска, агрегирование и фильтрация) данных «рядом» с хранилищем данных. Обеспечивается примерно десятикратное ускорение запросов, выполняющих сканирование (поиск), агрегирование и фильтрацию данных с помощью SQL-предикатов LIKE и SIMILAR_TO. Использование архитектуры AQUA (рис. 4) позволяет увеличить количество обращений к кэшу с 99,60% до 99,95% при отправке на узел СУБД Redshift критически важных запросов.

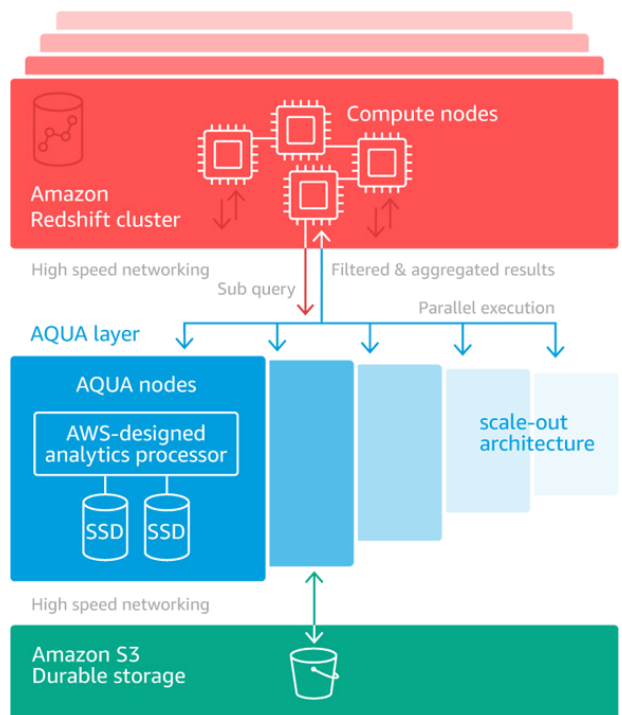


Рис. 4. Архитектура AQUA для СУБД Redshift

Если в проекте AQUA можно увидеть удачное сочетание аппаратного ускорения операций обработки данных и использования высокоскоростных накопителей SSD, то следующим проектом, который может быть использован для ускорения операций обработки данных может служить разработка

компании Samsung – SmartSSD, в состав которого включен FPGA.

Его отличительной особенностью от обычных твердотельных дисков (SSD) является возможность обрабатывать данные напрямую, сводя к минимуму обмен данными между процессором, оперативной памятью, графическим процессором и т.д., что приводит к значительному увеличению производительности и повышению энергоэффективности. Подробнее о SmartSSD см., например, [16-18].

Поэтому, теоретически, SmartSSD может использоваться для обработки больших массивов данных, алгоритмов поиска (в том числе с помощью искусственного интеллекта, машинного обучения).

По оценке Samsung при использовании SmartSSD время обработки запросов к большим БД сокращается примерно в 2 раза, при этом энергопотребление уменьшается на 70%, загруженность CPU на 87% по сравнению с использованием обычных SSD.

Можно предположить сценарии использования SmartSSD для СУБД:

- теоретически возможно реализовать проверку прав на строки таблиц БД прямо на SmartSSD, за счет чего можно получить выигрыш в скорости обращения к данным БД;
- выполнение полнотекстовой индексации и алгоритмов поиска непосредственно на программируемой матрице SmartSSD без участия CPU и передачи данных между SSD и оперативной памятью;
- на SmartSSD можно хранить часто используемые витрины данных или материализованные представления для ускорения доступа к часто используемым данным пользователей СУБД;
- реализация алгоритмов сжатия/распаковки данных, шифрования данных непосредственно на программируемой матрице SmartSSD, что даст выигрыш в скорости обработки и позволит хранить защищенные данные на SmartSSD.

Безусловно, все эти возможности должны быть подтверждены экспериментально.

3. Проблемы и недостатки использования FPGA

На основании проведенного краткого обзора использования FPGA для ускорения операций СУБД, которая, казалось бы, бесспорна, можно выделить следующие проблемы и недостатки использования FPGA:

- 1) Первая проблема лежит не совсем в технической сфере. Это проблема зависимости от поставок оборудования FPGA, которое может

оказаться недоступным из-за сложной международной обстановки. Отечественных производителей FPGA не существует.

- 2) Настораживает тот момент, что большинство достигнутых результатов ускорения производительности обработки данных так и находятся на стадии экспериментов.
- 3) Компания IBM, которая приобрела Netezza в 2010 году, больше не выпускает машины БД с FPGA.
- 4) В последнее время появились альтернативные подходы к поисковой оптимизации запросов SQL на основе шаблонов (см., например, [19]) или ИИ (см., например, [20]). Анализ этих подходов будут посвящены дальнейшие исследования автора.
- 5) В последнее время большую, по сравнению с FPGA, популярность приобрели подходы, связанные с использованием GPU для распараллеливания и ускорения выполнения запросов к БД. Хотя FPGA считаются более энергоэффективными, GPU значительно более производительны (см., например, [21]). Кроме того, FPGA достаточно сложно программировать, и GPU/DPU стали альтернативной технологией ускорения обработки. Исследование возможностей ускорения СУБД за счет использования GPU и DPU будут также посвящены дальнейшие исследования автора.
- 6) Из-за повышения производительности компьютеров и увеличения пропускной способности каналов связи и передачи данных, в СУБД последнее время чаще используются технологии in-memory и NVM (Non-Volatile Memory (энергонезависимая память)). В связи с этим коммуникационные издержки на передачу данных, связанные с ускорителями FPGA, стали более критичными. Связь между CPU и FPGA гораздо менее быстрая по сравнению со схемой связи между ядрами CPU. Поэтому может не увеличиваться производительность в схеме совместного использования CPU и FPGA (см., например, [22]).
- 7) FPGA достаточно сложно программировать:
 - а. ограничены ресурсы FPGA на объемы программного кода;
 - б. сложно исправлять ошибки непосредственно на FPGA, т.к. требуется перепрограммирование, а количество циклов перезаписи программируемой матрицы ограничено;
 - в. генерация планов запросов, которые могут быть выполнены в системе с ускорением на FPGA, требуется компилятор запросов, согласованный по модели с FPGA;

- d. использование специализированных FPGA приводит к необходимости перенастройки устройств, когда, например, требуется другой набор функций, т.е. требуется частое перепрограммирование, что невозможно, либо замена устройств.

Возможные проблемы использования FPGA можно показать на примере критики проекта AQUA компании Amazon [15]:

- 1) Redshift ограничен по масштабам, потому что даже с типами узлов СУБД, поддерживающими AQUA, он не может эффективно распределять различные рабочие нагрузки по кластерам.
- 2) Как отмечает Firebolt, хотя Redshift может автоматически масштабироваться до 10 кластеров для поддержки параллелизма запросов, он может обрабатывать не более 50 запросов в очереди во всех кластерах.
- 3) Кроме того, поскольку Redshift блокируется на уровне таблицы, он лучше подходит для пакетного приема и ограничен в пропускной способности записи.

Заключение

В статье выполнен обзор способа ускорения выполнения операций обработки данных в СУБД с помощью FPGA. Выполнено рассмотрение возможностей FPGA, выполнен обзор архитектур использования FPGA, а также рассмотрены практические примеры использования FPGA.

Определены достоинства и недостатки применения FPGA. Отмечен ряд проблем и альтернативных технологий, которые существенно затормозили применение FPGA в промышленных СУБД и системах хранения данных.

В качестве вывода по применению FPGA для ускорения обработки данных в СУБД, можно утверждать, что подход позволяет ускорять операции в БД, связанные с обработкой запросов, сжатием и шифрованием данных, параллельной обработкой данных, в том числе записи на SSD. Однако, применение FPGA также усложняет систему в целом и увеличивает общую стоимость владения.

В дальнейших исследованиях планируется рассмотреть альтернативные технологии ускорения выполнения операций обработки данных в СУБД с помощью GPU, DPU, методов искусственного интеллекта.

Литература

1. Alcaín E., Fernández P.R., Nieto R., Montemayor A.S., Vilas J., Galiana-Bordera A., Martinez-

Girones P.M., Prieto-de-la-Lastra, C., Rodriguez-Vila B., Bonet M., Rodriguez-Sanchez C. Hardware Architectures for Real-Time Medical Imaging // *Electronics*, 10(24): 3118, 2021. doi:10.3390/electronics10243118. ISSN 2079-9292.

2. Nagornov N.N., Lyakhov P.A., Valueva M.V., Bergerman M.V. RNS-Based FPGA Accelerators for High-Quality 3D Medical Image Wavelet Processing Using Scaled Filter Coefficients // *IEEE Access*, 10: 19215–19231, 2022. doi:10.1109/ACCESS.2022.3151361. ISSN 2169-3536.
3. Huffmire T., Brotherton B., Sherwood T., Kastner R., Levin T., Nguyen T.D., Irvine C. Managing Security in FPGA-Based Embedded Systems // *IEEE Design & Test of Computers*, 25 (6): 590–598, 2008. doi:10.1109/MDT.2008.166.
4. Babaei A., Schiele G., Zohner M. Reconfigurable Security Architecture (RESA) Based on PUF for FPGA-Based IoT Devices // *Sensors*, 22(15): 5577, 2022. doi:10.3390/s22155577. ISSN 1424-8220.
5. Simpson P.A. *FPGA Design, Best Practices for Team Based Reuse*, 2nd edition. Switzerland: Springer International Publishing AG, 2015. ISBN 978-3-319-17924-7.
6. Как работает FPGA? : RUVDs.com, habr. URL: <https://habr.com/ru/companies/ruvds/articles/736060/>. Дата публикации: 18.05.2023.
7. Fang J., Mulder Y.T.B., Hidders J. et al. In-memory database acceleration on FPGAs: a survey. *The VLDB Journal* 29, 33–59, 2020. <https://doi.org/10.1007/s00778-019-00581-w>.
8. Волков Д., Николаенко А. На пути к «железным» СУБД // *Открытые системы. СУБД*, №02, 2019 : OSP. URL: <https://www.osp.ru/os/2019/02/13054946>. Дата публикации: 19.05.2019.
9. Chen S., Chen Y., Wang Z., Qin W., Zhang J., Nand H., Zhang J., Li J., Zhang X., Liang X., Xu M. Efficient sequencing data compression and FPGA acceleration based on a two-step framework. *Front. Genet.*, 14: 1260531, 2023. doi: 10.3389/fgene.2023.1260531.
10. Lu A., Fang Z. SQL2FPGA: Automatic Acceleration of SQL Query Processing on Modern CPU-FPGA Platforms. 2023 IEEE 31st Annual International Symposium on Field-Programmable Custom Computing Machines (FCCM), Marina Del Rey, CA, USA, 184-194, 2023. doi: 10.1109/FCCM57271.2023.00028.
11. Owaida M., Sidler D., Kara K., Alonso G. Centaur: A Framework for Hybrid CPU-FPGA Databases. 2017 IEEE 25th Annual International Symposium on Field-Programmable Custom Computing Machines (FCCM), Napa, CA, 211-218, 2017. doi: 10.1109/FCCM.2017.37.

12. *Wei X.* Sailfish: Exploring Heterogeneous Query Acceleration on Discrete CPU-FPGA Architecture. IEEE 39th International Conference on Data Engineering Workshops (ICDEW), Anaheim, CA, USA, 198-204, 2023. doi: 10.1109/ICDEW58674.2023.00036.
13. *Хасанов В.* Ускорение обработки данных 1С на FPGA-ускорителях Xilinx Alveo : rutube. URL: <https://rutube.ru/video/c246d709685406649e-5730c23a95e416/>. Дата публикации: 2021.
14. *Oikawa S.* Operating System Framework for Transparent Execution on a CPU and FPGA. 2021 IEEE/ACIS 19th International Conference on Software Engineering Research, Management and Applications (SERA), Kanazawa, Japan, 97-101, 2021. doi: 10.1109/SERA51205.2021.9509041.
15. Amazon throws SSDs, FPGAs, Nitro chips at Redshift with “AQUA” : TheStack. URL: <https://www.thestack.technology/aws-aqua-redshift-ga/>. Дата публикации: 15.04.2021.
16. Intelligent self-processing for the era of big data. SmartSSD : Samsung. URL: <https://semiconductor.samsung.com/emea/ssd/smart-ssd/> (дата обращения: 26.04.2025).
17. SmartSSD® Computational Storage Drive : AMD. URL: <https://www.amd.com/content/dam/xilinx/publications/product-briefs/xilinx-smartssd-computational-storage-drive-product-brief.pdf> (дата обращения: 26.04.2025).
18. Samsung представила SmartSSD второго поколения на базе процессоров AMD : overclockers. URL: <https://overclockers.ru/blog/TechRanch/show/71223/samsung-predstavila-smartssd-vtorogo-pokoleniya-na-baze-proc-sorov-amd>. Дата публикации: 22.07.2022.
19. *Feng J., Li Z., Chen Q.* Towards Exploratory Query Optimization for Template-Based SQL Workloads. 2024 IEEE 40th International Conference on Data Engineering (ICDE), Utrecht, Netherlands, 151-164, 2024. doi: 10.1109/ICDE60146.2024.00019.
20. *Chen T., Gao J., Tu Y., Xu M.* GLO: Towards Generalized Learned Query Optimization. 2024 IEEE 40th International Conference on Data Engineering (ICDE), Utrecht, Netherlands, 4843-4855, 2024. doi: 10.1109/ICDE60146.2024.00368.
21. *Fang J.* Database Acceleration on FPGAs. Dissertation (TU Delft), Delft University of Technology, 2019. <https://doi.org/10.4233/uuid:84dfc577-ca6f-43ea-9b24-4dc160c103f5>.
22. Практическое применение сервера с FPGA. Блог компании Selectel : habr. URL: <https://habr.com/ru/companies/selectel/articles/565190/>. Дата публикации: 10.07.2021.

Соловьев Александр Владимирович. Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук» г. Москва, Россия. Главный научный сотрудник, доктор технических наук. Область научных интересов: системный анализ, системы управления базами данных, теория надежности, математическое моделирование, долговременное хранение электронных документов. E-mail: soloviev@isa.ru

Increasing the speed of DBMS operations using hardware FPGA accelerators

A.V. Solovyev

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

Abstract. The article provides an overview of a way to speed up data processing operations in a DBMS using an FPGA. An overview of FPGA capabilities, FPGA usage architectures is performed, and practical examples of FPGA usage are considered. The advantages and disadvantages of using FPGA are determined. A number of problems and alternative technologies were noted, which significantly slowed down the use of FPGAs in industrial DBMS and data storage systems. Using FPGA to speed up data processing in a DBMS, it can be argued that the approach allows you to speed up database operations related to query processing, data compression and encryption, and parallel data processing. However, the use of FPGAs also complicates the system as a whole, does not allow for flexible and quick reconfiguration of the system’s functionality, and increases the total cost of ownership. In further research, it is planned to consider alternative technologies for accelerating data processing operations.

Keywords: *database management systems, DBMS, FPGA, acceleration of data processing operations.*

DOI: 10.14357/20790279250208 **EDN:** XQCEYD

References

1. Alcaín E., Fernández P.R., Nieto R., Montemayor A.S., Vilas J., Galiana-Bordera A., Martinez-Girones P.M., Prieto-de-la-Lastra, C., Rodriguez-Vila B., Bonet M., Rodriguez-Sanchez C. Hardware Architectures for Real-Time Medical Imaging // *Electronics*, 10(24): 3118, 2021. doi:10.3390/electronics10243118. ISSN 2079-9292.
2. Nagornov N.N., Lyakhov P.A., Valueva M.V., Bergerman M.V. RNS-Based FPGA Accelerators for High-Quality 3D Medical Image Wavelet Processing Using Scaled Filter Coefficients // *IEEE Access*, 10: 19215–19231, 2022. doi:10.1109/ACCESS.2022.3151361. ISSN 2169-3536.
3. Huffmire T., Brotherton B., Sherwood T., Kastner R., Levin T., Nguyen T.D., Irvine C. Managing Security in FPGA-Based Embedded Systems // *IEEE Design & Test of Computers*, 25 (6): 590–598, 2008. doi:10.1109/MDT.2008.166.
4. Babaei A., Schiele G., Zohner M. Reconfigurable Security Architecture (RESA) Based on PUF for FPGA-Based IoT Devices // *Sensors*, 22(15): 5577, 2022. doi:10.3390/s22155577. ISSN 1424-8220.
5. Simpson P.A. *FPGA Design, Best Practices for Team Based Reuse*, 2nd edition. Switzerland: Springer International Publishing AG, 2015. ISBN 978-3-319-17924-7.
6. How does FPGA work? 2023. : RUVDs.com, habr. URL: <https://habr.com/ru/companies/ruvds/articles/736060/>. Published: 18.05.2023.
7. Fang J., Mulder Y.T.B., Hidders J. et al. 2020. In-memory database acceleration on FPGAs: a survey. *The VLDB Journal* 29, 33–59. <https://doi.org/10.1007/s00778-019-00581-w>.
8. Volkov D., Nikolayenko A. 2019. On the way to the “iron” DBMS. *Open systems. DBMS*, №02: OSP. URL: <https://www.osp.ru/os/2019/02/13054946>. Published: 19.05.2019.
9. Chen S., Chen Y., Wang Z., Qin W., Zhang J., Nand H., Zhang J., Li J., Zhang X., Liang X., Xu M. Efficient sequencing data compression and FPGA acceleration based on a two-step framework. *Front. Genet.*, 14: 1260531, 2023. doi: 10.3389/fgene.2023.1260531.
10. Lu A., Fang Z. SQL2FPGA: Automatic Acceleration of SQL Query Processing on Modern CPU-FPGA Platforms. 2023 IEEE 31st Annual International Symposium on Field-Programmable Custom Computing Machines (FCCM), Marina Del Rey, CA, USA, 184-194, 2023. doi: 10.1109/FCCM57271.2023.00028.
11. Owaida M., Sidler D., Kara K., Alonso G. Centaur: A Framework for Hybrid CPU-FPGA Databases. 2017 IEEE 25th Annual International Symposium on Field-Programmable Custom Computing Machines (FCCM), Napa, CA, 211-218, 2017. doi: 10.1109/FCCM.2017.37.
12. Wei X. Sailfish: Exploring Heterogeneous Query Acceleration on Discrete CPU-FPGA Architecture. IEEE 39th International Conference on Data Engineering Workshops (ICDEW), Anaheim, CA, USA, 198-204, 2023. doi: 10.1109/ICDEW58674.2023.00036.
13. Khasanov V. Acceleration of 1C data processing on FPGA accelerators Xilinx Alveo : rutube. URL: <https://rutube.ru/video/c246d709685406649e-5730c23a95e416/>. Last access: 25.04.2025.

14. *Oikawa S.* 2021. Operating System Framework for Transparent Execution on a CPU and FPGA. 2021 IEEE/ACIS 19th International Conference on Software Engineering Research, Management and Applications (SERA), Kanazawa, Japan, 97-101. doi: 10.1109/SERA51205.2021.9509041.
15. Amazon throws SSDs, FPGAs, Nitro chips at Redshift with “AQUA” : TheStack. URL: <https://www.thestack.technology/aws-aqua-redshift-ga/>. Published: 15.04.2021.
16. Intelligent self-processing for the era of big data. SmartSSD : Samsung. URL: <https://semiconductor.samsung.com/emea/ssd/smart-ssd/>. Last access: 26.04.2025.
17. SmartSSD® Computational Storage Drive : AMD. URL: <https://www.amd.com/content/dam/xilinx/publications/product-briefs/xilinx-smartssd-computational-storage-drive-product-brief.pdf>. Last access: 26.04.2025.
18. Samsung has introduced a second-generation Smart SSD based on AMD processors : overclockers. URL: <https://overclockers.ru/blog/TechRanch/show/71223/samsung-predstavila-smartssd-vtorogo-pokoleniya-na-baze-processorov-amd>. Published: 22.07.2022.
19. *Feng J., Li Z., Chen Q.* Towards Exploratory Query Optimization for Template-Based SQL Workloads. 2024 IEEE 40th International Conference on Data Engineering (ICDE), Utrecht, Netherlands, 151-164, 2024. doi: 10.1109/ICDE60146.2024.00019.
20. *Chen T., Gao J., Tu Y., Xu M.* GLO: Towards Generalized Learned Query Optimization. 2024 IEEE 40th International Conference on Data Engineering (ICDE), Utrecht, Netherlands, 4843-4855, 2024. doi: 10.1109/ICDE60146.2024.00368.
21. *Fang J.* Database Acceleration on FPGAs. Dissertation (TU Delft), Delft University of Technology, 2019. <https://doi.org/10.4233/uuid:84dfc577-ca6f-43ea-9b24-4dc160c103f5>.
22. Practical application of an FPGA server. Selectel company blog : habr. URL: <https://habr.com/ru/companies/selectel/articles/565190/>. Published: 10.07.2021.

Aleksandr V. Solovyev. Doctor of Technical Sciences. Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia. Research interests: system analysis, database management systems, reliability theory, mathematical modeling. E-mail: soloviev@isa.ru

Разработка SVM модели для предиктивного обслуживания металлорежущего оборудования

Н.Г. Джавадов, А.М. Амиров, В.М. Исмаилов

Национальное Аэрокосмическое Агентство, г. Баку, Азербайджан

Аннотация. Данная статья посвящена созданию модели машинного обучения для оптимизации обслуживания режущего инструмента с применением метода опорных векторов (SVM). В статье рассмотрены основные этапы создания модели многоклассовой классификации от предварительной обработки сырых сигналов до подбора гиперпараметров. Выбор алгоритма обусловлен вычислительной эффективностью, а также возможностью работы с данными с нелинейной структурой. В результате тестирования модели средняя точность достигла 81%. Полученные результаты демонстрируют, что алгоритм на основе метода опорных векторов может справиться с поставленной задачей в условиях ограниченных вычислительных мощностей.

Ключевые слова: машинное обучение, умное производство, метод опорных векторов, металлообработка, предиктивное обслуживание.

DOI: 10.14357/20790279250209 **EDN:** AMBERY

Введение

Металлообработка является сложным процессом, который сопровождается выработкой большого количества данных. Методы машинного обучения широко используются для анализа и выявления закономерностей в этих данных. Использование машинного обучения в производстве способно снизить время простоя оборудования, повысить производительность предприятия и улучшить качество выпускаемой продукции [1].

Одним из вариантов применения машинного обучения в производстве является мониторинг состояния оборудования. Неожиданные поломки вызывают простои технологического оборудования, что приводит к убыткам. Согласно последним исследованиям [2-4], незапланированные простои, вызванные неоптимальной стратегией обслуживания, могут снизить производительность предприятия до 20-35% в год.

Решением проблемы выхода из строя оборудования является их обслуживание, которое можно разделить на следующие виды:

1. Обслуживание при факте неполадки в оборудовании;
2. Плановое обслуживание;
3. Предиктивное обслуживание.

Наиболее простым является первый метод – обслуживание оборудования не проводится, пока

не произойдет неполадка. В этом случае время работы компонента может быть увеличено, но незапланированные застои неизбежны. Кроме незапланированных застоев, есть опасность возникновения сопутствующих неполадок, например, при поломке режущего инструмента в процессе резания есть риск повреждения заготовки или элементов станка.

Плановое обслуживание является более распространенной и заключается в обслуживании оборудования через определенное количество времени для предотвращения неожиданных поломок [5]. Это предполагает, что текущее состояние оборудования не учитывается, что приводит к нерациональным затратам, т.к. потенциал оборудования с точки зрения времени полезной работы не раскрывается в полной мере. Кроме того, плановое обслуживание не учитывает динамику изменения нагрузки на оборудование. Соответственно, инженеру по обслуживанию на производстве приходится искать компромисс между этими двумя методами. Предиктивное обслуживание является же новым подходом, позволяющим объединить преимущества двух вышеописанных методов. Этот метод основан на мониторинге компонентов станка в реальном времени. Концепция предиктивного обслуживания заключается в принятии мер на ранних этапах, когда элементы станка демонстрируют

определенное поведение, которое может приводить к отказу оборудования, ухудшению производительности или снижению качества продукции. Соответственно, ранняя реакция на нетипичное поведение переменных технологического процесса позволяет предотвращать незапланированные простои, понижения качества и производительности [6].

Одним из самых нагруженных и работающих в экстремальных условиях элементов является режущий инструмент. В процессе фрезерования вращающийся режущий инструмент снимает материал с обрабатываемой заготовки для получения требуемой формы. В результате взаимодействия режущего инструмента, поверхности заготовки и стружки происходит изменение формы режущих кромок инструмента. Это явление, известное также как износ, оказывает значительное влияние на качество обрабатываемой поверхности деталей [7]. Для обеспечения качества производимой продукции необходимо отслеживать и контролировать износ режущего инструмента.

На рис. 1 приводится типичная кривая износа режущего инструмента. Кривую можно разделить, относительно времени работы, на 3 этапа. На 1 этапе происходит интенсивный износ с переходом в устойчивый режим. На последнем этапе степень износа ускоряется, приводя в конечном итоге к выходу инструмента из строя. Соответственно, износ режущего инструмента – это нелинейный процесс, срок службы которого не является постоянной даже при одинаковых условиях эксплуатации, что усложняет процесс его мониторинга. Задачей предиктивного обслуживания в данном случае является определение начала катастрофического износа режущего инструмента, для того чтобы своевременно спланировать его замену. С этой целью, в рамках данной статьи, рассматривается разработка алгоритма на основе метода опорных векторов для предиктивного обслуживания режущего инструмента.

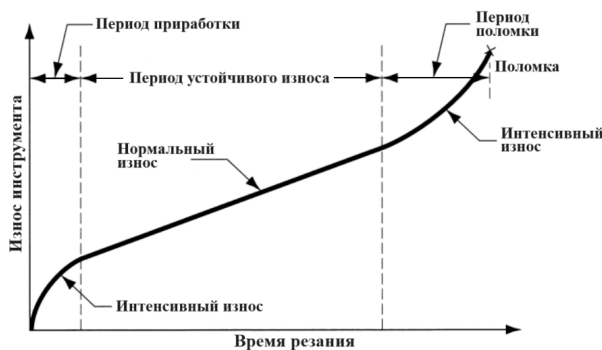


Рис. 1. График зависимости износа инструмента от времени резания

1. Методология и материалы

Описание модели. Метод опорных векторов – это метод контролируемого машинного обучения, который используется для задач классификации и регрессии. Целью метода опорных векторов в задачах классификации является максимизация расстояний от разделяющей гиперплоскости до ближайших объектов, которые называются опорными векторами [8]. На рис. 2 изображен подход метода опорных векторов для бинарной классификации линейно разделимых объектов.

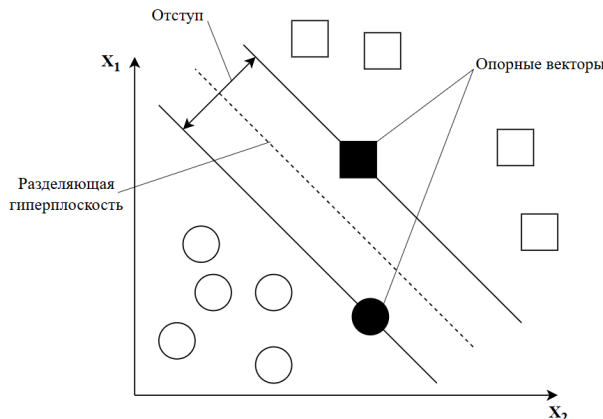


Рис. 2. Геометрическая интерпретация метода опорных векторов для бинарной классификации для линейно разделимого случая, где x_1 и x_2 – признаки объектов, круги и квадраты – объекты

Выбор модели SVM обуславливается несколькими причинами. SVM обладает существенным достоинством, заключающимся в эффективной работе с ограниченными объемами данных, что типично для задач в промышленности ввиду сложности и дороговизны сбора данных. Это достоинство вытекает из принципа работы алгоритма – для построения разделяющей гиперплоскости используются не все объекты, а только лишь находящиеся ближе всего к границам классов, называемые опорными векторами. Это преимущество выделяет SVM на фоне таких алгоритмов как ансамблевые модели или глубокие нейронные сети. Кроме того, описанный алгоритм построения, а также механизмы регуляризации позволяют снизить чувствительность модели к шумам и выбросам. Также необходимо отметить универсальность алгоритма SVM перед такими методами авторегрессионного анализа временных рядов как ARMA, ARIMA и SARIMA, которые предполагают стационарную природу временных рядов, либо требуют преобразования нестационарных временных рядов в стационарные. Упомянутые методы, как правило, используются для задач регрессии, в то время как

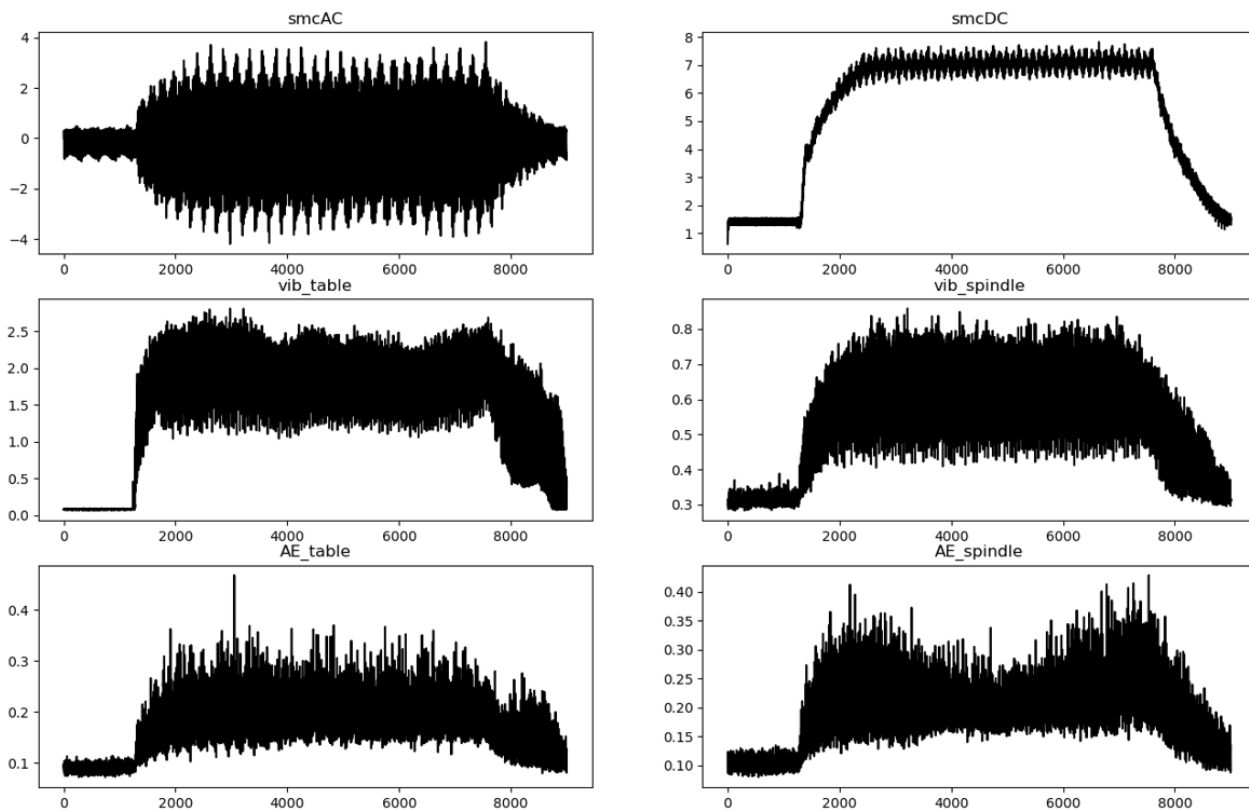


Рис. 3. Временные ряды сигналов для первого прохода, где smcAC – переменный ток двигателя шпинделя, smcDC – постоянный ток двигателя шпинделя, vib_table – вибрация стола, vib_spindle – вибрация шпинделя, AE_table – акустическая эмиссия на столе, AE_spindle – акустическая эмиссия на шпинделе

SVM может применяться, как к задачам регрессии, так и классификации. Кроме того, упомянутые методы авторегрессионного анализа чувствительны к шумам и выбросам.

Еще одним достоинством SVM модели является способность работать с нелинейными зависимостями. Для классификации линейно неразделимых объектов, согласно статистической теории обучения Вапника-Червоненкиса [9], возможно преобразование исходного пространства в пространство более высокой размерности, в котором объекты можно будет линейно разделить.

Для преобразования пространства используются ядровые функции, в данном исследовании тестировались линейная, полиномиальная и радиально-базисные функции.

С учетом всего вышесказанного, можно сделать вывод, что выбор алгоритма SVM является целесообразным для решения задач предиктивного обслуживания оборудования в промышленности.

Описание данных. Для обучения модели использовался открытый набор данных с обрабатывающим центром японского производства Matsuura MC-510V [10]. В ходе сбора данных фрезеровалась заготовка размерами 483 мм × 178 мм × 51 мм с

различными параметрами резания. После каждого прохода замерялся износ задней поверхности инструмента. В процессе сбора данных регистрировались 6 сигналов с частотой дискретизации 250 Гц. На рис. 3 приведена визуализация временных рядов для одного прохода, выполненная на языке программирования Python и библиотеки Matplotlib. Используемый в данной статье набор данных состоит из 167 записей, каждый из них представляет один проход, в одном проходе для каждого сигнала собрано по 9000 значений.

Описание процесса разработки модели. Схематическая диаграмма создания классификатора на базе методе опорных векторов показана на рис. 4. На первом этапе производилась предварительная обработка сигналов. Из набора данных удалялись anomalous временные ряды, например, в одном из проходов датчик вибраций на столе станка не регистрировал сигналы. Далее заполнялись пропуски в целевой переменной, для простоты реализации был выбран метод линейной интерполяции. Также при предварительной обработке из временных рядов сигналов были удалены зоны входы и выхода инструмента в заготовку. В конце предварительной обработки все временные ряды

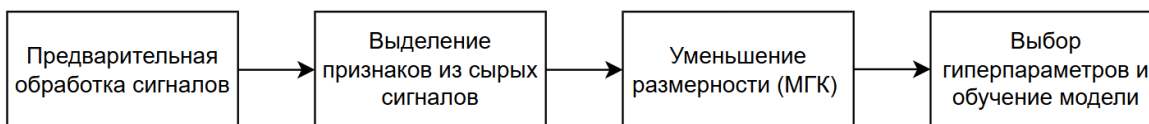


Рис. 4. Схема создания классификатора для предиктивного обслуживания режущего инструмента

были размечены в 3 класса в зависимости от степени износа: до 0.2 мм – нормальный износ, 0.2-0.4 мм – предупреждающий износ, от 0.4 мм – критический износ.

На втором этапе каждый временной ряд был разделен на окна размером 50 элементов и со сдвигом в 50 без повторяющихся записей в окнах. Перед обучением модели проводилось извлечение признаков для выделения полезной информации из временных рядов. Кроме того, для обучения модели на базе метода опорных векторов, каждый признак объекта должен быть представлен в виде одного числа в векторе признаков. Соответственно, далее из каждого окна были выделены статистические признаки, описанные в табл. 1.

При переходе от временных рядов к числовым признакам на заданном интервале, извлеченные признаки обобщают поведение временного ряда. Данная методология позволяет повысить устойчивость модели к шумовым значениям. Однако, потеря временной структуры в данных в процессе обучения может привести к низкой точности модели.

Для сохранения временной структуры в данном исследовании была использована временная

перекрестная проверка (time series cross-validation) в процессе обучения и оценки модели. Данный метод не перемешивает данные, модель обучается на прошлых данных и тестируется на будущих, соответственно, обеспечивается корректная имитация реальных условий работы модели.

Кроме того, сохранение временной зависимости возможно извлечением новых признаков, учитывающих временную структуру, а также использованием более продвинутых методов для преобразования временного ряда в другое представление. Однако, в рамках данного исследования, извлечение признаков ограничилось было ограничено 7 вышеуказанными признаками для простоты реализации кода.

На третьем этапе был применен метод главных компонент (МГК) для снижения размерности признакового пространства. После второго этапа из 6 признаков (6 временных рядов для каждого прохода) было получено 42 признака для каждого объекта. Всего после разделения на окна и выделение признаков в обучающей выборке получилось 1600 объектов.

Как известно [1], высокая размерность данных может привести к проблеме, известной как «проклятие размерности», которая приводит к увеличению трудоемкости обучения, а также к увеличению склонности модели к переобучению. Переобучение модели – это явление, когда на обучающей выборке модель показывает высокие результаты точности, а на тестовой (данные которые не участвовали в обучении) низкие. Кроме того, применение МГК может повысить точность модели, если набор данных содержит большое количество нерелевантных признаков или шумов.

На последнем этапе происходило обучение модели на различных гиперпараметрах. Для обучения и тестирования модели были выбраны разные проходы, но с одинаковыми режимами резания и материалом. Модель обучалась локально на ПК со следующими характеристиками:

Процессор – Ryzen 7 4800H.

Видеокарта – Nvidia Geforce GTX 1650Ti.

Объем оперативной памяти – 16 Гб.

Объем видеопамати – 4 Гб.

Операционная система – Windows 11.

Табл. 1

Признаки, выделенные из каждого окна временных рядов

№	Название признака	Определение
1	Межквартильный размах	$T_{IQR} = Q_3 - Q_1$
2	Среднее абсолютное отклонение	$T_{MAD} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i - \bar{x} $
3	Дисперсия	$T_{var} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$
4	Стандартное отклонение	$T_{sd} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$
5	Среднеквадратичное значение	$T_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2}$
6	Коэффициент эксцесса	$T_{ku} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^4}{(n-1)T_{sd}^4}$
7	Коэффициент асимметрии	$T_{sk} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^3}{(n-1)T_{sd}^3}$

2. Обсуждение

В рамках проведенного исследования была обучена модель многоклассовой классификации на основе метода опорных векторов для определения степени износа режущего инструмента. Обучение было проведено на предварительно обработанных данных. Для избежания переобучения, обучение и тестирование модели происходили на различных выборках данных.

Для оценки эффективности модели была выбрана метрика точности (ассигасу), которая выражается в виде отношения количества правильно классифицированных классов ко всем предсказаниям модели. Для бинарной классификации метрика вычисляется следующим образом:

$$Accuracy = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN}$$

где TP (True Positive) – количество правильно классифицированных положительных классов, TN (True Negative) – количество правильно классифицированных негативных классов, FP (False Positive) – количество неправильно классифицированных отрицательных классов, FN (False Negative).

Данная метрика широко применяется также в задачах многоклассовой классификации, в которой, как и для задач бинарной классификации, вычисляется доля правильных ответов от всего количества ответов классификатора.

При обучении модели без уменьшения размерности пространства на изначальных 42 признаках происходило явное переобучение модели. Наилучшие результаты были получены с применением полиномиальной ядерной функции, по этой причине в последующих экспериментах использовалась только эта ядерная функция.

В табл. 2 приведены результаты экспериментов зависимости точности классификатора от количества главных компонент. Проанализировав данную таблицу можно сделать вывод, что при высокой размерности признакового пространства

происходит переобучение. С уменьшением количества компонент точность на тестовой выборке растет и достигает наилучшего результата при двух главных компонентах. Соответственно, можно сделать вывод о сильной избыточности и коррелированности изначального признакового пространства.

Для модели с полиномиальным ядром и двумя главными компонентами была построена матрица ошибок (рис 5.). Данная модель обеспечила точность классификатора в 81%. Проанализировав матрицу ошибок можно сделать вывод, что модель уверенно классифицирует класс «Предупреждение» с точностью 95.5%, для класса «Критично» точность достигается в 87.7%. Наибольшее количество ошибок приходится на ошибку классификатора между классами «Норма» и «Предупреждение», что может быть вызвано схожестью извлеченных признаков на начальном этапе износа режущего инструмента. Однако, стоит отметить, что ни один объект из класса «Норма» не был классифицирован как «Критично», что может быть важно в условиях реального производства т.к. модель демонстрирует устойчивость к ложным тревогам.

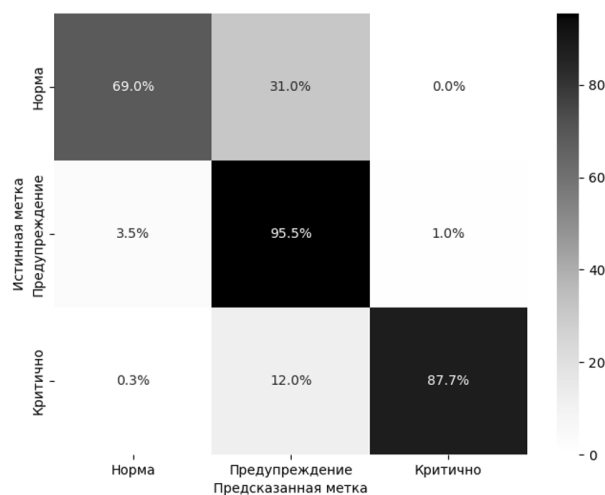


Рис. 5. Матрица ошибок классификатора

Зависимость точности классификатора на тестовой и тренировочной выборке от количества главных компонент

Табл. 2

Размерность пространства (количество признаков)	Точность классификатора на тестовой выборке	Точность классификатора на тренировочной выборке
42	0.56	1
40	0.56	1
20	0.52	1
10	0.49	0.98
5	0.75	0.93
2	0.81	0.89
1	0.76	0.85

Заклучение

1. Разработана модель классификации степени износа режущего инструмента для предиктивного обслуживания металлорежущих станков на основе метода опорных векторов.
2. Полученные результаты демонстрируют, что без продвинутых алгоритмов глубинного обучения, а также без облачных вычислений возможно решение поставленной задачи с применением локальных вычислительных систем. Это снижает затраты на реализацию системы и делает её доступной для производства.
3. В данной работе извлечение признаков происходило во временном диапазоне. Для повышения точности и улучшения обобщающей способности модели также можно использовать более продвинутые методы, в том числе и в частотных и частотно-временных диапазонах.
4. Необходимо также отметить, что в отличие от алгоритмов глубинного обучения, эффективность работы моделей на основе классических алгоритмов машинного обучения и в частности метода опорных векторов, в значительной степени зависит от качества и информативности извлеченных признаков из сырых данных. Данная проблема может считаться неактуальной для алгоритмов глубинного обучения, т.к. они способны автоматически извлекать признаки из данных.

Литература

1. Джавадов Н.Г., Амиров А.М., Исмаилов В.М. Технические аспекты создания системы мониторинга металлорежущего оборудования с применением машинного обучения // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2024. Т. 21, № 10. С. 10–16. DOI: 10.14489/vkit.2024.10.pp.010-016.
2. Montero Jimenez J.J., Schwartz S., Vingerhoeds R., et al. Towards multi-model approaches to predictive maintenance: A systematic literature survey on diagnostics and prognostics // Journal of Manufacturing Systems. 2020. Vol. 56. P. 539–557. DOI: 10.1016/j.jmsy.2020.04.012.
3. Fahle S., Prinz C., Kühlenkötter B. Systematic review on machine learning (ML) methods for manufacturing processes – Identifying artificial intelligence (AI) methods for field application // Procedia CIRP. 2020. Vol. 93. P. 413–418. DOI: 10.1016/j.procir.2020.04.109.
4. Montero Jimenez J.J., Schwartz S., Vingerhoeds R., Grabot B., Salaiin M. Towards multi-model approaches to predictive maintenance: A systematic literature survey on diagnostics and prognostics // Journal of Manufacturing Systems. 2020. Vol. 56. P. 539–557. DOI: 10.1016/j.jmsy.2020.04.012.
5. Çınar Z.M., Nuhu A.A., Zeeshan Q., Korhan O., Asmael M., Safaei B. Machine learning in predictive maintenance towards sustainable smart manufacturing in Industry 4.0 // Sustainability. 2020. Vol. 12, No. 19. P. 8211. DOI: 10.3390/su12198211.
6. Krupitzer C., Wagenhals T., Züfle M., Lesch V., Schäfer D., Mozaffarin A., Edinger J., Becker C., Kounev S. A survey on predictive maintenance for Industry 4.0 // arXiv preprint. 2020. arXiv:2002.08224. DOI: 10.48550/arXiv.2002.08224. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2002.08224>
7. Munaro R., Attanasio A., Del Prete A. Tool wear monitoring with artificial intelligence methods: A review // Journal of Manufacturing and Materials Processing. 2023. Vol. 7, No. 4. P. 129. DOI: 10.3390/jmmp7040129.
8. James G., Witten D., Hastie T., Tibshirani R. An Introduction to Statistical Learning, With Applications in Python. 2nd ed. New York: Springer, 2023. 597 p.
9. Vapnik V.N. The Nature of Statistical Learning Theory. New York: Springer, 2000. 314 p.
10. Agogino A., Goebel K. Milling Data Set [Электронный ресурс]. 2007. Режим доступа: <http://ti.arc.nasa.gov/project/prognostic-data-repository> (дата обращения: [2025]).

Джавадов Натиг Гаджи. Национальное Аэрокосмическое Агентство, г. Баку, Азербайджан. Генеральный Директор, доктор технических наук, профессор. Область научных интересов: информационные технологии, автоматизация производства. E-mail: cavadov-natiq@mail.ru

Амиров Али Мансималы. Национальное Аэрокосмическое Агентство, г. Баку, Азербайджан. Главный научный сотрудник, кандидат технических наук, доцент. Область научных интересов: информационные технологии, автоматизация производства. E-mail: ali.amirov@mail.com

Исмаилов Вугар Мехман. Национальное Аэрокосмическое Агентство, г. Баку, Азербайджан. Научный сотрудник, докторант. Область научных интересов: информационные технологии, автоматизация производства. E-mail: ismailovvugar99@gmail.com (ответственный за переписку)

Development of an SVM model for predictive maintenance of metal-cutting equipment.

N.G. Javadov, A.M. Amirov, V.M. Ismayilov

National Aerospace Agency, Baku, Azerbaijan

Abstract. This article is devoted to the development of a machine learning model for optimizing cutting tool maintenance using the support vector machines (SVM). The paper considers the main stages of creating a multiclass classification model from pre-processing of raw signals to selection of hyperparameters. The choice of the algorithm is determined by computational efficiency, as well as the possibility of working with data with nonlinear structure. As a result of testing the model, the average accuracy reached 81%. The obtained results demonstrate that the algorithm based on the method of support vectors can handle the task in conditions of limited computational power.

Keywords: *machine learning, smart manufacturing, support vector method, metalworking, predictive maintenance.*

DOI: 10.14357/20790279250209 **EDN:** AMBERY

References

1. Javadov N.G., Amirov A.M., Ismayilov V.M. 2024. Tehnicheskie aspekty sozdaniya sistemy monitoringa metallorazhushhego oborudovaniya s primeneniem mashinnogo obuchenija. Vestnik komp'yuternykh i informacionnykh tehnologiy 21(10):10–16. doi:10.14489/vkit.2024.10.pp.010-016.
2. Montero Jimenez J.J., Schwartz S., Vingerhoeds R., et al. Towards multi-model approaches to predictive maintenance: A systematic literature survey on diagnostics and prognostics // Journal of Manufacturing Systems. 2020. Vol. 56. P. 539–557. DOI: 10.1016/j.jmsy.2020.04.012.
3. Fahle S., Prinz C., Kuhlentötter B. Systematic review on machine learning (ML) methods for manufacturing processes – Identifying artificial intelligence (AI) methods for field application // Procedia CIRP. 2020. Vol. 93. P. 413–418. DOI: 10.1016/j.procir.2020.04.109.
4. Montero Jimenez J.J., Schwartz S., Vingerhoeds R., Grabot B., Salaiin M. Towards multi-model approaches to predictive maintenance: A systematic literature survey on diagnostics and prognostics // Journal of Manufacturing Systems. 2020. Vol. 56. P. 539–557. DOI: 10.1016/j.jmsy.2020.04.012.
5. Çınar Z.M., Nuhu A.A., Zeeshan Q., Korhan O., Asmael M., Safaei B. Machine learning in predictive maintenance towards sustainable smart manufacturing in Industry 4.0 // Sustainability. 2020. Vol. 12, No. 19. P. 8211. DOI: 10.3390/su12198211.
6. Krupitzer C., Wagenhals T., Züfle M., Lesch V., Schäfer D., Mozaffarin A., Edinger J., Becker C., Kounev S. A survey on predictive maintenance for Industry 4.0 // arXiv preprint. 2020. arXiv:2002.08224. DOI: 10.48550/arXiv.2002.08224. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2002.08224>
7. Munaro R., Attanasio A., Del Prete A. Tool wear monitoring with artificial intelligence methods: A review // Journal of Manufacturing and Materials Processing. 2023. Vol. 7, No. 4. P. 129. DOI: 10.3390/jmmp7040129.
8. James G., Witten D., Hastie T., Tibshirani R. An Introduction to Statistical Learning, With Applications in Python. 2nd ed. New York: Springer, 2023. 597 p.
9. Vapnik V.N. The Nature of Statistical Learning Theory. New York: Springer, 2000. 314 p.
10. Agogino A, Goebel K. Milling Data Set. 2007. doi:<http://ti.arc.nasa.gov/project/prognostic-data-repository>.

Natig H. Javadov. Professor. Doctor of Technical Sciences, National Aerospace Agency, Baku, Azerbaijan. Research interests: information technologies, production automation. E-mail: cavadov-natig@mail.ru

Ali M. Amirov. Candidate of Technical Sciences. National Aerospace Agency, Baku, Azerbaijan. Research interests: information technologies, production automation. E-mail: ali.amirov@mail.com

Vugar M. Ismayilov. National Aerospace Agency, Baku, Azerbaijan. Research interests: information technologies, production automation. E-mail: ismailovvugar99@gmail.com



ИНФОРМАЦИЯ О КОМПАНИИ «ПОЛИ ПРИНТ СЕРВИС»

ИЗДАТЕЛЬСКАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ

Поли Принт Сервис специализируется на издании как научных, так и научно-популярных книг, в первую очередь – по теории систем и системному анализу, экономике и математике.

РЕКЛАМНО-ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ

Многофункциональное современное предприятие Поли Принт Сервис выпускает самую разнообразную печатную продукцию.

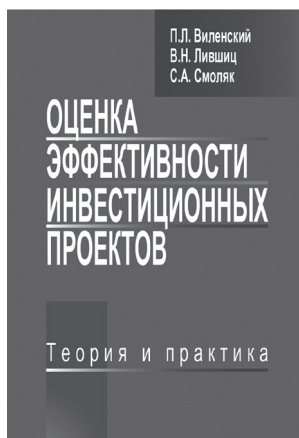
Широкая видовая гамма: этикетки, визитки, листовки, бланки, календари карманные, настольные и настенные, открытки, папки, блокноты, плакаты, постеры, пластиковые карты, таблички, буклеты, альбомы, брошюры, журналы, книги и пр.

У нас собственная полиграфическая база – оборудование для цифровой и офсетной печати. Ограничений в тираже нет – хоть пять экземпляров.

Сделайте первый шаг на пути нашего сотрудничества. Мы подберём для Вас лучший, технологичный вариант по соотношению цены и качества, выполним работу в чётко оговоренный срок.

Наши цены вполне доступные, не выше, чем у наших конкурентов.

Предлагаем вашему вниманию новую книгу нашего издательства!



Виленский П.Л., Лившиц В.Н., Смоляк С.А.

Оценка эффективности инвестиционных проектов.

Теория и практика. Учебное пособие.

5-е издание, переработанное и дополненное.

Книга посвящена экономическим проблемам инвестиционного проектирования, оценке эффективности проектов на разных стадиях их разработки, построению рациональных механизмов реализации проектов, методам отбора проектов и формирования инвестиционных программ в современных российских условиях. В ней приводятся варианты постановки соответствующих задач, принципы и «рецепты» их решения, необходимые содержательные и математические обоснования, разъясняются типовые ошибки, встречающиеся в практике расчёта.

Изложенные методы приспособлены как к стационарной рыночной, так и к современной рыночной экономике. Книга позволяет начинающим специалистам, студентам и аспирантам использовать ее как учебное пособие, а научным работникам, проектировщикам-профессионалам и оценщикам-практикам – как пособие для решения сложных методических и практических проблем.

По вопросам приобретения книг

звоните: (495) 797-35-59, (495) 797-85-59

приезжайте: г. Москва, ул. Бутырская, д. 86,

г. Москва, Дмитровское шоссе, д. 100, стр. 2

издательство «Поли Принт Сервис»

пишите: info@ppsprint.ru

Trudy Instituta sistemnogo analiza Rossiyskoy akademii nauk (ISA RAN) **(Proceedings of the Institute for Systems Analysis Russian Academy of Sciences (ISA RAS))**

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

The journal was founded in 2002
The journal is published quarterly

Founder

Federal Research Center "Computer Science and Control" of Russian Academy of Sciences (FRC CSC RAS)
44/2, Vavilova str., Moscow, 119333, Russia, tel: +7(499)135-62-60,
e-mail: frccsc@frccsc.ru, <http://www.frccsc.ru>

Editor-in-Chief

Popkov Y.S., Academician of RAS, Professor,
9, Prospekt 60-letiya Oktyabrya, Moscow, 117312, Russia,
tel: +7(499)135-42-22, e-mail: popkov@isa.ru

Editorial Chairs

Popkov Y.S., Academician of RAS, Professor
Chairman of Editorial Board (Moscow, Russia)
Konstantinov I.S., Professor (Belgorod, Russia)
Scherbov S.Y., Professor (Vienna, Austria)
Smuelian B.L., Professor (Tel-Aviv, Israel)
Solovyov A.V., Professor,
Deputy Editor-in-Chief (Moscow, Russia)
van Wissen Leonardus J.G., Professor (Amsterdam, Netherlands)

Editorial Board

Aleskerov F.T., Professor (Moscow, Russia)	Livshits V.N., Professor (Moscow, Russia)
Ashimov A.A., Professor (Almaty, Kazakhstan)	Magnitsky N.A., Professor (Moscow, Russia)
Belov S.P., Professor (Belgorod, Russia)	Masloboev A.B., Professor (Apatity, Russia)
Bulychev A.V., Ph.D., Executive Secretary (Moscow, Russia)	Mizhidon A.D., Professor (Ulan-Ude, Russia)
Burkov V.N., Professor (Moscow, Russia)	Orlova E.R., Professor (Moscow, Russia)
Gelovani V.A., Academician of RAS, Professor (Moscow, Russia)	Petrovsky A.B., Professor (Moscow, Russia)
Ilin A.V., Corresponding Members of RAS (Moscow, Russia)	Shvetsov A.N., Professor (Moscow, Russia)
Krut'ko V.N., Professor (Moscow, Russia)	Smirnov A.V., Professor (St. Petersburg, Russia)
Lexin V.N., Professor (Moscow, Russia)	Tishenko V.I., Ph.D. (Moscow, Russia)
	Voytishek A.V., Professor (Novosibirsk, Russia)

Editorial Office

Shibaeva L.S., managing editor

Editorial address

9, Prospekt 60-letiya Oktyabrya, Moscow, 117312, Russia
E-mail: tisa@isa.ru, tel. +7 (499) 135-24-33, +7 (926) 490-87-87

Scientific journal "Trudy Instituta sistemnogo analiza Rossiyskoy akademii nauk (ISA RAN)" publishes materials on a wide range of fundamental problems of developing systems analysis methodology and its applying to solving various problems in the field of science and practice. The journal is destined for scientists, engineers and researches working within the framework of these problems, as well as for politicians, employees of state and municipal departments, specialists of enterprises and representatives of social organizations. The rules for articles submission to the journal, as well as for their review are given at the journal's site

The journal is registered in Federal service of observing and controlling legislation in the area of mass media and protection of cultural heritage in 20 of May 2016. Digital certificate - ПИИ № ФС77-65718.
Journal Subscription Index in the Ural-Press e-catalog (<http://ural-press.ru>) is 0145787.

The journal is supported by the Department of Information Technologies and Computing Systems of the Russian Academy of Sciences.
The journal is included in the list of leading peer-reviewed scientific journals recommended by the Higher Attestation Commission.
Permission of the editorial board and authors is required when using data of the journal.

© Federal Research Center "Computer Science and Control" of Russian Academy of Sciences

Vol. **75**
Issue **2**

ISSN 2079-0279

2025

TRUDY
INSTITUTA SISTEMNOGO ANALIZA
ROSSIYSKOY AKADEMII NAUK (ISA RAN)
(PROCEEDINGS OF THE INSTITUTE FOR SYSTEMS ANALYSIS
RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES (ISA RAS))

ISBN 978-5-6052187-9-1



Отпечатано в ООО «Поли Принт Сервис»
127015, г. Москва, ул. Бутырская, д. 86
127247, г. Москва, Дмитровское шоссе, д. 100, стр. 2
Формат 60x84/8. Зак. № В-101
Тираж 100 экз.
Тел.: +7 (495) 797-35-59