

Вестник НГУЭУ. 2022. № 4. С. 76–91

Vestnik NSUEM. 2022. No. 4. P. 76–91

Научная статья

УДК 332.146:339.132.2:519.8(571.13/.55)

DOI: 10.34020/2073-6495-2022-4-076-091

МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕГИОНОВ СИБИРСКОГО ФЕДЕРАЛЬНОГО ОКРУГА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КРИВОЙ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ

Михальчук Александр Александрович¹,

Чистякова Наталья Олеговна²,

Акерман Екатерина Александровна³,

Татарникова Валерия Владимировна⁴

^{1, 2, 4} *Национальный исследовательский Томский политехнический университет*

³ *Национальный исследовательский Томский государственный университет*

¹ aamih@tpu.ru

² worldperson@mail.ru

³ akerman-ekaterina@rambler.ru

⁴ tvv0907@yandex.ru

Аннотация. Актуальность исследования обусловлена проблематикой повышения конкурентоспособности регионов за счет применения методов концепции догоняющего и опережающего технологического развития к оценке технической эффективности регионов. Использован комплексный подход измерения технической эффективности региона различными методами (DEA-метод и MPI, SFA-метод и производственной функции Кобба–Дугласа), расширенного кластерными и дисперсионными методами как аналитического инструмента для разработки имитационных стратегий развития регионов.

Объектом исследования являются регионы Сибирского федерального округа, которые отличаются масштабом, структурой экономики и уровнем социально-экономического развития.

Результаты исследования показали эффективность использования комплексного подхода измерения технической эффективности для разработки имитационных стратегий развития регионов.

Ключевые слова: имитационное моделирование, SFA-метод, DEA-метод, индекс Малмквиста, метод Кобба–Дугласа, регионы СФО, техническая эффективность

Финансирование. Исследование выполнено в рамках гранта Российского научного фонда «Глобальная конкурентоспособность и технологическое лидерство регионов: Переосмысление подходов к формированию макрорегионального экономического пространства», соглашение № 22-28-01325.

Для цитирования: Михальчук А.А., Чистякова Н.О., Акерман Е.А., Татарникова В.В. Методы оценки технической эффективности регионов Сибирского федерального округа с использованием кривой производственных возможностей // Вестник НГУЭУ. 2022. № 4. С. 76–91. DOI: 10.34020/2073-6495-2022-4-076-091.

Original article

EVALUATION METHODS OF THE TECHNICAL EFFICIENCY OF THE SIBERIAN FEDERAL DISTRICT REGIONS USING THE PRODUCTION POSSIBILITIES CURVE

Mikhailchuk Alexander A.¹, Chistyakova Natalya O.²,
Akerman Ekaterina A.³, Tatarnikova Valeriya V.⁴

^{1, 2, 4} *National Research Tomsk Polytechnic University*

³ *National Research Tomsk State University*

¹ aamih@tpu.ru

² worldperson@mail.ru

³ akerman-ekaterina@rambler.ru

⁴ tvv0907@yandex.ru

Abstract. The relevance of the exploration is due to the problem of increasing the regions competitiveness by applying the methods of concept catching up and advancing technological development to assess the regions technical efficiency.

A comprehensive approach is used to measure the technical efficiency of the region by various methods (DEA-method and MPI, SFA-method and the Cobb-Douglas production function), extended by cluster and dispersion methods as an analytical tool for designing simulation strategies for the development of regions.

The object of the research is the regions of the Siberian Federal District, which differ in scale, economic structure and level of socio-economic development.

The results of the research showed the effectiveness of using an integrated approach to measuring technical efficiency to develop simulation strategies for the development of regions.

Keywords: simulation modeling, SFA method, DEA method, malmquist index, Cobb–Douglas production function, Siberian Federal District regions, technical efficiency

Financing. The study was carried out within the framework of the Russian Science Foundation grant “Global Competitiveness and Technological Leadership of the Regions: Rethinking Approaches to the Formation of the Macroregional Economic Space”, agreement No. 22-28-01325.

For citation: Mikhailchuk A.A., Chistyakova N.O., Akerman E.A., Tatarnikova V.V. Evaluation methods of the technical efficiency of the Siberian Federal District regions using the production possibilities curve. *Vestnik NSUEM*. 2022; (4): 76–91. (In Russ.). DOI: 10.34020/2073-6495-2022-4-076-091

Введение

Концепция технологического развития (догоняющего и опережающего) предполагает анализ возможностей (глобальных и локальных) и исследования технической эффективности региона посредством опережающего смещения кривой производственных возможностей (фронта) или догоняющего приближения к фронтиру. При этом методы оценки эффективности разделяют на коэффициентный и эконометрический, а также на граничный и неграничный анализ [3, 6, 7].

Коэффициентный подход предполагает сравнение фактически достигнутых результатов с нормативными значениями, эконометрический под-

ход – оценку в сравнении с лидером, эффективно использующим имеющиеся ресурсы, на основании граничного анализа, который с учетом особенностей построения фронта базируются на непараметрическом (кусочно-линейная граница методом математического программирования) и параметрическом (гладкая граница на основе регрессионной модели производственной функции); стохастическом и детерминированном подходах.

В данном исследовании на основе граничного подхода применены следующие базовые методы анализа эффективности [1]:

В рамках параметрического метода – Stochastic Frontier Analysis (SFA) [14, 17, 23]. Оценка эффективности деятельности региона связана с идентификацией производственной функции (наиболее часто используемой Кобба–Дугласа).

В рамках непараметрического метода – Data Envelopment Analysis (DEA) [19].

Дискуссионной остается проблема различий в оценках эффективности на основе этих подходов.

Целью исследования является апробация инструментария оценки динамической эффективности социально-экономического развития регионов Сибирского федерального округа (далее – регионы СФО) периода 2010–2020 гг.

Основные задачи, решаемые в рамках исследования:

1. Расчет показателей DEA и SFA-эффективности регионов СФО по совокупности показателей результативности (ВРП) и ресурсов (УЗН, ИОК).
2. Построение имитационного пространства регионов в координатах показателей ресурсов и результатов на основании метода DEA.
3. Выявление неоднородности статических и динамических показателей эффективности регионов СФО.
4. Оценка влияния ресурсов (УЗН, ИОК) на результативность (ВРП) эконометрическим методом с помощью производственной функции Кобба–Дугласа.

Методология исследования

1. В DEA-методе [18, 23] используются две разновидности моделей: модели (input-oriented) для оценивания эффективности минимизации использования ресурсов (УЗН, ИОК) и модели (output-oriented) для оценки эффективности максимизации получения результата (ВРП).

Метод DEA предлагает 2-летнюю динамическую характеристику прогресса (регресса) эффективности – Malmquist productivity index (MPI). Значения $MPI < 1$ соответствуют снижению, $MPI = 1$ постоянству и $MPI > 1$ росту эффективности в течение исследуемого периода [21, 24].

Индекс Малмквиста рассчитывается по формуле:

$$MPI = EFF \cdot TECH, \quad (1)$$

где EFF – (Catch-up Effect) определяется отношением $TECr_{t+1}$ периода $t + 1$ к $TECr_t$ периода t и соответствует повышению эффективности региона в случае $EFF > 1$.

TECH – (Frontier Shift Effect) является мерой сдвига фронта в случае $TECH > 1$ при технологическом улучшении между периодами [15, 16].

Наряду с краткосрочной (2-летней) динамикой МРІ используется долгосрочная (более 2-летней), которая оценивается линейным трендом $\alpha \cdot t + b$, где $\alpha > 0$ соответствует прогрессу, а $\alpha < 0$ – регрессу [20].

Расчеты выполнены с помощью программных продуктов: DEAP [27] и STATISTICA [10, 26].

Метод DEA (анализ среды функционирования [8]) позволяет анализировать разностороннюю эффективность регионов с позиции возможностей технологического арбитража. Так, в работе М.В. Цапенко [11] рассмотрена инновационная эффективность регионов, у А.Н. Порунова [8] изучается экологическая эффективность, а в работе Н.В. Ивлевой, О.О. Комаревцевой [4] – финансовая и социальная эффективности.

II. В методе SFA [14, 17, 22], в отличие от DEA, допускается наличие случайных отклонений от фронта, а оценка эффективности методом максимального правдоподобия ($IE_{SFA} = e^{-u}$) связана с идентификацией простейшей спецификации производственной функции Кобба–Дугласа:

$$\ln y = \beta_0 + \beta_1 \ln x_1 + \dots + \beta_k \ln x_k + v - u. \quad (2)$$

В нашем случае:

$$\begin{aligned} y &= \text{ВРП} = \gamma \cdot (\text{УЗН})^\alpha \cdot (\text{ИОК})^\beta \text{ или } \lg y = \\ &= \lg \gamma + \alpha \cdot \lg (\text{УЗН}) + \beta \cdot \lg (\text{ИОК}), \end{aligned} \quad (3)$$

где γ – технологический коэффициент; α и β – коэффициенты эластичности (ВРП) по затратам труда (УЗН) и капитала (ИОК) [2, 5, 9].

Оценки параметров функции Кобба–Дугласа получаются методом наименьших квадратов (МНК) применительно к уравнению линейной регрессии (3). При этом для оценки качества модели используются следующие показатели: R^2 – коэффициент детерминации и F-статистика (критерий Фишера).

III. Неоднородность регионов по показателям оценивается кластерным анализом на основе методов К-средних и иерархической кластеризации.

IV. Для сравнительного анализа регионов СФО применялись непараметрические характеристики, диаграммы размаха и дисперсионный анализ.

В расчетах использованы программные продукты: DEAP [27] и STATISTICA [11, 26].

Объектом исследования являются 10 регионов Сибирского федерального округа (регионы СФО): Красноярский (далее аббревиатура на графике – КК) и Алтайский (АК) края, Омская (ОО), Иркутская (ИО), Новосибирская (НО), Томская (ТО), Кемеровская (КО) области, Республики Хакасия (РХ), Алтай (РА) и Тыва (РТ).

Регионы СФО имеют высокий уровень дифференциации по основным макроэкономическим показателям, различную структуру промышленности, что предопределяет наличие разных вариантов стратегий технологического развития. Базой данных исследования являются статистические показатели социально-экономического развития регионов [25].

Ресурсные показатели:

УЗН – Уровень занятости населения в возрасте 15–72 лет, %;

ИОК – Инвестиции в основной капитал с учетом цен (с лагом в год), млрд руб.

Показатель результативности:

ВРП – Валовый региональный продукт (с учетом дефлятора), млн руб.

Неоднородность регионов по показателям позволяет применить кластерный анализ для исходной типологизации регионов СФО [12]. С помощью кластерного анализа по совокупности исходных стандартизованных показателей, усредненных за 2010–2020 гг., получено разбиение 10 регионов СФО на пять кластеров. Между кластерами различия оценены по стандартизированной шкале в один стандарт как статистически значимые по крайней мере по одному из системы показателей кластеризации:

– Красноярский край (K1) – лидер по результату (ВРП) и затратам (ИОК);

– Новосибирская, Кемеровская и Иркутская области (K2) – средний по результату (ВРП) и выше среднего по затратам (ИОК);

– Томская и Омская области, Алтайский – средний по результату (ВРП) и средний по затратам (ИОК);

– Республики Алтай и Хакасия (K4) – средний по результату (ВРП), ниже среднего по затратам (ИОК);

– Республика Тыва (K5) – аутсайдер по затратам (УЗН).

Результаты исследования

Метод DEA

Расчеты технической эффективности (ТЕ) регионов СФО проведены методом DEA_{VRS} с использованием моделей, ориентированных на выход (т.е. на максимизацию результата при фиксированных затратах) – (TE_{out}) , а также методом SFA с использованием функции Кобба–Дугласа при полунормальном распределении компоненты неэффективности.

В случае метода DEA применительно к совокупности показателей результативности (ВРП) и ресурсов (УЗН, ИОК) расчеты технической эффективности (ТЕ) регионов СФО являются продолжением исследований в работах [12, 13].

DEA (OUT/IN_VRS) позволяет оценить как $TE_{вых}$ по максимизации (ВРП) при фиксированном (УЗН), так и $TE_{вх}$ при минимизации (УЗН) при фиксированном (ВРП). Графическая интерпретация фронта эффективности и рассеивание регионов относительно него в координатах (ВРП, УЗН) представлена на рис. 1. Графически техническая эффективность $TE_{вых}$ определяется как отношение расстояния от оси ресурсов до фактического положения к расстоянию от оси ресурсов до точки имитационного положения региона (ломаная прямая коричневого цвета). Аналогично, $TE_{вх}$ определяется как отношение расстояния от оси результатов до точки имитационного положения региона фактического положения к расстоянию от оси результатов до фактического положения.

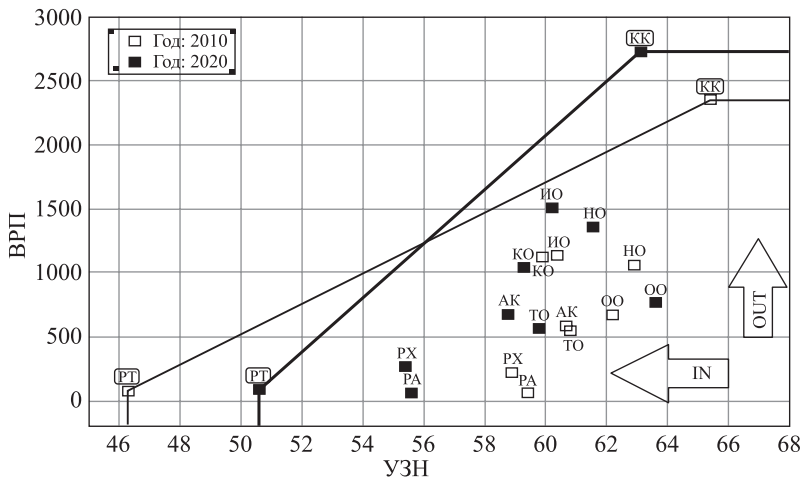


Рис. 1. Диаграмма рассеяния регионов СФО относительно фронтиров (показатели ВРП, УЗН за 2010 и 2020 гг.)
Scatterplot of regions of the Siberian Federal District relative to the frontiers (indicators of GRP, UZN for 2010 and 2020)

Регионы-лидеры по технической эффективности (ТЕ) с учетом ее динамики (МРІ) в 2010 г.: Красноярский край – относительно высокие затраты ресурса (УЗН) и относительно высокий результат (ВРП); Республика Тыва – относительно низкие затраты ресурса (УЗН) и относительно низкий результат (ВРП). В 2020 г. группа лидеров сохранилась. Снижение динамической эффективности в 2020 г. относительно 2010 г. отмечено в Республике Тыва и Кемеровской области ($MPI < 1$), и рост данного показателя в Республиках Алтай и Хакасия, Алтайском и Красноярском крае, Иркутской, Томской, Новосибирской и Омской областях ($MPI > 1$).

Графическая интерпретация фронта эффективности и рассеивание регионов относительно него в координатах (ВРП, ИОК) представлена на рис. 2.

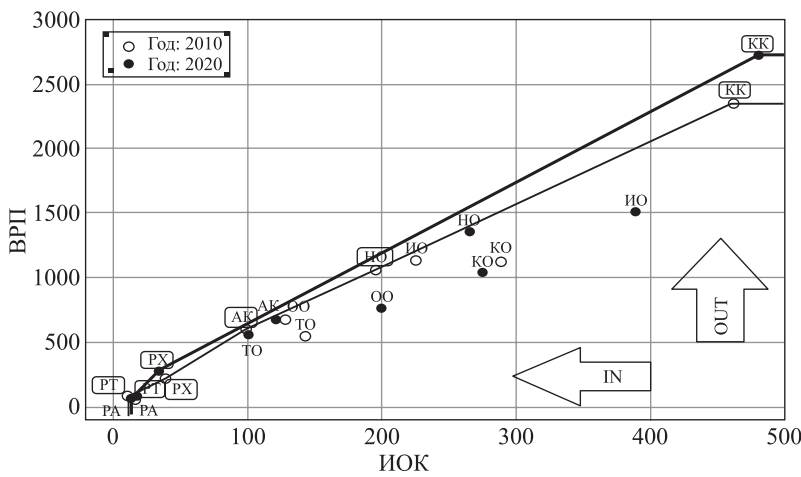


Рис. 2. Диаграмма рассеяния регионов СФО относительно фронтиров (показатели ИОК, ВРП за 2010 и 2020 гг.)
Scatterplot of SFD regions relative to frontiers (indicators of IEC, GRP for 2010 and 2020)

Регионами-лидерами по технической эффективности (ТЕ) с учетом ее динамики (МРІ) в 2010 г. являются: Красноярский край – относительно высокие затраты ресурса (ИОК) и относительно высокий результат (ВРП); Республики Хакасия и Тыва – относительно низкие затраты ресурса (ИОК) и относительно низкий результат (ВРП); Новосибирская область и Алтайский край – относительно средние затраты ресурса (ИОК) и относительно средний результат (ВРП). В 2020 г. лидерство потеряли Алтайский край и Новосибирская область.

Рассмотрим построенное имитационное пространство регионов на примере Омской области за 2020 г.:

1. Параметры выхода OUT: $TE_{\text{вых}} \approx 0,68$; $\Delta TG_{\text{ВРП}}$ составляет 46,23 % (с ВРП = 763,47 до ВРП_{ТГ} = 116,4); с wg (Красноярский край) = 0,346 и wg (Республика Хакасия) = 0,654.

2. Параметры входа IN: $TE_{\text{вх}} \approx 0,85$; $\Delta TG_{\text{УЗН}}$ составляет 15,37 % (с УЗН = 63,6 до УЗН_{ТГ} = 53,8) и $\Delta TG_{\text{ИОК}}$ составляет 26,63 % (с ИОК = 180,7 до ИОК_{ТГ} = 132,6); с wg (Красноярский край) = 0,26 и wg (Республика Хакасия) = 0,74.

Неоднородность имитационных показателей регионов СФО позволяет применить кластерный анализ для имитационной типологизации, что позволило получить распределение 10 регионов на четыре кластера по минимизации ресурсов (IN в случае ВРП; УЗН_{ТГ}; ИОК_{ТГ}) и на шесть кластеров по максимизации результата (OUT в случае ВРП_{ТГ}; УЗН; ИОК) (рис. 3).

Эффекты как минимизации ресурсов (IN), так и максимизации результата (OUT) существенным образом повлияли на результаты исходной типологизации регионов СФО [12]. Так, например, в случае минимизации ресурсов (IN) это привело к исчезновению кластера 5 и перераспределению регионов по всем кластерам, кроме Красноярского края (К1), а в случае максимизации результата (OUT) это привело к сохранению трех кластеров К1, К4, К5, образованию нового кластера К23 (Новосибирской области из (К2) и Омской области из (К3) и перераспределению регионов по остальным кластерам.

Метод SFA

Наряду с методом DEA_{VRS} расчеты показателя технической эффективности (ТЕ) проведены методом SFA.

Распределение показателей эффективности, полученных в результате SFA и DEA_{out} , существенно отличается от нормального закона и высокозначимо по критерию Пирсона (рис. 4). Следовательно, в дальнейших расчетах применены методы и характеристики непараметрической статистики.

Расчеты показывают высокую эффективность СФО (по совокупности регионов на период 2010–2020 гг.) как по методу DEA (среднее $\approx 0,875$, медиана $\approx 0,946$), так и SFA (среднее $\approx 0,923$, медиана $\approx 0,948$), коррелируемых согласно высокозначимому (на уровне значимости $p < 0,001$) ранговому коэффициенту корреляции Спирмена $R \approx 0,563$. Причем $TE_{\text{DEA}} \approx TE_{\text{SFA}}$ согласно ранговому критерию Краскела–Уоллиса.

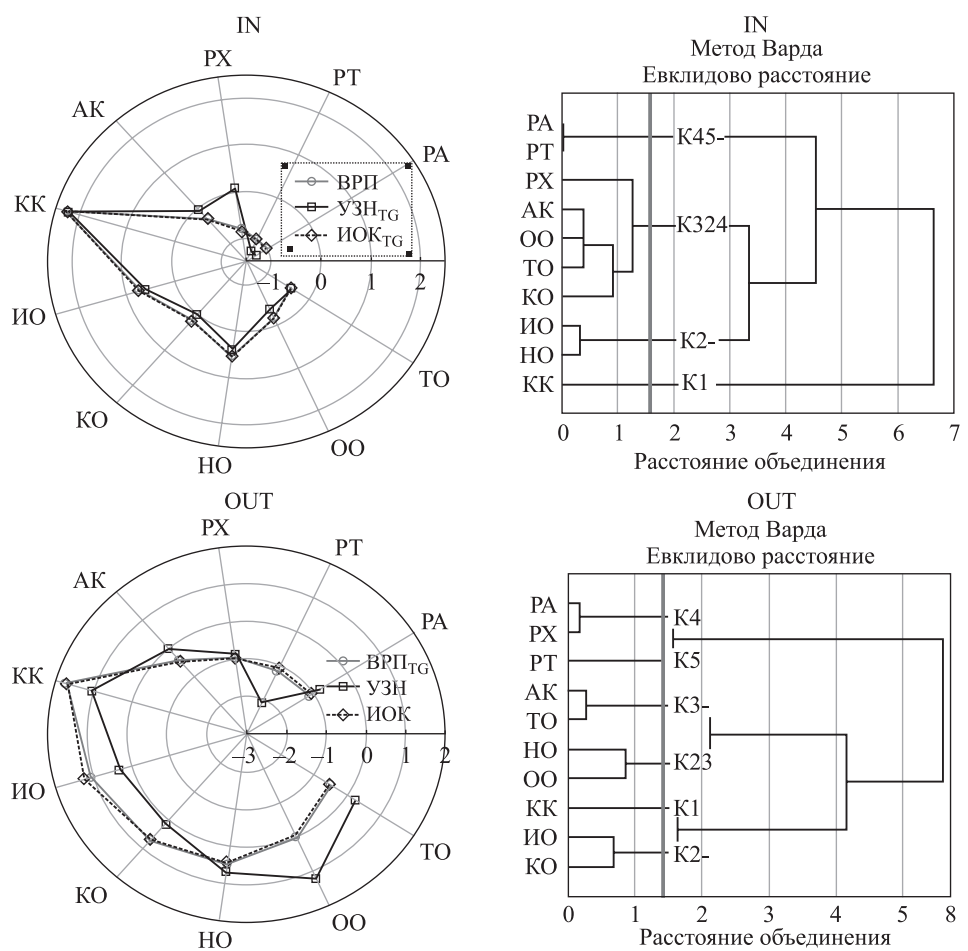


Рис. 3. Линейные графики стандартизированных показателей и дендрограммы имитационных показателей регионов СФО (вход – сверху, выход – снизу)
Linear graphs of standardized indicators and dendrograms of simulation indicators of the regions of the Siberian Federal District (input – from above, output – from below)

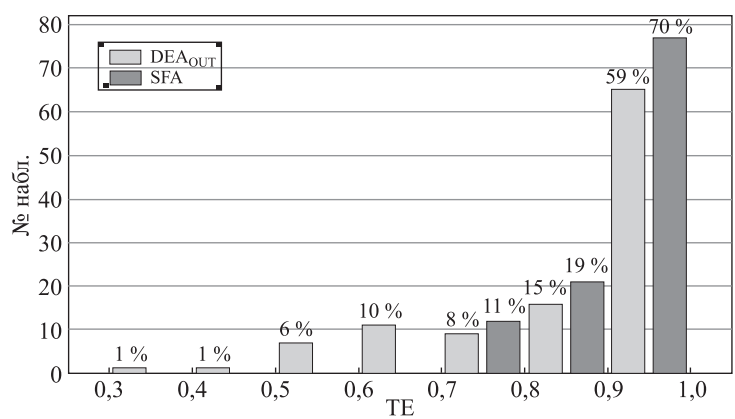


Рис. 4. Гистограмма распределения показателя эффективности методами SFA и DEА_{out} (регионы СФО за 2010 и 2020 гг.)
Histogram of the distribution of the efficiency indicator by the SFA and DEА_{out} methods (regions of the Siberian Federal District, for 2010. and 2020)

Исследование выявило неоднородность регионов СФО по показателю эффективности SFA и DEA_{out} .

Вычисленные числовые характеристики TE по методам DEA и SFA регионов СФО приведены в табл. 1.

Таблица 1

Числовые характеристики показателей эффективности регионов СФО по методам DEA и SFA

Numerical characteristics of performance indicators of the regions of the Siberian Federal District according to the DEA and SFA methods

Метод	Reg(p)	<i>n</i>	<i>m</i>	Me	25–75 %	<i>R</i> (p)
DEA_{out}	РА (<i>p</i> ≈ 0,2772)	11	0,697	0,578	0,480	0,744** (<i>p</i> ≈ 0,0086)
SFA		11	0,786	0,760	0,085	
DEA_{out}	РТ*** (<i>p</i> ≈ 0,0000)	11	1,000	1,000	0,000	0,551† (<i>p</i> ≈ 0,079)
SFA		11	0,958	0,986	0,095	
DEA_{out}	РХ (<i>p</i> ≈ 0,217)	11	0,951	1,000	0,118	0,832** (<i>p</i> ≈ 0,0015)
SFA		11	0,973	0,979	0,041	
DEA_{out}	АК (<i>p</i> ≈ 0,4489)	11	0,940	0,950	0,112	0,554† (<i>p</i> ≈ 0,0772)
SFA		11	0,973	0,974	0,049	
DEA_{out}	КК*** (<i>p</i> ≈ 0,0000)	11	1,000	1,000	0,000	0,4530 (<i>p</i> ≈ 0,162)
SFA		11	0,966	0,970	0,056	
DEA_{out}	ИО (<i>p</i> ≈ 0,1227)	11	0,859	0,889	0,149	0,554† (<i>p</i> ≈ 0,0772)
SFA		11	0,925	0,927	0,052	
DEA_{out}	КО** (<i>p</i> ≈ 0,0095)	11	0,692	0,658	0,242	0,645* (<i>p</i> ≈ 0,0320)
SFA		11	0,848	0,844	0,074	
DEA_{out}	НО (<i>p</i> ≈ 0,1021)	11	0,969	1,000	0,055	0,147 (<i>p</i> ≈ 0,6654)
SFA		11	0,977	0,986	0,042	
DEA_{out}	ОО (<i>p</i> ≈ 0,3086)	11	0,927	0,946	0,079	0,132 (<i>p</i> ≈ 0,6986)
SFA		11	0,963	0,969	0,042	
DEA_{out}	ТО*** (<i>p</i> ≈ 0,0007)	11	0,719	0,708	0,070	0,927*** (<i>p</i> ≈ 0,0000)
SFA		11	0,860	0,847	0,067	
DEA_{out}	СФО	110	0,875	0,946	0,235	0,563*** (<i>p</i> ≈ 0,0000)
SFA		110	0,923	0,948	0,102	

По критерию Краскела–Уоллиса TE_{DEA} высокосignificantly выше по сравнению с TE_{SFA} для Красноярского края, Республики Тыва; высокосignificantly ниже с методом SFA для Томской области; сильноsignificantly ниже с методом SFA для Кемеровской области; неsignificantly различается для остальных регионов СФО. Геометрическая интерпретация этих результатов (TE) по методам SFA и DEA_{out} (усредненных по периоду 2010–2020 гг.) в регионах СФО в сопоставлении соответствующих медиан (рис. 5).

Кластерный анализ выделяет 4 группы разнородных различий (TE) по методам SFA и DEA_{out} регионов СФО (рис. 6, справа).

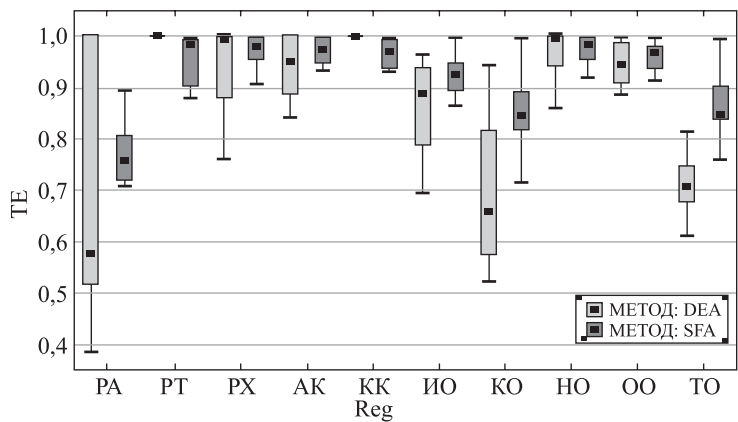


Рис. 5. Диаграмма размаха усредненных значений ТЕ за период 2010–2020 гг. в регионах СФО (точка – медиана, прямоугольник – 25–75 % квартильный размах, усы – полный размах без выбросов)
Range chart of averages TE for the period 2010–2020 in the regions of the Siberian Federal District (point – median, rectangle – 25–75 % quartile range, whiskers – full range without outliers)

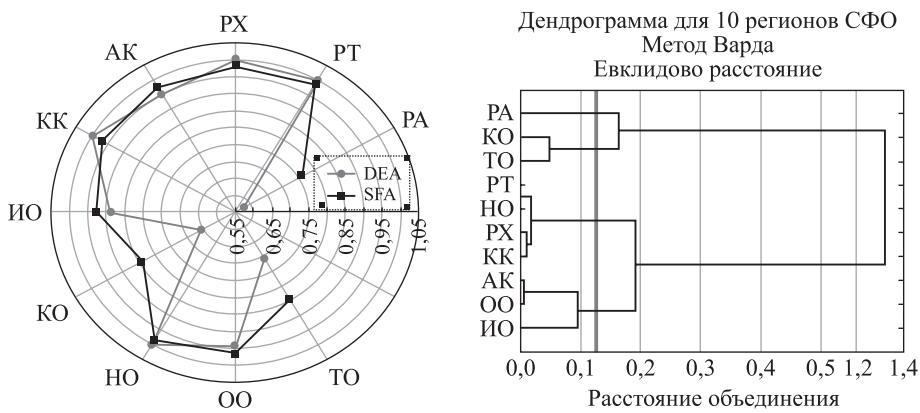


Рис. 6. Линейные графики усредненных за период 2010–2020 гг. значений медиан ТЕ по методам SFA и DEA_{out} (слева) и соответствующая дендрограмма (справа), регионы СФО

Linear graphs of averaged over the period 2010–2020 TE median values by SFA and DEA_{out} methods (left) and the corresponding dendrogram (right), regions of the Siberian Federal District

Расчеты показали различия результатов, полученных методами SFA и DEA:

в Томской и Кемеровской областях – значительно большее различие $TE_{SFA} > TE_{DEA}$;

в Республике Алтай – незначимо большее различие $TE_{SFA} > TE_{DEA}$ за счет большого квартильного размаха по TE_{DEA} на фоне малых выборок;

в Алтайском крае, Омской и Иркутской областях – незначимо малое различие $TE_{SFA} > TE_{DEA}$;

в Красноярском крае, Республиках Тыва и Хакасия, Новосибирской области – значимо и незначимо малые различия $TE_{SFA} < TE_{DEA}$.

Метод производственной функции Кобба–Дугласа

Вычислены характеристики производственных функций Кобба–Дугласа (3) для каждого региона СФО (табл. 2).

Таблица 2

Результаты регрессионного анализа производственных функций, регионы СФО
Results of regression analysis of production functions, regions of the Siberian Federal District

Регион	R^2	F	$\lg \gamma$	α	β	$\alpha + \beta$	$\alpha_{\text{ст}}$	$\beta_{\text{ст}}$	n
СФО	0,974	989***	0,112	0,487	0,970***	1,457	0,033	0,950***	110
АК	0,125	0,570	2,986†	-0,193	0,080	-0,113	-0,083	0,316	11
ИО	0,790	15,1**	-0,204	1,151	0,519***	1,670	0,224	0,886***	11
КК	0,017	0,068	2,848	0,195	0,085	0,280	0,038	0,108	11
КО	0,041	0,171	3,54**	-0,311	0,022	-0,289	-0,222	0,170	11
НО	0,144	0,673	5,082	-1,287	0,144	-1,143	-0,276	0,266	11
ОО	0,713	9,94**	-1,355	2,23**	0,09†	2,32	0,758**	0,386†	11
РА	0,601	6,02*	5,18***	-1,949**	0,005	-1,944	-0,775**	0,013	11
РТ	0,251	1,342	1,254*	0,366	0,035	0,401	0,447	0,247	11
РХ	0,049	0,207	2,966*	-0,352	0,035	-0,317	-0,196	0,164	11
ТО	0,113	0,509	2,128*	0,333	0,021	0,354	0,395	0,109	11

Эконометрическим методом для регионов СФО построена качественная модель производственной функции ($R^2 \approx 0,974 > 0,8$ с высокосignификантной F-статистикой), коэффициенты эластичности результата (ВРП) по ресурсным показателям труда (УЗН) α и капитала (ИОК) β составляют соответственно $\alpha \approx 0,487$ и $\beta \approx 0,970$ ($0,033 \approx \alpha_{\text{ст}} < \beta_{\text{ст}} \approx 0,95$), что определяет возрастающую отдачу от масштаба ($\alpha + \beta \approx 1,457 > 1$). Причем значимое влияние на (ВРП) оказывают только инвестиции в основной капитал (ИОК).

Стандартизированные $\alpha_{\text{ст}}$ и $\beta_{\text{ст}}$ позволяют сравнивать вклад ресурсных показателей труда (УЗН) α и капитала (ИОК) β в (ВРП) (рис. 7).

Результаты регрессионной модели для регионов СФО не являются однородными по регионам. F-статистика значима только в трех регионах (Иркутская и Омская области, Республика Алтай). Кластерный анализ выделяет четыре группы разнородных различий $\alpha_{\text{ст}}$ и $\beta_{\text{ст}}$ регионов СФО:

в Томской и Омской областях, Республике Тыва – $\alpha_{\text{ст}} > \beta_{\text{ст}}$, со значимым $\alpha_{\text{ст}}$ в Омской области и незначимыми $\alpha_{\text{ст}}$ и $\beta_{\text{ст}}$ в Томской области и Республике Тыва, а также средневысоким $R^2 \approx 0,713$ в Омской области и низким $R^2 < 0,251$ в Томской области и Республике Тыва, статистически сильно-значимой F-статистикой в Омской области и незначимой F-статистикой в Томской области и Республике Тыва, наконец, $\alpha + \beta \approx 2,32 > 1$ в Омской области и $\alpha + \beta < 0,401 < 1$ в Томской области и Республике Тыва;

в Республике Алтай – $\alpha_{\text{ст}} < \beta_{\text{ст}}$ и значимым $\alpha_{\text{ст}}$, а также средним $R^2 < 0,601$, статистически значимой F-статистикой и $\alpha + \beta \approx -1,944 < 1$;

в Иркутской области – $\alpha_{\text{ст}} < \beta_{\text{ст}}$ и значимым $\beta_{\text{ст}}$, а также высоким $R^2 \approx 0,79$, сильнозначимой F-статистикой и $\alpha + \beta \approx 1,67 > 1$;

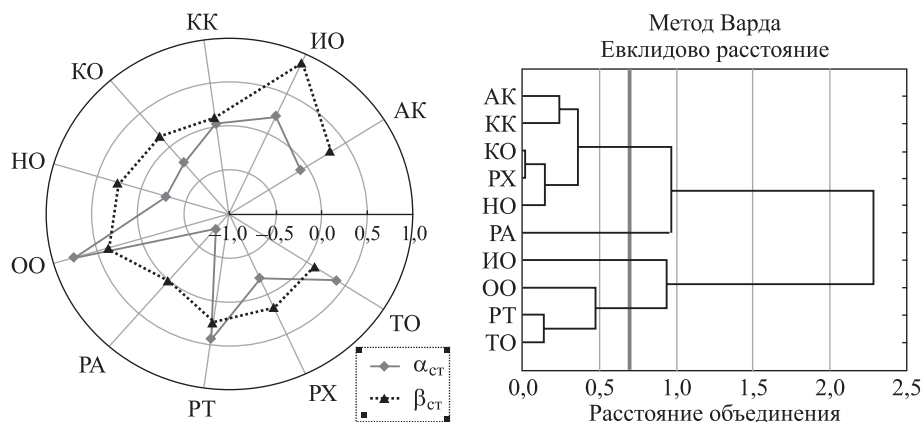


Рис. 7. Линейные графики стандартизованных коэффициентов эластичности результата (ВРП) по затратам труда (УЗН) $\alpha_{ст}$ и капитала (ИОК) $\beta_{ст}$ (слева) и соответствующая дендрограмма (справа), регионы СФО

Linear graphs of standardized elasticity coefficients of the result (GRP) for labor costs (LL) α_{st} and capital (IOC) β_{st} (left), and the corresponding dendrogram (right), regions of the Siberian Federal District

в Красноярском и Алтайском краях, Республике Хакасия, Кемеровской и Новосибирской областях – $\alpha_{ст} < \beta_{ст}$ и незначимыми $\alpha_{ст}$ и $\beta_{ст}$, а также низким $R^2 < 0,125$, незначимой F-статистикой и $\alpha + \beta < 0,280 < 1$.

Выводы

Таким образом, полученные результаты позволяют сделать вывод об эффективности использования комплексного подхода измерения технической эффективности различными методами (DEA + MPI и SFA + производственной функции Кобба–Дугласа), расширенного кластерными и дисперсионными методами как аналитического инструмента для разработки имитационных инновационных стратегий развития регионов.

Список источников

1. Акерман Е.Н., Анохин С.А., Михальчук А.А., Спицын В.В., Чистякова Н.О. Локальные инновации и глобальное технологическое лидерство: Переосмысление подходов к эффективному внутриотраслевому трансферу технологий: Монография. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2021. 201 с.
2. Акерман Е.Н., Михальчук А.А., Спицын В.В., Чистякова Н.О. Оценка имитационного потенциала IT-компаний при помощи производственной функции Кобба–Дугласа // Вестник НГУЭУ. 2019. № 4. С. 130–142.
3. Бондарев И.А., Морозова В.Д. Оценка эффективности инвестиционной деятельности промышленных предприятий // Известия Санкт-Петербургского государственного экономического университета. 2018. № 2 (110). С. 86–92.
4. Ивлева Н.В., Комаревцева О.О. Применение имитационного моделирования в процессе управления финансово-инвестиционными ресурсами муниципального образования // Вестник Белгородского университета кооперации, экономики и права. 2014. № 3 (51). С. 303–310.
5. Клейнер Г.Б. Производственные функции. Теория, методы, применение. М.: Финансы и статистика. 239 с.

6. Лобова С.В., Понькина Е.В. Об эконометрическом подходе к измерению эффективности: Теоретический аспект исследования // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. Серия: Экономика и управление. 2015. № 2 (21). С. 42–47.
7. Мамонов М.Е., Пестова А.А., Сабельникова Е.М., Апокин А.Ю. Подходы к оценке факторов производства и технологического развития национальных экономик: Обзор мировой практики // Проблемы прогнозирования. 2015. № 6 (153). С. 45–57.
8. Порунов А.Н. Оценка сравнительной эффективности государственного менеджмента экологической безопасности в регионе методом DEA-анализа (на примере Приволжского федерального округа // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Экономика и экологический менеджмент». 2016. № 1. С. 104–111.
9. Пшеничникова С.Н., Романюк И.Д. Анализ производственной функции Кобба–Дугласа для экономик России и ряда стран региона центральной и восточной Европы // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия Экономика. Социология. Менеджмент. 2017. Т. 7. № 3 (24). С. 148–166.
10. Халафян А.А., Боровиков В.П., Калайдина Г.В. Теория вероятностей, математическая статистика и анализ данных: Основы теории и практика на компьютере. STATISTICA. EXCEL. М.: URSS, 2016. 317 с.
11. Цапенко М.В. Синтез глобальных оценок сравнительной эффективности инновационного потенциала региона // Экономика и управление. 2015. № 5 (126). С. 53–58.
12. Чистякова Н.О., Михальчук А.А. Оценка DEA-динамической эффективности инновационного развития регионов СФО // Вестник НГУЭУ. 2020. № 4. С. 72–90.
13. Чистякова Н.О., Михальчук А.А., Татарникова В.В., Акерман Е.А., Изотова А.С. Техническая эффективность регионов как инструмент повышения конкурентоспособности территорий за счет стратегии технологического арбитража (имитации) // Векторы благополучия: экономика и социум. 2022. № 2 (45). С. 179–193.
14. Aigner D., Lovell C.A.K., Schmidt P. Formulation and Estimation of Stochastic Frontier Production Function Models // Journal of Econometrics. 1977. No. 6. P. 21–37.
15. Alimohammadlou M., Mohammadi S. Evaluating the productivity using Malmquist index based on double frontiers data // Procedia – Social and Behavioral Sciences. 2016. No. 230. P. 58–66.
16. Azad A.K., Masum A.K., Haque S. Use of Circular Malmquist Index (CMI) and Variable Returns to Scale (VRS–MI) in Productivity Measurement – a Comparative Study // International Journal of Ethics in Social Sciences. 2014. Vol. 2, no. 2. P. 69–76.
17. Battese G., Coelli T. Prediction of firm-level technical efficiencies with a generalized frontier production function and panel data // Journal of Econometrics. 1988. No. 38. P. 387–399.
18. Charnes A., Cooper W.W., Lewin A.Y., Seiford L.M. Data Envelopment Analysis: Theory, Methodology and Applications. Springer Dordrecht, 1994. DOI: 10.1007/978-94-011-0637-5.
19. Charnes A., Cooper W., Rhodes E. Measuring the Efficiency of Decision Making Units // European Journal of Operational Research. 1978. No. 2. P. 429–444.
20. Jafari Y. Malmquist Productivity Index for Multi Time Periods // International Journal of Data Envelopment Analysis. 2014. Vol. 2, no. 1. P. 315–322.
21. Malmquist S. Index numbers and indifference surfaces // Trabajos de Estadística. 1953. No. 4. P. 209–242.
22. Meeusen W., Van Den Broeck J. Efficiency estimation from Cobb–Douglas production functions with composed error // International Economic Review. 1977. No. 18. P. 435–444.
23. Seiford L.M. Data Envelopment Analysis: The Evolution of the State of the Art (1978–1995) // Journal of Productivity Analysis. 1996. Vol. 7. P. 99–138.
24. Tohidi G., Razavyan S. A circular global profit Malmquist productivity index in data envelopment analysis // Applied Mathematical Modelling. 2013. No. 37. P. 216–227.

25. Регионы России. Социально-экономические показатели: 2021. стат. сб. / С.М. Окладников, председатель ред. кол. Москва. 2021. 1112 с. URL: https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/Region_Pokaz_2021.pdf (дата обращения: 15.09.2022).
26. Coelli T. A Data Envelopment Analysis (Computer) Program // Centre for Efficiency and Productivity Analysis Department of Econometrics University of New England Armidale, Australia. 1998. URL: <http://www.une.edu.au/econometrics/cepa.htm> (accessed: 14.09.2022).
27. TIBCO Software Inc. Data Science Textbook. 2020. <https://docs.tibco.com/data-science/textbook> (accessed: 13.04.2020).

References

1. Akerman E.N., Anohin S.A., Mihal'chuk A.A., Spicyn V.V., Chistjakova N.O. Lokal'nye innovacii i global'noe tehnologicheskoe liderstvo: Pereosmyslenie podhoda k jeffektivnomu vnutriortraslevomu transferu tehnologij: monografija [Local innovations and global technology leadership: Rethinking approaches to effective intra-industry technology transfer: Monograph]. Tomsk, Izd-vo Tomskogo politehnicheskogo universiteta, 2021. 201 p.
2. Akerman E.N., Mihal'chuk A.A., Spicyn V.V., Chistjakova N.O. Ocenka imitacionnogo potentsiala IT-kompanij pri pomoshhi proizvodstvennoj funkicii Kobb–Duglasa [Assessment of the simulation potential of IT companies using the Cobb–Douglas production function], *Vestnik NGUJeU [Vestnik NSUEM]*, 2019, no. 4, pp. 130–142.
3. Bondarev I.A., Morozova V.D. Ocenka jeffektivnosti investicionnoj dejatel'nosti promyshlennyh predpriyatij [Evaluation of the effectiveness of the investment activity of industrial enterprises], *Izvestija Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo jekonomicheskogo universiteta [Bulletin of the St. Petersburg State University of Economics]*, 2018, no. 2 (110), pp. 86–92.
4. Ivleva N.V., Komarevceva O.O. Primenenie imitacionnogo modelirovanija v processe upravlenija finansovo-investicionnymi resursami municipal'nogo obrazovanija [The use of simulation modeling in the process of managing financial and investment resources of a municipality], *Vestnik Belgorodskogo universiteta kooperacii, jekonomiki i prava [Bulletin of the Belgorod University of Cooperation, Economics and Law]*, 2014, no. 3 (51), pp. 303–310.
5. Klejner G.B. Proizvodstvennye funkicii. Teorija, metody, primenenie [Production functions. Theory, methods, application]. Moscow, Finansy i statistika. 239 p.
6. Lobova S.V., Pon'kina E.V. Ob jekometricheskom podhode k izmereniju jeffektivnosti: teoreticheskij aspekt issledovanija [On the econometric approach to measuring efficiency: the theoretical aspect of the study], *Vektor nauki Tol'jattinskogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Jekonomika i upravlenie [Vector of Science of Togliatti State University. Series: Economics and Management]*, 2015, no. 2 (21), pp. 42–47.
7. Mamonov M.E., Pestova A.A., Sabel'nikova E.M., Apokin A.Ju. Podhody k ocenke faktorov proizvodstva i tehnologicheskogo razvitija nacional'nyh jekonomik: obzor mirovoj praktiki [Approaches to assessing the factors of production and technological development of national economies: a review of world practice], *Problemy prognozirovaniya [Problems of Forecasting]*, 2015, no. 6 (153), pp. 45–57.
8. Porunov A.N. Ocenka sravnitel'noj jeffektivnosti gosudarstvennogo menedzhmenta jekologicheskoy bezopasnosti v regione metodom DEA-analiza (na primere Privolzskogo federal'nogo okruga [Evaluation of the comparative effectiveness of state management of environmental safety in the region by DEA-analysis (on the example of the Volga Federal District)], *Nauchnyj zhurnal NIU ITMO. Serija «Jekonomika i jekologicheskij menedzhment» [Scientific journal NRU ITMO. Series “Economics and Environmental Management”]*, 2016, no. 1, pp. 104–111.

9. Pshenichnikova S.N., Romanjuk I.D. Analiz proizvodstvennoj funkicii Kobba–Duglasa dlja jekonomik Rossii i rjada stran regiona central’noj i vostochnoj Evropy [Analysis of the Cobb–Douglas production function for the economies of Russia and a number of countries in the region of Central and Eastern Europe], *Izvestija Jugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija Jekonomika. Sociologija. Menedzhment* [Bulletin of the South-Western State University. Series Economics. Sociology. Management], 2017, vol. 7, no. 3 (24), pp. 148–166.
10. Halafjan A.A., Borovikov V.P., Kalajdina G.V. Teorija verojatnostej, matematicheskaja statistika i analiz dannyh: Osnovy teorii i praktika na komp’jutere. STATISTICA. EXCEL [Probability theory, mathematical statistics and data analysis: Fundamentals of theory and practice on the computer. STATISTICS. EXCEL]. Moscow, URSS, 2016. 317 p.
11. Capenko M.V. Sintez global’nyh ocenok sravnitel’noj jeffektivnosti innovacionnogo potenciala regiona [Synthesis of global assessments of the comparative effectiveness of the region’s innovative potential], *Jekonomika i upravlenie* [Economics and Management], 2015, no. 5 (126), pp. 53–58.
12. Chistjakova N.O., Mihal’chuk A.A. Ocenka DEA–dinamicheskoy jeffektivnosti innovacionnogo razvitiya regionov SFO [Estimation of DEA-dynamic efficiency of innovative development of regions of the Siberian Federal District], *Vestnik NGUJeU* [Vestnik NSUEM], 2020, no. 4, pp. 72–90.
13. Chistjakova N.O., Mihal’chuk A.A., Tatarnikova V.V., Akerman E.A., Izotova A.S. Tehnicheskaja jeffektivnost’ regionov kak instrument povyshenija konkurentosposobnosti territorij za schet strategii tehnologicheskogo arbitrazha (imitacii) [Technical efficiency of regions as a tool to increase the competitiveness of territories through the strategy of technological arbitrage (imitation)], *Vektory blagopoluchija: jekonomika i socium* [Vectors of well-being: economics and society], 2022, no. 2 (45), pp. 179–193.
14. Aigner D., Lovell C.A.K., Schmidt P. Formulation and Estimation of Stochastic Frontier Production Function Models, *Journal of Econometrics*, 1977, no. 6, pp. 21–37.
15. Alimohammadlou M., Mohammadi S. Evaluating the productivity using Malmquist index based on double frontiers data, *Procedia – Social and Behavioral Sciences*, 2016, no. 230, pp. 58–66.
16. Azad A.K., Masum A.K., Haque S. Use of Circular Malmquist Index (CMI) and Variable Returns to Scale (VRS–MI) in Productivity Measurement – a Comparative Study, *International Journal of Ethics in Social Sciences*, 2014, vol. 2, no. 2, pp. 69–76.
17. Battese G., Coelli T. Prediction of firm-level technical efficiencies with a generalized frontier production function and panel data, *Journal of Econometrics*, 1988, no. 38, pp. 387–399.
18. Charnes A., Cooper W.W., Lewin A.Y., Seiford L.M. Data Envelopment Analysis: Theory, Methodology and Applications. Springer Dordrecht, 1994. DOI: 10.1007/978-94-011-0637-5.
19. Charnes A., Cooper W., Rhodes E. Measuring the Efficiency of Decision Making Units, *European Journal of Operational Research*, 1978, no. 2, pp. 429–444.
20. Jafari Y. Malmquist Productivity Index for Multi Time Periods, *International Journal of Data Envelopment Analysis*, 2014, vol. 2, no. 1, pp. 315–322.
21. Malmquist S. Index numbers and indifference surfaces, *Trabajos de Estadística*, 1953, no. 4, pp. 209–242.
22. Meeusen W., Van Den Broeck J. Efficiency estimation from Cobb–Douglas production functions with composed error, *International Economic Review*, 1977, no. 18, pp. 435–444.
23. Seiford L.M. Data Envelopment Analysis: The Evolution of the State of the Art (1978–1995), *Journal of Productivity Analysis*, 1996, vol. 7, pp. 99–138.
24. Tohidi G., Razavyan S. A circular global profit Malmquist productivity index in data envelopment analysis, *Applied Mathematical Modelling*, 2013, no. 37, pp. 216–227.

25. Regiony Rossii. Social'no-jekonomicheskie pokazateli: 2021. stat. sb. [Regions of Russia. Socio-economic indicators: 2021. stat. sat.], S.M. Okladnikov, predsedatel' red. kol. Moscow, 2021. 1112 p. Available at: https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/Region_Pokaz_2021.pdf (accessed: 15.09.2022).
26. Coelli T. A Data Envelopment Analysis (Computer) Program. Centre for Efficiency and Productivity Analysis Department of Econometrics University of New England Armidale, Australia. 1998. Available at: <http://www.une.edu.au/econometrics/cepa.htm> (accessed: 14.09.2022).
27. TIBCO Software Inc. Data Science Textbook. 2020. Available at: <https://docs.tibco.com/data-science/textbook> (accessed: 13.04.2020).

Сведения об авторах:

А.А. Михальчук – кандидат физико-математических наук, доцент, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Российская Федерация.

Н.О. Чистякова – доктор экономических наук, доцент, исполняющий обязанности руководителя, Школа инженерного предпринимательства, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Российская Федерация.

Е.А. Акерман – магистр менеджмента, младший научный сотрудник, Институт экономики и менеджмента, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Российская Федерация.

В.В. Татарникова – кандидат экономических наук, старший преподаватель, Школа инженерного предпринимательства, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Российская Федерация.

Information about the authors:

A.A. Mikhalechuk – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation.

N.O. Chistyakova – Doctor of Economics, Associate Professor, Acting Head, School of Engineering Entrepreneurship, National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation.

E.A. Akerman – Master of Management, Junior Research Fellow, Institute of Economics and Management, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation.

V.V. Tatarnikova – Candidate of Economic Sciences, Senior Lecturer, School of Engineering Entrepreneurship, National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

<i>Статья поступила в редакцию</i>	<i>16.09.2022</i>	<i>The article was submitted</i>	<i>16.09.2022</i>
<i>Одобрена после рецензирования</i>	<i>20.10.2022</i>	<i>Approved after reviewing</i>	<i>20.10.2022</i>
<i>Принята к публикации</i>	<i>02.11.2022</i>	<i>Accepted for publication</i>	<i>02.11.2022</i>